

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2026

Транспортний факультет

Збірник тез доповідей щорічної
науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців,
молодих учених і аспірантів
13–17 квітня 2026 року

Електронне видання на DVD-ROM

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2026

УДК 656
Т39

*Рекомендовано до видання Вченою радою
Національного університету «Запорізька політехніка»
(Протокол № 13 від 26.06.2026 р.)*

Рецензенти: *Олександр ПРОЦИК, канд. техн. наук, доцент Національного транспортного університету
Дмитро ЯЩЕНКО, канд. техн. наук, доцент Національного транспортного університету*

Микола МОРОЗ, д-р техн. наук, проф. КНУ ім. М. Остроградського

Упорядник: *Вячеслав ТРУШЕВСЬКИЙ*

Редакційна колегія:

Вадим ШАЛОМЄЄВ, проректор з НР, д-р техн. наук, професор, (відпов. ред.) ;

Олексій КУЗЬКІН, д-р техн. наук, професор;

Василь ГЛУШКО, канд. техн. наук, доцент;

Євген ПАРАХНСВИЧ, канд. техн. наук, доцент;

Микола АНТОНОВ, канд. техн. наук, доцент;

Ольга БАБЕНКО, канд. техн. наук, доцент;

Наталія ФУРМАНОВА, канд. техн. наук, доцент;

Марія ТЯГУНОВА, канд. техн. наук, доцент;

Тетяна ХІТРОВА, канд. філолог. наук, професор;

Світлана КОКАРЕВА, канд. наук з фіз. вих. і спорту, доцент;

Олена ВАСИЛЬЄВА, д-р економ. наук, професор;

Юрій ФІЛЕЙ, канд. юр. наук, професор;

Таїсія ГАЙВОРОНСЬКА, канд. філос. наук, доцент;

Наталія ВИСОЦЬКА, начальник ПІВ НДЧ;

Наталія САВЧУК, начальник РВВ;

Сніжана ВИЧУЖАНІНА, керівник ВНРС;

Ганна ОМОК, канд.пед наук, доцент.

Т39

Тиждень науки-2026. Транспортний факультет :

тези доповідей науково-практичної конференції (м. Запоріжжя, 13–17 квітня 2026 р.) [Електронне видання] / редкол. : Вадим ШАЛОМЄЄВ (відп. ред.). Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2026. 111 с. 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM).

ISBN 978-617-529-548-9

Зібрані тези доповідей, заслуханих на щорічний науково-практичний конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів. Збірка відображає широкий спектр тематики наукових досліджень, що проводяться на транспортному факультеті Національного університету «Запорізька політехніка». Збірка розрахована на широкий загал дослідників та науковців

УДК 656

ISBN 978-617-529-548-9

© Національний університет
«Запорізька політехніка»
(НУ «Запорізька політехніка»), 2026

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ «АВТОМОБІЛЬНА ТЕХНІКА ТА ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ»

<i>О.М. Артюх</i> Інноваційні підходи до інтеграції гібридних технологій у конструкцію сучасних транспортних засобів: енергоефективність та екологічність.....	7
<i>В.І. Кубіч</i> Особливості навантаження трансмісії колісного автомобіля при змінах вихідних параметрів двигуна та умов зчеплення шин з дорогою.....	9
<i>С.О. Беженов</i> Вплив легування та стану поверхні сталевих виробів на їх роботоздатність в умовах довготривалої дії циклічних навантажень	11
<i>G. Slynko, R. Sukhonos</i> Reduction of Exhaust Gas Toxicity in Two-Stroke Internal Combustion Engines	12
<i>О.С. Слюсаров</i> Особливості взаємодії рушіїв наземних транспортних засобів з анізотропними опорними поверхнями в умовах критичних навантажень ...	14
<i>Н.О. Євсєєва</i> Моделювання процесів руйнування реторт магнійтермічного виробництва титану	16
<i>В.В. Корнієнко, Н.О. Євсєєва, С.Б. Беліков</i> Модифікація хромистих корозійностійких сталей для плакуючого шару біметалів	19
<i>В.В. Слинко</i> Стан та перспективи розвитку альтернативних джерел палива для теплових двигунів та енергетичних установок в Україні	21
<i>Н.Є. Рябошапка</i> Математичне моделювання взаємозв'язку електричних сигналів датчиків і роботи двигуна внутрішнього згоряння.....	24
<i>О.П. Кудін, О.В. Дударенко</i> Підвищення надійності та пожежної безпеки автомобіля шляхом удосконалення конструкції газобалонного обладнання .	26
<i>О.П. Кудін, О.В. Дударенко</i> Підвищення ефективності горіння паливоповітряної суміші бензин/lpg у двопаливному двигуні з безпосереднім упорскуванням.....	29
<i>Т.В. Татарчук, О.В. Дударенко, В.О. Обертинська, Д.Р. Лемешко</i> Фізико-трибологічні аспекти роботи двигунів внутрішнього згоряння.....	31
<i>І.Г. Дужик, О.М. Артюх</i> Сучасні аспекти проєктування та експлуатації автомобільних гібридних енергетичних установок: виклики для транспортної галузі України.....	36

<i>Є.О. Железняк, О.М. Артюх</i> Розвиток гібридного автомобільного транспорту в Україні: технологічні виклики та стратегії оптимізації експлуатаційних характеристик	37
<i>Ю.І. Петрюк, О.М. Артюх</i> Розробка алгоритмів адаптивного керування режимами роботи машинно-тракторних агрегатів як основа їхньої роботизації в умовах змінних фізико-механічних властивостей ґрунтів	39
<i>Є.П. Абаждей</i> Порівняльний аналіз методів підвищення прохідності колісних транспортних засобів: від механічних блокувань до електричної векторизації крутного моменту	40
<i>Н.В. Пужаєнко, С.О. Беженев</i> Вплив форми термічно масивних виробів з хромонікелевих сталей на параметри ефективності процесів їх нагрівання при термічній обробці	42
<i>Н.Є. Рябошапка, О.С. Вайновський</i> Аналіз алгоритмів управління паливними форсунками в системах прямого впорскування під час перехідних режимів роботи двигуна з урахуванням тиску впорскування, температури заряду та корекцій ЕБУ	44
<i>Г.І. Слинько, Є.А. Тхор</i> Сучасні методи діагностування двигунів внутрішнього згоряння з використанням акустичних систем	47
<i>Г.І. Слинько, М.П. Зайцев, Р.Ф. Сухонос, В.В. Слинько</i> Системи рециркуляції відпрацьованих газів у двигунах внутрішнього згоряння	49
<i>Н.О. Євсєєва, М.П. Зайцев</i> Будова та принцип роботи системи впуску двигуна Renault K7J	52
<i>В.С. Бойченко, О.П. Кудін, О.В. Дударенко</i> Особливості виявлення несправності системи впуску автомобіля	54
<i>В.О. Степанченков, М.Л. Репін</i> Біодизель	57
<i>В.О. Степанченков, М.С. Магницький</i> Налаштування клапанів	59

СЕКЦІЯ «ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

<i>Пучек С.В., Беліков С.Б.</i> Співставлення властивостей суперсплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ як матеріалів для виготовлення лопаток газотурбінних двигунів	62
<i>Л.О.Васильєва, О.О.Острогляд, Є.В. Боженова</i> Євроінтеграція нормативної бази і цифровізація міжнародних автобусних перевезень	63
<i>Л.О.Васильєва, О.О.Острогляд, П.Р.Сущенко</i> Інтероперабельність залізничного транспорту України в умовах євроінтеграції	67

<i>А.М. Каплуновська, Б.О. Сагайдак</i> Сучасні аспекти реформування логістики в умовах ведення повномасштабної війни в Україні	69
<i>А.М. Каплуновська, Д.А. Куча</i> Система управління запасами КАНБАН (практичне застосування)	72
<i>А.М. Каплуновська, А.П. Давиденко</i> Впровадження аутсорсінгу логістичних послуг в Україні	75
<i>А.М. Каплуновська, В.О. Обертінська</i> Особливості функціонування ринку транспортних послуг під час воєнного стану: цифровізація та екологічні стандарти.....	78
<i>І.М. Райда, Н.О. Байрак</i> Водень як паливо для вантажних автомобільних перевезень	81
<i>О. В. Тарасенко, В. О. Обертінська</i> Дослідження динаміки розвитку автомобільного ринку Європи	83
<i>О. В. Тарасенко, О. О. Фукалова</i> План сталої міської мобільності як сучасна концепція планування міського транспорту	86
<i>О.Ф. Кузькін</i> Оцінка граничної величини тарифу на послуги автомобільного транспорту на приміських та міжміських автобусних маршрутах.....	88
<i>С.М. Турпак, С.О. Іщенко, А.Д. Фурсіна</i> Моделювання транспортних потоків за експоненціальним розподілом з обмеженнями	90
<i>В.Е. Трушевський</i> Недоліки пофазного методу формалізації режимів світлофорного регулювання	92

СЕКЦІЯ «ТЕОРЕТИЧНА І ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА»

<i>А.А. Скребцов, О.С. Омельченко, А.В. Кононенко, О.В. Омельченко</i> Вплив особливостей структури порошкових матеріалів на розрахунок границі міцності	94
<i>В.Ю. Ланін, І.О. Доновський, А.В. Кононенко, А.А. Скребцов, Ю.І. Кононенко</i> Поліпшення процесів пресування та спіканні титанових порошків із використанням AEROSIL®	95
<i>В.Ю. Ланін, І.О. Доновський, Р.В. Лебедєв, А.А. Скребцов, А.В. Кононенко</i> Поліпшення процесів пресування та спіканні титанових порошків із використанням SIPERNAT®.....	97
<i>S. Ryagin, R. Onyshchenko, Chernenko D.</i> Comparison of Approaches to the Optimization of Spring Elements in Machines.....	98

<i>Г.Г. Безгінов, С.Ю. Кружнова, Н.В. Шалева</i> До питання про кінематичний аналіз важільних механізмів.....	99
<i>V. Shevchenko, S. Shumykin, S. Ryagin, R. Onyshchenko</i> Mechanical properties of metal of cast parts of complex shape for gas turbine units	101
<i>с.М. Турпак, а.д. Фурсіна</i> Проблеми міцності несучих систем транспортних причепів.....	102
<i>О.Г. Попович, В.Г. Шевченко</i> Вплив зміщень твірного контуру на товщини зубів по колах вершин циліндричних прямозубих коліс	104
<i>S. Ryagin, R. Onyshchenko</i> Comparative analysis of designs of special technological containers for chemical heat treatment	106
<i>С.Ю. Кружнова, О.С.Омельченко</i> Дослідження динаміки плоских механічних систем	107
<i>С.Ю. Кружнова, Н.В. Шалева</i> Математичне моделювання кінематики плоских механізмів на основі векторно-контурного методу.....	108

СЕКЦІЯ «АВТОМОБІЛЬНА ТЕХНІКА ТА ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ»

УДК 629.331:621.43.06

Артюх О.М.

доц. НУ «Запорізька політехніка»

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ІНТЕГРАЦІЇ ГІБРИДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У КОНСТРУКЦІЮ СУЧАСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ: ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕКОЛОГІЧНІСТЬ

Сучасний етап розвитку глобального та вітчизняного машинобудування перебуває у точці критичної трансформації, зумовленої жорсткими екологічними вимогами та необхідністю радикального підвищення енергоефективності транспортних систем. Для України, де автомобільна галузь традиційно орієнтувалася на класичні силові установки, перехід до гібридних енергетичних систем є не просто технологічним трендом, а нагальною стратегічною потребою. Аналіз сучасного стану галузі свідчить, що ключовим викликом сьогодні є розрив між стрімким розвитком світових технологій інтелектуального приводу та реальним станом виробничих потужностей і експлуатаційної інфраструктури всередині країни.

Машинобудівна галузь України в аспекті створення транспортних засобів стикається з низкою специфічних проблем. По-перше, це критична необхідність адаптації високотехнологічних вузлів гібридних установок до складних умов експлуатації: нестабільної якості дорожнього покриття, що створює надмірні вібраційні навантаження на акумуляторні блоки та силову електроніку, а також значних температурних коливань. По-друге, гостро постає питання енергетичної незалежності, де гібридизація виступає дієвим інструментом диверсифікації споживання енергоресурсів.

Інтеграція гібридних технологій у конструкцію сучасних автомобілів вимагає переосмислення самої архітектури транспортного засобу. На відміну від традиційних схем, де двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) є єдиним джерелом механічної енергії, гібридна схема передбачає створення складного поєднання теплового двигуна та електричної машини. Основна складність тут полягає у розробці інтелектуальних алгоритмів керування, які здатні в режимі реального часу приймати рішення про перерозподіл енергетичних потоків. Це особливо важливо для міського циклу руху, де частка режимів холодного ходу та неефективного розгону в класичних автомобілях сягає 30–40%.

Впровадження систем рекуперації енергії гальмування дозволяє не лише повернути частину кінетичної енергії у накопичувач, а й суттєво

зменшити термічне та механічне зношування гальмівних механізмів, що безпосередньо впливає на ресурсну ефективність машини.

Екологічний аспект проблеми також набуває нової ваги. Машинобудування має відповідати на запити суспільства щодо зниження викидів CO_2 та оксидів азоту. Гібридні установки, завдяки можливості роботи ДВЗ в оптимальних сталих режимах з високим ККД, дозволяють досягти показників екологічності, що наближаються до стандартів майбутнього, не відмовляючись при цьому від автономності, яку забезпечує рідке паливо. Це є критично важливим для міжміських перевезень в умовах України, де мережа зарядних станцій для чистих електромобілів все ще перебуває на стадії формування.

Проведені дослідження підтверджують, що найбільш ефективним шляхом для вітчизняного виробника є застосування модульних принципів проектування. Це дозволяє інтегрувати електричні модулі у вже існуючі конструкції з мінімальними змінами технологічного циклу виробництва. Проте, такий підхід потребує вирішення складних інженерних задач, пов'язаних із управлінням тепловим режимом батарей та забезпеченням електромагнітної сумісності бортових систем.

Застосування математичного моделювання та методів віртуального прототипування дозволяє вже на етапі проектування оцінити потенційну енергоефективність обраної схеми гібридизації. Впровадження комбінованих силових установок на базі турбованих двигунів малого об'єму та високооборотних електродвигунів дозволить знизити сумарну витрату палива на 25–30% у порівнянні з аналогами. Окрім прямого економічного ефекту для власника, це створює додану вартість для всієї галузі, стимулюючи розвиток суміжних виробництв – від електроніки до композитних матеріалів для полегшення кузовів.

Таким чином, наукове обґрунтування інноваційних підходів до проектування гібридних транспортних засобів є фундаментом для відродження конкурентоспроможності українського машинобудування. Це вимагає не лише технічного оновлення, а й підготовки нового покоління інженерів, здатних працювати на стику механіки, електротехніки та програмування. Реалізація окреслених стратегій дозволить забезпечити розвиток транспортної галузі, збалансувавши вимоги економічної вигоди та екологічної відповідальності перед майбутніми поколіннями. Отримані результати можуть стати основою для формування нових галузевих стандартів, що враховуватимуть специфіку експлуатації техніки в сучасних умовах України.

ОСОБЛИВОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ ТРАНСМІСІЇ КОЛІСНОГО АВТОМОБІЛЯ ПРИ ЗМІНАХ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА ТА УМОВ ЗЧЕПЛЕННЯ ШИН З ДОРОГОЮ

Відомо, що зубчасті передачі трансмісії колісного автомобіля навантажуються двома параметрами механічної потужності, яка передається від двигуна до ведучих коліс, тобто $N_t = f(\omega, M_t)$. При цьому підведена потужність до кожного з коліс автомобіля за умовами зчеплення шин з опорною поверхнею може або повністю реалізуватися за крутним моментом у поступовий рух автомобіля, або частково, і зовсім ні. Відсутність реалізації підведеного крутного моменту до колеса за зчіпною вагою, яка на нього приходить, супроводжується буксуванням колеса.

Усвідомлення та розуміння процесів взаємодії ведучих коліс з опорною поверхнею в умовах можливого недостатнього зчеплення, але з постійно підведеним від двигуна крутним моментом, дозволило визначити наступні режими.

Режим № 1, при якому ліве і праве колесо одного моста буксують з однаковим крутним моментом і колеса мають однакові коефіцієнти зчеплення з опорною поверхнею: $\varphi_l \approx \varphi_n \approx (0,2 - 0,4)$.

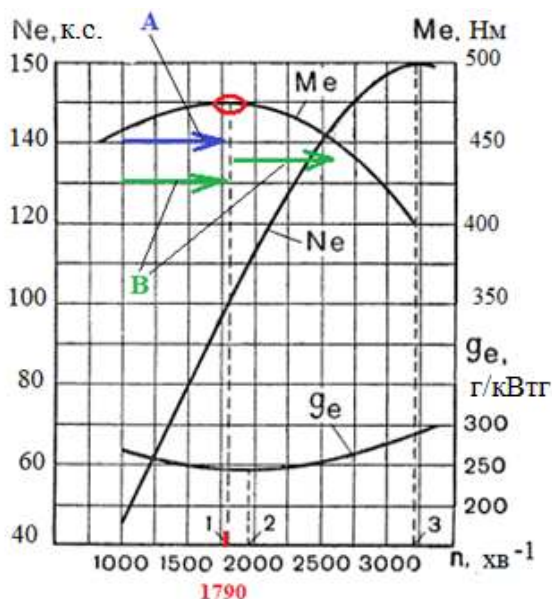
Режим № 2, при якому праве колесо обертається з більшою швидкістю, а ліве обертається з меншою швидкістю. Це виникає за умови, коли від двигуна на колеса підводиться крутний момент і шини коліс знаходяться на опорній поверхні з різним коефіцієнтом зчеплення. Тобто, $\varphi_l > \varphi_n$ або $\varphi_l < \varphi_n$.

Режим № 3, при якому одне з коліс повністю нерухоме, автомобіль не вистачає сили тяги для подолання перешкоди, але вистачає сили тяги для обертання другого колеса. Тоді одне колесо залишається повністю нерухомим, а друге починає обертатися з частотою в два рази більше ніж волило диференціала.

Режим № 4, при якому колеса автомобіля почали буксувати. Водій вирішив, якщо він натисне на педаль керування подачею палива, дасть більших обертів, то колесо зловить зчеплення з дорогою і буксування закінчиться.

Особливості навантаження трибоз'єднань механізмів трансмісії при проявах процесу буксування коліс є очевидними і витікають із графічної залежності, наведеної на рисунку 1. Відповідно до графіку зміни крутного моменту (рис. 1) на початку буксування бачимо, що зростає крутний момент і збільшуються оберти двигуна, а на трансмісію діють силовий та швидкісний

параметри навантаження. Потім бачимо, що при подальшій подачі палива оберти двигуна продовжують зростати, після досягнення максимального значення крутного моменту силовий параметр перестає діяти на елементи трансмісії і крутний момент починає падати, що призводить до ще більш прискореного буксування коліс. При цьому на трансмісію продовжує діяти тільки швидкісний параметр, який призводить до швидкого зносу елементів трансмісії за рахунок того, що трансмісійна олива не встигає вчасно змащувати поверхні зубчастих передач, підшипники кочення та ковзання.



А – силовий параметр навантаження трансмісії; В – швидкісний параметр навантаження трансмісії; 1 – частота обертання при максимальному крутному моменті; 2 – частота обертання колінчастого валу при мінімальній питомій витраті палива; 3 – максимальна частота обертання колінчастого валу

Рисунок 1 – Зовнішня швидкісна характеристика двигуна 8C100/95 потужністю $Ne=110$ кВт

Таким чином, виконуючи аналіз швидкісної характеристики двигуна автомобіля, стає можливим з урахуванням передатних чисел визначати діапазони швидкісного та силового навантаження трибоз'єднань механізмів трансмісії за умови прояву процесу буксування коліс.

ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ ТА СТАНУ ПОВЕРХНІ СТАЛЕВИХ ВИРОБІВ НА ЇХ РОБОТОЗДАТНІСТЬ В УМОВАХ ДОВГОТРИВАЛОЇ ДІЇ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

В сучасному машинобудуванні широкого розповсюдження знайшли конструкційні малолеговані сталі (із вмістом вуглецю від 0,3 до 0,5% вуглецю та до 5% легуючих елементів), які використовують після гартування та високого відпущення для виготовлення відповідальних деталей машин. В умовах довготривалої дії циклічних навантажень виробів з малолегованих сталей важливим фактором виступає також стан їх поверхні. Використовують широкий спектр обробок, спрямованих на підвищення міцності саме поверхневого шару виробів, зокрема поверхнєве ультразвукове зміцнення.

Досліджували зразки конструкційних малолегованих сталей (сталь 40Х, сталь 300ХГСА, сталь 40ХН2МА) як в стані після нормалізації, так і після ультразвукового зміцнення поверхні. Аналіз мікроструктури досліджуваних матеріалів здійснювали після випробувань зразків на багатоциклову втоми в умовах консольного симетричного згину. Результати випробувань обробляли згідно з гіпотезою про наявність полюса на кривих втоми матеріалів одного класу з різною технологічною спадковістю. Для цього визначали координати полюсів кривих багатоциклової втоми досліджуваних сталей.

Експериментальним шляхом встановлено, що значення ординати полюсу становить 1100 МПа, що є пропорційним до величини енергії активації руйнування об'єму одного моля металу, який становить основу сплаву, але трохи перевищує значення аналогічного параметру для вуглецевих сталей (1050 МПа). Абсцису полюсу для досліджуваних сталей визначали шляхом пошуку оптимальних значень основних статистичних параметрів (максимального коефіцієнта кореляції з мінімальним стандартним відхиленням). Дослідження показали, що легування вуглецевих сталей подовжує період стабілізації їх структури в процесі багатоциклової втоми до 555 циклів навантаження.

Встановлено, що зміцнювальна обробка поверхні не змінює основну структуру матеріалу, але підвищує характеристики опору втоми.

REDUCTION OF EXHAUST GAS TOXICITY IN TWO-STROKE INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Two-stroke internal combustion engines (ICE) remain practically important in applications where high specific power, low weight, compactness, and structural simplicity are critical. They are widely used in motorcycles, small watercraft, handheld power tools, portable power units, unmanned systems, and special-purpose equipment. At the same time, two-stroke ICEs are characterized by increased exhaust gas toxicity due to the specific features of gas exchange, mixture formation, and lubrication.

The main causes of high exhaust toxicity are the loss of part of the fresh charge during scavenging, incomplete combustion of the air-fuel mixture, and the entry of fuel and oil combustion products into the exhaust gases. The overlap of exhaust and charging processes leads to the escape of unburned fuel into the exhaust system, which increases hydrocarbon emissions. The use of a fuel-oil mixture in conventional designs increases carbon monoxide emissions, smoke, and particulate formation. An additional negative factor is the limited capability for precise combustion control in carbureted systems.

One of the most effective ways to reduce toxicity is the use of direct fuel injection. This makes it possible to inject fuel after the main scavenging phase, thereby reducing fresh charge losses and unburned hydrocarbon emissions, while also improving fuel economy. However, this solution has several drawbacks, including increased design complexity, higher cost, and stricter requirements for fuel quality and maintenance. For small-scale equipment, such systems are often economically unjustified.

An important direction is the optimization of cylinder scavenging through improved shape and arrangement of scavenging and exhaust ports, tuning of wave processes in the exhaust system, and the use of resonant exhaust pipes. This improves cylinder clearing from residual gases and reduces fresh charge short-circuiting. However, such solutions are usually effective only within a narrow range of engine speeds and loads, and they also complicate engine manufacturing.

A reduction in toxicity can also be achieved by switching to a separate lubrication system. Metered oil supply reduces lubricant consumption, decreases the amount of lubricant combustion products in the exhaust gases, lowers deposit formation, and increases component life. At the same time, separate lubrication

complicates the engine design and requires accurate oil metering, which is not always appropriate for equipment operating under severe or remote conditions.

Another promising measure is the use of catalytic converters, which reduce carbon monoxide and unburned hydrocarbon emissions. However, their efficiency in two-stroke engines is limited by the unstable composition of exhaust gases, the presence of fuel and oil residues that accelerate catalyst degradation, and the undesirable increase in the weight, size, and cost of the exhaust system.

A separate group of measures includes improvements in ignition systems, electronic fuel delivery control, and digital engine management algorithms. These systems enable more precise adaptation of engine parameters to changes in load and external operating conditions, thereby reducing toxicity and improving fuel efficiency. Their drawbacks include higher cost, more complicated diagnostics, dependence on electrical power supply, and greater sensitivity to moisture, vibration, and electromagnetic interference.

Additional reduction of exhaust toxicity may be achieved through the use of alternative fuels and modern synthetic lubricants. These can reduce smoke, carbon monoxide emissions, and deposit formation; however, they do not eliminate the fundamental disadvantage of the two-stroke cycle, namely fresh charge losses during scavenging.

Conclusion. Reducing exhaust gas toxicity in two-stroke internal combustion engines requires an integrated approach combining improved gas exchange, direct fuel injection, separate lubrication, catalytic aftertreatment, electronic control, and advanced fuels and lubricants. At the same time, each of these solutions has technical, economic, and operational limitations. Therefore, the most reasonable approach is a differentiated one, in which the level of engine modernization is determined by its application, operating modes, and economic feasibility.

LIST OF REFERENCES

1. Korohodskyi V., Manoylo V., Kryshtopa S., Gogorenko O., Slynko G., Khomutov M., Skrypnyk N. Determination of properties of the working medium in the cylinder of a two-stroke engine with spark ignition during combustion of a stratified fuel-air charge // AIP Conference Proceedings. 16 July 2025; 3428 (1): 020006. DOI: 10.1063/12.0038597.

2. Слинко Г. І., Сухонос Р. Ф., Слинко В. В., Лук'яненко В. П. Дослідження впливу резонансного наддуву бензинового двотактного двигуна на його швидкісну характеристику // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2024. № 4. С. 59–66. DOI: 10.15588/1607-6885-2024-4-6.

3. Слинко Г. І., Сухонос Р. Ф. Аналіз технічного рівня двотактних двигунів для бензопил // Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії '2025 : міжнар. конф., 11–12 березня 2025 р. : тези доп. Харків : ФОП Бровін О.В., 2025. С. 44–47.

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ РУШІЇВ НАЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З АНІЗОТРОПНИМИ ОПОРНИМИ ПОВЕРХНЯМИ В УМОВАХ КРИТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

В ході виконання кафедральної НДР проводилось дослідження особливостей взаємодії рушіїв колісних транспортних засобів з опорними поверхнями, які деформуються під їх дією в умовах критичних навантажень. Враховуючи, що при різних режимах кочення колісних рушіїв з еластичними шинами деформації опорних поверхонь змінні за напрямками, а опір цим деформаціям залежить від напрямку деформації, особливу увагу в дослідженні приділялось впливу анізотропних властивостей опорних поверхонь.

Приймаючи за гіпотезу, що деформація опорної поверхні в довільному напрямку є результатом елементарних нормальних і тангенціальних деформацій, та опираючись на накопичені дані щодо характеристик опору таким деформаціям опорних поверхонь різних типів і станів, пропонується розраховувати опір деформації в залежності від кута напрямку деформації до горизонталі, приймаючи за нульове значення напрямку, що співпадає з напрямком руху.

Питомий опір деформації за напрямком дії абсолютної швидкості на елементарній ділянці знаходимо за залежністю

$$q = \sqrt{p^2 + \tau^2}, \quad (1)$$

де p і τ – питомий опір нормальній і горизонтальній деформації.

У цьому рівнянні величини p і τ можна розрахувати за залежностями $p = C_r h^\mu$ і $\tau = p(\tan \varphi_x) + C_0$, відповідно, за якими для характеристик опорних поверхонь у механіці ґрунтів накопичено достатньо даних.

В загальному випадку питомий опір деформації опорної поверхні за напрямком знаходиться за залежністю

$$q = \sqrt{(C_r h^\mu)^2 + (C_r h^\mu)^2 \tan^2 \varphi_x + 2C_0 C_r h^\mu \tan \varphi_x + C_0^2}, \quad (2)$$

та відповідає напрямку деформації опорної поверхні відносно горизонтального при $\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi_x$. В той час як при $\alpha = 0$, $q = \tau(p = 0) = C_0$ та $q = \tau(p \neq 0) = p(\tan \varphi_x) + C_0$, а при $\alpha = \frac{\pi}{2}$ $q = p(\tau = 0) = C_r h^\mu$.

Для більшості опорних поверхонь, які деформуються, при критичних значеннях поздовжніх сил, фрикційна складова тангенціальної деформації на

порядок більше складової міжмолекулярного зчеплення, тобто в рівнянні (2) $C_r h^\mu \tan \varphi_x \gg [C_0(2C_r h^\mu \tan \varphi_x + C_0)]^{1/2}$.

Нехтуючи складовими залежними від міжмолекулярного зчеплення першого та другого порядку малості в цьому рівнянні маємо

$$q = C_r h^\mu \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_x}, \quad (3)$$

де $\tan \varphi_x = p/\tau$ – відносна питома сила опору горизонтальній деформації.

На рисунку 1 показана прийнята розрахункова схема взаємодії колеса із еластичною шиною з опорною поверхнею, яка деформується.

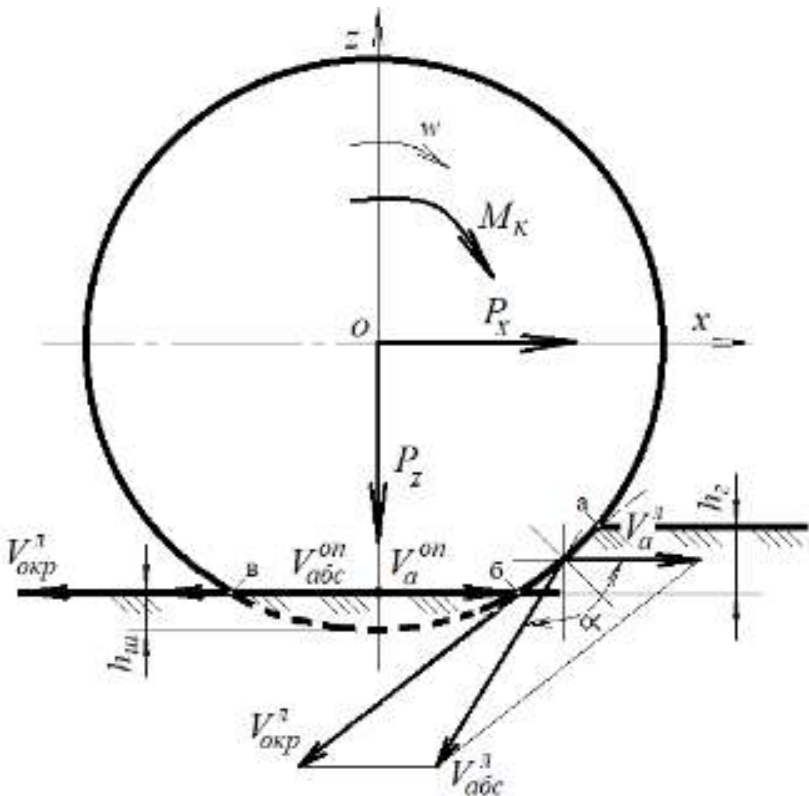


Рисунок 1 – Схема взаємодії колеса з еластичною шиною з опорною поверхнею, яка деформується

Напрямок деформації опорної поверхні по відношенню до горизонталі співпадаючої з напрямком руху змінюється в інтервалі $\alpha \in [\pi/2 - \varphi_x, \pi/2 + \varphi_x]$.

Прийнявши апроксимуючу залежність питомого опору деформації опорної поверхні за напрямком у вигляді еліптичної залежності з довжиною півосей τ і p , маємо

$$\frac{x^2}{\tau^2} + \frac{z^2}{p^2} = 1.$$

Підставивши в останню залежність $x = q \cos \alpha$ і $z = q \sin \alpha$ та залежності питомих опорів нормальній і горизонтальній деформації через характеристики опорної поверхні, отримаємо залежність для знаходження питомого опору деформації анізотропної поверхні за напрямком

$$q(\alpha) = C_r h^\mu \sqrt{\frac{\tan^2 \varphi_x}{\cos^2 \alpha + \tan^2 \varphi_x \sin^2 \alpha}},$$

де h – заглиблення елементарної ділянки деформації опорної поверхні.

При взаємодії колеса з еластичною шиною з опорною поверхнею, яка деформується, можна виділити ділянку лобового опору (а-б) і ділянку опорну (б-в), показані на рисунку 1. Елементарні сили опору деформації на цих ділянках направлені по лінії дії абсолютних швидкостей в зворотному напрямку. Із рівняння суми роботи результуючих елементарних сил ділянок контакту шини з опорною поверхнею при елементарному переміщенні колеса можна знайти силу опору коченню, момент опору кочення та коефіцієнт опору кочення колеса.

УДК 669.295:621.74.043

Євсєєва Н.О.

канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ РЕТОРТ МАГНІЙТЕРМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА ТИТАНУ

Сучасний промисловий спосіб магнійтермічного отримання титану в реакторах періодичної дії забезпечує виробництво металу у вигляді так званої «титанової губки». Отримані зливки титану повинні відповідати високим вимогам міжнародних стандартів щодо чистоти, механічних властивостей і структурної однорідності.

Водночас магнійтермічний метод має низку суттєвих недоліків: періодичність процесу, забруднення титанової губки, значні енергетичні витрати на розігрів реактора перед кожним циклом відновлення, деформацію (короблення) реакторів і, як наслідок, скорочення строку їх експлуатації. Усе це зумовлює необхідність дослідження процесів руйнування реторт і розробки підходів до підвищення їх довговічності.

Процес магнійтермічного відновлення титану базується на реакції відновлення тетрахлориду титану магнієм при підвищених температурах у герметичних ретортах (реакторах) (рис. 1). Процес включає наступні стадії: підготовка та завантаження реагентів; відновлення $TiCl_4$ магнієм з утворенням титанової губки та $MgCl_2$; вакуумна сепарація для видалення залишків магнію і хлориду магнію; охолодження та вивантаження продукту.

Через циклічний характер роботи реактори піддаються багаторазовим тепловим навантаженням, що призводить до накопичення пошкоджень матеріалу корпусу реторти. У таких умовах мають місце наступні механізми руйнування. Багаторазові цикли нагріву – охолодження спричиняють виникнення термічних напружень, що призводить до утворення мікротріщин і їх поступового розвитку. За тривалої дії високих температур відбувається повзуча деформація, яка викликає короблення та зміну геометрії реторти. Контакт із магнієм та його сполуками спричиняє хімічну взаємодію з матеріалом корпусу, що знижує його міцність і сприяє розвитку дефектів. Останніми роками значно зріс інтерес до створення нових прогресивних матеріалів для виготовлення корпусів апаратів відновлення та сепарації. Підвищення строку служби реторт значною мірою залежить від жароміцності матеріалу; стійкості до повзучості; корозійної стійкості в середовищі магнію та його солей; коефіцієнта теплового розширення; термостійкості та опору термічній втомі.

Основними причинами руйнування реторт є: високі температури процесу (800...1000°C і вище); значні температурні градієнти; агресивне хімічне середовище (Mg , $MgCl_2$, $TiCl_4$); механічні навантаження під час нагріву й охолодження.

Перспективними є жароміцні сплави на основі нікелю, молібдену, а також спеціальні сталі з підвищеним вмістом легувальних елементів. Додатково застосовуються захисні покриття, що зменшують хімічну взаємодію з агресивним середовищем.

Моделювання є ефективним інструментом прогнозування ресурсу реторт та оптимізації їх конструкції.



Рисунок 1 – Реторти (реактори) магнійтермічного виробництва титану

Основні напрямки моделювання включають:

- розрахунок температурних полів у корпусі реторти дозволяє визначити зони максимальних температурних градієнтів і потенційного зародження тріщин;

– метод скінченних елементів використовується для аналізу напружено-деформованого стану конструкції з урахуванням температурних навантажень;

– розробка моделей довготривалої деформації дає змогу оцінити накопичення залишкових деформацій протягом циклів експлуатації;

– поєднання механічних і хімічних факторів у комплексних моделях дозволяє прогнозувати швидкість деградації матеріалу.

Комплексне використання цих підходів дає можливість не лише оцінити строк служби реторти, але й оптимізувати її геометрію, вибір матеріалу та режим експлуатації. Магнійтермічне виробництво титану є основним промисловим методом отримання титанової губки, проте воно супроводжується значними експлуатаційними навантаженнями на реторти. Руїнування реакторів обумовлене поєднанням термічної втоми, повзучості, корозійних процесів та структурної деградації матеріалу.

Підвищення довговічності реторт можливе за рахунок застосування нових жароміцних матеріалів, захисних покриттів та впровадження сучасних методів математичного моделювання процесів руїнування. Це дозволяє зменшити витрати на експлуатацію, підвищити енергоефективність виробництва та забезпечити стабільну якість титанової продукції.

УДК 621.793:669.14:620.193

Корнієнко В.В.¹, Євсєєва Н.О.², Беліков С.Б.³

¹ асп. каф. ІТЗ та МК НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

³ д-р. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

МОДИФІКАЦІЯ ХРОМИСТИХ КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПЛАКУЮЧОГО ШАРУ БІМЕТАЛІВ

Відомо, що важливим фактором, який визначає ефективність модифікатора, є його розчинність у модифікованому сплаві. Відповідно до умов гарної взаємної розчинності компонентів один в одному є: наявність в обох компонентах однакової кристалічної ґратки, мала різниця атомних радіусів і близькість розташування в таблиці Менделєєва. Тому особливо ефективним виявилось модифікування хромистих корозійностійких сталей у вигляді лігагур типу ФУМ5, які містять рідкоземельні (РЗМ) та лужноземельні (ЛЗМ) метали.

Показано, що збагачуючи межі зерен двофазної ферито-мартенситної сталі 04X18ч РЗМ ускладнює дифузію вуглецю та сприяють збільшенню феритної складової в ній з 82% до 90%.

Встановлено позитивний вплив рідкоземельних металів на термостійкість карбідів типу (Fe, Cr)₂₃C₆, що надало можливість проводити рекристалізаційне оброблення сталей 06X18ч, 08X18ч та 04X18ч в прохідній високопродуктивній печі при температурі 900...920°C. Після такого термічного оброблення структура сталі 04X18ч зберігала рівноважний стан ферит і карбіди. Підвищення температури рекристалізації або збільшення терміну витримки сприяло дисоціації частки карбідів і утворенню мартенситної складової, що призводить до різкого зниження пластичності з $\delta_5=40\%$ до $\delta_5=29\%$.

Сталі мартенситно-феритного класу 04X18ч, 06X18ч та 08X18ч після рекристалізаційного оброблення з підвищеної до 950°C температури мали низьку пластичність та були схильні до міжкристалітної корозії.

Висновок: модифікація вищеназваних сталей РЗМ надає можливості проводити операцію рекристалізацію у високопродуктивній прохідній печі та отримувати рівноважну структуру ферит та спеціальні карбіди типу (Fe, Cr)₂₃C₆, що забезпечує їй високу пластичність до міжкристалітної корозії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mishchenko V., Loskutov S., Kripak A. Determining the thermoplastic deformation mechanism of titanium reduction reactors and recommendations to increase the reactor service life. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. ISSN 1729-3774, 2022, 5/7 (119), pp. 14–20.

2. Mishchenko V. G. Influence of Metallurgical Processing on the Structure and Properties of Multicomponent Alloy Steel / V. G. Mishchenko, N. A. Evseeva // *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49. No. 5. pp. 357–360 (Scopus).

3. Mishchenko V. Steel corrosion resistance in the technological process / V. Mishchenko, N. Evseeva, S. Shejko, V. Shalomееv // *Materials Science and Technology Conference 2019 (MS and T 2019) : Proceedings*, Sept. 29 – Oct. 3, 2019. Portland, Oregon (Scopus).

4. Міщенко В. Г. Створення спеціального конструкційного матеріалу методом прокатування асиметричних пакетів для виробів подвійного призначення / В. Г. Міщенко, С. Б. Беліков, А. В. Клімов., А. О. Кріпак, Д. М. Тонконог, В. В. Корнієнко, А. О. Харченко // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2023. № 2. С. 32–38. DOI: 10.15588/1607-6885-2023-2-5.

5. Євсєєва Н. О. Особливості формування фазового складу та властивостей високолегованої сталі 03X17H3Г9МБДЮЧ / Н. О. Євсєєва, В. Г. Міщенко, С. Б. Беліков, В. В. Корнієнко, Д. В. Міщенко // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2024. № 3. С. 12–17. DOI: 10.15588/1607-6885-2024-3-2.

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ПАЛИВА ДЛЯ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК В УКРАЇНІ

Розвиток та використання альтернативних джерел палива в нашій державі є важливим і невід’ємним фактором забезпечення енергетичної безпеки України. Формування сучасної вітчизняної енергетичної стратегії передбачає використання альтернативних джерел палива в Україні з метою забезпечення та повноцінного його використання для потреб промисловості та населення.

Таким чином, необхідним є втілення у практичній площині державними урядовими структурами енергетичної стратегії щодо поступового переходу в майбутньому усіх галузей народного господарства та населення на використання альтернативних джерел палива в Україні.

В умовах дефіциту паливно-енергетичних ресурсів, важливим і об’єктивно-необхідним кроком є розвиток і використання альтернативних джерел палива, що є особливо актуальним у сучасних умовах. Отже, використання останніх для потреб промисловості та населення нашої держави є важливим і потребує на організаційно-економічному рівні вирішення низки питань, що уможливить їх використання в промисловості в майбутньому. На сучасному етапі основні питання щодо використання альтернативних видів палива отримали своє відображення у напрацюваннях ряду науковців [1–3], які у своїх працях розкрили основні аспекти розвитку альтернативної енергетики в Україні.

Як відомо, Україна є енергетично залежною державою. Імпорт постачання первинних видів енергії (не враховуючи атомні електростанції) становить до 72%. Значна частка енергоносіїв ще минулими роками імпортувалася. Важливою енергетичною стратегією України передбачено забезпечення технічної та економічної можливості диверсифікації постачання енергоресурсів. Пріоритетами енергетичної політики має бути енергоефективність використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) із урахуванням негативного впливу на довкілля. Так, згідно з прогнозним балансом до 2035 року частка відновлюваної енергетики зросте відносно до 2020 року у два рази, а з 2020 р. до 2035 р. – на 20%. Все це буде здійснено за рахунок зменшення споживання вугілля та природного газу (57% і 27%). В умовах існування об’єктивної загрози вичерпання корисних копалин, що використовуються як паливо для потреб населення, щораз більшої

актуальності набуває проблема пошуку альтернативних джерел для покриття енергетичних потреб. На сьогодні головним завданням національної енергетики є пошук і використання альтернативних видів палива, суть яких полягає в їхній екологічності та відновлюваності.

У зв'язку з цим виникає необхідність швидкого переходу і раціонального використання біоенергетичних ресурсів. Ці показники зростають у всьому світі, тому дуже важливо для України не залишатися осторонь від передових світових тенденцій у цьому напрямку, позаяк забезпеченість власним паливом є недостатня. Згідно з енергетичним балансом України частка ВДЕ складає 3,62%, у тому числі біомаса – 2,28% або 1,61 млн. тонн н.е. Біомаса є ваговою складовою ВДЕ згідно з національним планом дій і становитиме в 2026 році 85% усіх відновлюваних джерел енергії. З огляду на вирощування біоенергетичних культур в Україні, видно, що сільськогосподарські угіддя становлять 70,9%. На території України виділяють три аграрні зони: Полісся (шість областей), Лісостеп (десять областей) і гірські регіони. У 2015 році прийнято Закон України «Про електроенергетику». У ньому вказано, що до біомаси належать відходи і продукти невикопної біологічної речовини органічного походження, здатної до біологічного розкладу і утворенню різних видів енергії. На основі даних цього Закону розроблені пропозиції щодо спрощення процедури землевідведення для будівництва об'єктів виробництва теплоелектроенергії з використанням відновлюваних джерел енергії і біологічних видів палива.

Основними складовими біоенергетичного потенціалу є солома, відходи соняшника, ріпаку та інші. Біоенергетичні культури – це рослини які спеціально вирощуються для виробництва палива відповідно до рекомендації Міжнародних стандартів [3]. Їх ділять на декілька видів – однорічні та багаторічні трави, швидкоростучі дерева та деревоподібні рослини. Біоенергетичними культурами є тополя, верба, вільха, акація, міскантус та інші.

До енергетичних культур належать також сільськогосподарські культури, які використовують для виробництва біодизеля (ріпак, соняшник), біоетанолу (цукровий буряк, кукурудза) та біогазу (кукурудза).

Останніми роками спостерігається активний розвиток біоенергетичних культур. Проте існує низка проблем, які вимагають розв'язання. Урожайність біоенергетичних культур прямо залежить від кліматичних, ґрунтових та інших умов. Ці культури мають різну потребу у водному режимі, можуть відрізнятися за морозо- та сухостійкістю. Щодо проблем вирощування, то енергокультури відсутні у класифікаторі сільськогосподарських культур. Так енергетична верба залучена як технічна культура, а міскантус у цьому класі відсутній. Існують ще деякі юридичні проблеми на етапі вирощування цих біоенергетичних культур, а саме; вимоги інвесторів щодо сплати ПДВ, тоді

як продукції ще ніякої не вироблено. Існують проблеми продажу врожаїв верби і тополі, які збирають через кожні 3–4 роки. Отже, продаж товару в цьому випадку є досить тривалим. Встановлено, що спалювання тюків із стебел кукурудзи і соломи створює різний обсяг золи (9,2% і 2,6%), тобто викиди CO₂ вищі при спалюванні кукурудзи. Окрім того, на зольність впливає сезон збору врожаю та технологія збору. Біоенергетичні культури (кукурудза та інші) мають високу температуру плавлення золи і кращі від соломи. Показники якості біопалива повинні відповідати рекомендаціям виробників котельного обладнання. Технологічні операції збирання, транспортування і зберігання мають забезпечувати отримання біомаси заданої якості. Для цього необхідно проводити оперативний контроль щодо відповідності параметрів якості нормативним вимогам (визначати колір, запах, вологість, ураженість грибами, механічних домішок, розміри тюків тощо). Важливою характеристикою біомаси є зольність, визначати яку необхідно лабораторним методом.

Висновки та перспективи подальших розробок.

Таким чином, перехід вітчизняних підприємств та населення на споживання відновлюваних альтернативних видів палива є необхідним і перспективним напрямом в Україні, що сприятиме зменшенню вітчизняної імпортозалежності від імпортованих паливно-енергетичних ресурсів і сприятиме формуванню енергетичної незалежності та безпеки держави.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Калініченко А. В., Вакуленко Ю. В., Галич О. А. Еколого-економічні аспекти доцільності використання продукції рослинництва в альтернативній енергетиці // Актуальні проблеми економіки. 2014. № 11. С. 202–208.
2. Калетнік Г. Виробництво та споживання біопалив – перспектива енергетичної безпеки України // Голос України. 2011. № 193. С. 3.
3. Івашків І., Трухан Л. Перспективи розвитку альтернативних джерел палива в Україні // Економічний аналіз. 2019. Том 29. № 1. С. 178–182.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ ДАТЧИКІВ І РОБОТИ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Сучасний розвиток автомобільної техніки та систем керування двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) характеризується широким впровадженням електронних систем контролю та регулювання робочих процесів. Ефективність функціонування теплового двигуна значною мірою залежить від точності вимірювання параметрів його роботи та оперативності обробки інформації, що надходить від численних датчиків. Електричні сигнали датчиків відображають поточний стан основних параметрів двигуна, таких як тиск, температура, склад відпрацьованих газів, положення дросельної заслінки, витрата повітря тощо, і використовуються електронним блоком керування для оптимізації процесів згоряння палива, підвищення економічності та зменшення шкідливих викидів.

У зв'язку з ускладненням конструкції сучасних двигунів та зростанням кількості контрольованих параметрів особливого значення набуває використання методів математичного моделювання. Математичні моделі дозволяють описати взаємозв'язок між фізичними процесами, що відбуваються в двигуні та електричними сигналами датчиків, які фіксують зміни цих процесів. Це дає змогу аналізувати режими роботи двигуна, прогнозувати його поведінку за різних умов експлуатації та вдосконалювати алгоритми керування.

Математичне моделювання взаємозв'язку електричних сигналів датчиків і роботи теплового двигуна також сприяє підвищенню ефективності діагностики технічного стану ДВЗ. Завдяки моделюванню можна встановити залежності між відхиленнями параметрів сигналів і можливими несправностями елементів системи, що дозволяє своєчасно виявляти та усувати порушення у роботі двигуна.

Метою даної роботи є розробка та аналіз математичної моделі, яка описує взаємозв'язок електричних сигналів датчиків із основними параметрами роботи теплового двигуна, що дозволяє підвищити точність контролю та ефективність керування його робочими процесами.

Найбільш універсальною моделлю об'єкта діагностування є представлення його у вигляді «чорного ящика», вхідні та вихідні параметри якого мають кінцеву множину значень. Передбачається, що всі можливі стани об'єкта утворюють кінцеву множину станів. В даному випадку об'єкт є

«чорним ящиком» не тому, що його внутрішня структура і параметри повністю не відомі, а тому, що накладається заборона на доступ до них і стан об'єкта можна визначати, тільки досліджуючи його вихідні параметри (без розбирання).

Для представлення об'єкта діагностики у вигляді «чорного ящика» необхідно задати (рис. 1):

- кількість всіх вхідних дій Y від стимулюючих пристроїв і зовнішнього середовища;
- кількість всіх вихідних ознак несправності S ;
- кількість всіх несправностей об'єкта діагностування X ;
- оператор A , який перетворює кількості X та Y в кількість S :

$$S = A\{Y, X\}. \quad (1)$$

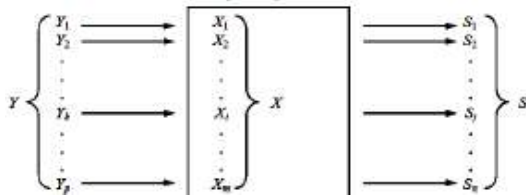


Рисунок 1 – Представлення об'єкта діагностування у вигляді «чорного ящика»

Враховуючи, що при діагностуванні елементи кількості Y стабілізуються (або змінюються по заданому закону), вираз (1) перетвориться у вигляді:

$$S = A\{X\}. \quad (2)$$

Іншими словами, будь-який вихідний параметр об'єкта діагностування є функцією його технічного стану при даному стані входів.

Якщо несправність об'єкта діагностування $\{X_i\}$ віднести до вихідних параметрів автоматизованої системи, то діагностична задача формулюється наступним чином: за відомими ознаками несправності $\{S_i\}$ визначити невідомі несправності об'єкта діагностування $\{X_i\}$.

Для успішного вирішення цього завдання необхідно знати вид оператора A , тобто необхідний вичерпний опис зв'язків між усіма вихідними параметрами і всіма можливими станами (несправностями) об'єкта.

При наявності аналітичної моделі об'єкта діагностування завдання постановки діагнозу в загальному вигляді формулюється таким чином: за даними ознаками несправності $S_1, S_2, \dots, S_n$, отриманих в результаті відповідних вимірювань, визначити технічний стан (несправності) об'єкта

діагностування $X_1, X_2, \dots, X_m$, якщо відомі функціональні залежності між кожним діагностичним сигналом і структурними параметрами.

Система рівнянь (3) є математичною моделлю об'єкта діагностування, що має m структурних параметрів і n діагностичних сигналів.

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 = \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ S_2 = \varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ \\ S_j = (x_1, x_2, \dots, x_m); \\ \\ S_n = (x_1, x_2, \dots, x_n). \end{array} \right. \quad (3)$$

Очевидною перевагою постановки діагнозу з використанням аналітичної моделі є можливість отримання конкретної несправності об'єкта діагностування, що дозволяє визначити технічний стан об'єкта не тільки в момент діагностування, але і, накопичуючи інформацію, отриману за кілька діагностичних обстежень об'єкта, аналізувати зміну структурних параметрів з метою прогнозування його технічного стану.

УДК 629.3.06

Кудін О.П.¹, Дударенко О.В.²

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ
АВТОМОБІЛЯ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ
ГАЗОБАЛОННОГО ОБЛАДНАННЯ**

Незважаючи на триваюче повномасштабне російське вторгнення, автомобільний ринок України продовжує поповнюватись колісними транспортними засобами, які переобладнані для використання газового палива як альтернативи до бензину та дизелю. Також поступово зростає частка транспортних засобів, що використовують гібридні та суто електричні силові установки. Так, станом на 01.01.2026 в Україні налічується 1070900 транспортних засобів, що використовують ГБО [1].

З них у 2023 році було переобладнано 37680 автомобілів, в 2024 р. – 21533 автомобілів, а 2025 року – 12592 автомобілів [1]. Слід зазначити, що ці цифри враховують лише ті транспортні засоби, власники яких внесли зміни до технічного паспорту автомобіля і зареєстрували відповідне переобладнання у Головному сервісному центрі МВС України. Втім, на

сьогодні не всі власники КТЗ оформлюють проведене переобладнання, вважаючи перепонами для цього високу вартість процедури сертифікації обладнання, невідповідність встановленого обладнання та проведеного монтажу діючим вимогам стандартів і правил, документальні особливості індивідуального характеру. Наприклад, є випадки, коли людина не оформила відповідним чином право на спадщину і використовує автомобіль маючи лише технічний паспорт, в який вона вписана на право керування, тому що вартість переоформлення і приведення документів у відповідність перевищує вартість автомобіля. Тим не менш, слід зазначити, що відповідно до чинного законодавства, реєстрація зміни конструкції транспортного засобу (його переобладнання) станом на 2026 рік є обов'язковою [2] і повинна бути виконана протягом 10 днів з моменту такого переобладнання.

Згідно зі статистичними даними за 2023 рік зареєстровано 129 випадків пожеж із транспортними засобами із встановленим ГБО, у 2024 році – 134 випадки, у 2025 році – 136 випадків [3]. Ці дані охоплюють лише ті випадки, коли безпосередньо співробітники ДСНС брали участь у ліквідації таких загорянь, включно із випадками, коли загоряння виникли через результати російської агресії та через протиправні дії третіх осіб. Також до статистики не потрапили дані, коли загоряння були ліквідовані власниками самостійно та не призвели до повного знищення транспортного засобу і власники транспортних засобів до ДСНС не звертались.

Питання безпеки газового обладнання актуальне не тільки для КТЗ, що експлуатуються в Україні, але і у всьому світі. Так, дослідниками з німецького університету ВАМ проводились експерименти в яких досліджувались питання пожежі на транспортному засобі із несправними пристроями безпеки газового обладнання [4]. Розглядався вплив заповнення газового баку на імовірність вибуху і дальність розльоту осколків. Отримані дані були спрямовані на вдосконалення роботи екстрених служб при ліквідації пожеж на автомобілях з ГБО.

Одним з основних чинників виникнення пожеж на автомобілі із ГБО є розгерметизація газової системи, яка в свою чергу може бути викликана механічними пошкодженнями газової магістралі, порушенням правил монтажу, відмовою елементів газової системи через несвоєчасне обслуговування, неправильне налаштування тощо. На сьогодні вимоги до безпеки і надійності транспортних засобів, що використовують зріджений нафтовий газ (пропан-бутанову суміш) регулюються Правилами ЄПЕК ООН № 67 [5].

Тим не менш, зараз системи газового обладнання автомобілів зазвичай не мають автоматичних систем виявлення витоку газу. Виняток становлять системи газового обладнання Prins VSI та Tamona (TE-GAS), в яких реалізовано алгоритм перевірки різниці тиску на ділянці магістралі між

газовим редуктором і газовими форсунками при роботі двигуна автомобіля на бензині і на газовому паливі. У випадку виявлення падіння тиску на початкових режимах роботи обладнання, система записує помилку до газового блоку управління, однак водій не буде проінформований про його наявність, а сама помилка може бути зчитана тільки в умовах сервісного центру з обслуговування ГБО. Між тим, основним методом виявлення газового витоку на автомобілі з ГБО для водія залишається органолептичний метод. На етапі виробництва до пропан-бутанової суміші додаються спеціальні одоранти, які мають специфічний різкий запах, а саме виявлення витоку буде залежати від психофізичних особливостей водіїв. Після світової пандемії вірусу COVID-19 існує велика кількість людей із притупленими відчуттями запахів, або є такі, що не відчують запаху взагалі. Для таких людей своєчасно виявити газовий витік і вжити необхідних заходів для його припинення буде фізично неможливо. Це, в свою чергу, також зумовлює необхідність розробки і впровадження автоматизованої системи, яка сповіщала б про негерметичність газового обладнання автомобіля.

Реалізація даної задачі можлива з застосування методів і підходів IoT (інтернету-речей), що широко застосовується в системах «розумного будинку», побутових і промислових детекторах витоку газів [6, 7]. При цьому алгоритм перевірки наявності витоку, специфікація датчиків і управляючого мікроконтролера буде відрізнятися від тих, які використовувались для систем «розумного будинку» через відмінність умов середовища, впливу конвекційного руху повітря від гарячих джерел, таких як випускний колектор та двигун автомобіля тощо.

При розробці системи методами ANSYS Fluent на базі рівнянь Нав'є-Стокса авторами було визначено і аргументовано розташування датчиків газу відповідно до можливих зон скупчення витоку при розгерметизації системи (підкапотний простір, багажне відділення автомобіля), розроблено механізм поєднання системи виявлення витоку із вже змонтованою системою ГБО. В подальшому буде описано алгоритм роботи системи, специфікація датчиків, розроблено код роботи системи для мікроконтролеру та проведено випробування в реальних дорожніх умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Відповідь на запит про публічну інформацію Головного сервісного центру МВС України № 31/25431-6553-2026 від 25.03.2026 (275922) Руслан Жук, перший заступник начальника. Київ, 2026. 1 арк.

2. Про затвердження Порядку державної реєстрації (перереєстрації), зняття з обліку автомобілів, автобусів, а також самохідних машин, сконструйованих на шасі автомобілів, мотоциклів усіх типів, марок і моделей, причепів, напівпричепів та мотоколясок : постанова Кабінету

Міністрів України від 07.09.1998 № 1388. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1388-98-п> (дата звернення: 30.03.2026).

3. Відповідь на запит про публічну інформацію ДСНС №16-6671/162-3 від 12.03.2026, Віктор Вітовецький, директор департаменту цивільного захисту та превентивної діяльності. Київ, 2026. 1 арк.

4. Tschirschwitz R., Krentel D., Kluge M. et al. Experimental investigation of consequences of LPG vehicle tank failure under fire conditions // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 56. P. 278–288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.09.006>.

5. Regulation No. 67 of the United Nations Economic Commission for Europe (UN ECE). Uniform provisions concerning the approval of specific equipment of motor vehicles using liquefied petroleum gases in their propulsion system : E/ECE/324/Rev.1/Add.66. URL: <https://unece.org/transport/vehicle-regulations-wp29/standards/addenda-1958-agreement-regulations-61-80> (дата звернення: 23.03.2026).

6. Dahab, K. A. T., Medina, A. N. E., Siena, M. A. U., Co, J. D. C., Centeno, C. J., & Tanael, D. V. (2022). Implementation of a Liquefied Petroleum Gas Leakage Detection System. ACM International Conference Proceeding Series, 263–269. <https://doi.org/10.1145/3582099.3582138>.

7. Kumar, R. R., Namachivayam, M., Deviprakash, M., Pradeep, V., Selvakumar, K., & Sharunithi, G. (2023). LPG Gas Level Monitoring and Leakage Detection System. International Conference on Self Sustainable Artificial Intelligence Systems, ICSSAS 2023 - Proceedings, 1463–1468. <https://doi.org/10.1109/ICSSAS57918.2023.10331805> on Catalyst Temperature of a SI Engine under Real Life Driving Conditions.

УДК 629.3.01

Кудін О.П.¹, Дударенко О.В.²

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГОРІННЯ ПАЛИВОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ БЕНЗИН/LPG У ДВОПАЛИВНОМУ ДВИГУНІ З БЕЗПОСЕРЕДНІМ УПОРСКУВАННЯМ

Актуальність вибраної тематики пов'язана із широким застосуванням обладнання для використання альтернативного палива (пропан-бутанової суміші) на автомобільному транспорті. Станом на 2026 рік в Україні налічується 1070900 колісних транспортних засобів, що переобладнані для роботи на скрапленому нафтовому газі і скрапленому природному газі [1].

Тим не менш, в галузі спостерігається певний спад. Так за 2023 рік в сервісних центрах МВС України було оформлено 37680 переобладнань, у 2024 р. – 21533 переобладнань, а у 2025 р. – було оформлено 12592 автомобіля із ГБО [1]. Слід зазначити, що ці дані не враховують автомобілі, власники яких не внесли відповідні зміни до технічного паспорту автомобіля згідно вимог чинного законодавства, яке зобов'язує зробити це в 10 денний термін [2]. Зменшення кількості переобладнань пов'язано в першу чергу з наслідками російської агресії, зменшенню кількості СТО, що виконують вказані роботи, введенням акцизу на газове паливо.

В автомобільній галузі останнє десятиліття спостерігається тенденція застосування двигунів із безпосереднім впорскуванням палива, що, зокрема, пов'язано із запровадженням більш жорстких екологічних норм [3]. Окремі виробники, як то Volkswagen мають модельну лінійку двопаливних двигунів (наприклад, двигун 1.4 TSI Ecofuel), які із заводу використовують бензин і скраплений природний газ. При цьому об'єм бензинового баку складає всього 10 л, а основним паливом виступає скраплений природний газ (СПГ) з об'ємом балонів 115 л (більше 30 кг метану). Втім широкого поширення здобули монопаливні двигуни із безпосереднім упорскуванням, які у різних виробників мають відповідне позначення GDI, TSI, TFSI, DI. Переобладнання таких автомобілів для роботи на скрапленому нафтовому газі в свою чергу являється більш складним завданням і вимагає від спеціалізованого СТО більш кваліфікованого персоналу і специфічного обладнання. Найкраще в роботі з двигунами із безпосереднім впорскуванням показали себе системи ГБО Prins VSI DI, STAG 400 DPI, STAG 500, Greengas Direct, Landi Renzo DI60, Optima.

Для досягнення оптимальних характеристик згоряння паливної суміші необхідно окрему увагу приділяти роботі системи запалювання, втім основні дослідження за даною тематикою [4–6] проводились для двигунів, що працюють на одному виді палива. Особливістю ж роботи основних систем ГБО для автомобілів із безпосереднім впорскуванням є робота на двох видах палива одночасно, тобто на суміші бензину і скрапленому нафтовому газі, що в свою чергу зумовлює окремі вимоги до роботи системи запалювання. В сучасній літературі бракує публікацій за даною тематикою. З метою виконання поставлених в дослідженні задач було проведено експериментальне дослідження залежності якості згоряння паливної суміші у всьому діапазоні режимів роботи двигуна автомобіля із системою ГБО STAG 400 DPI із різними типами свічок запалювання.

В результаті експерименту було встановлено, що на тестовому автомобілі при незмінних налаштуваннях газового обладнання, сталому значенні коефіцієнту $\lambda = 1,08$, найкращі вихідні результати було отримано із застосуванням двохелектродних свічок із іридієвим електродом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Відповідь на запит про публічну інформацію Головного сервісного центру МВС України № 31/2543І-6553-2026 від 25.03.2026 (275922) Руслан Жук, перший заступник начальника. Київ, 2026. 1 арк.
2. Про затвердження Порядку державної реєстрації (перереєстрації), зняття з обліку автомобілів, автобусів, а також самохідних машин, сконструйованих на шасі автомобілів, мотоциклів усіх типів, марок і моделей, причепів, напівпричепів та мотоколясок : постанова Кабінету Міністрів України від 07.09.1998 № 1388. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1388-98-п> (дата звернення: 30.03.2026).
3. Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. *Official Journal of the European Union*. 2007. L 171. P. 1–16. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32007R0715> (дата звернення: 01.04.2026).
4. Simsek S., Uslu S. Investigation of the impacts of gasoline, biogas and LPG fuels on engine performance and exhaust emissions in different throttle positions on SI engine. *Fuel*. 2020. Vol. 279. Article 118528. DOI: [10.1016/j.fuel.2020.118528](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118528).
5. Chen, L., Wei, H., Zhang, R., Pan, J., Zhou, L., & Feng, D. (2019). Effects of spark plug type and ignition energy on combustion performance in an optical SI engine fueled with methane. *Applied Thermal Engineering*, 148, 188–195. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2018.11.052](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.052).
6. Buyukkaya E., Cerit M. Investigating the effects of LPG on spark ignition engine combustion and performance. *Energy Conversion and Management*. 2005. Vol. 46, No. 13–14. P. 2317–2333. DOI: [10.1016/j.enconman.2004.07.006](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.07.006).

УДК 621.43:621.891:620.178

Татарчук Т.В.¹, Дударенко О.В.¹, Обертінська В.О.², Лемешко Д.Р.³

¹ доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Т-314 НУ «Запорізька політехніка»

³ студ. гр. Е-515 НУ «Запорізька політехніка»

ФІЗИКО-ТРИБОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОБОТИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) – головне джерело тяги в сучасному транспорті, але характеризується дуже низьким ККД. У типовому

легковому автомобілі лише близько 21% енергії палива переходить у корисну роботу руху, а 79% – у втрати (тепло, тертя, тощо) [1]. Значна частина цих втрат припадає на тертя між рухомими деталями: наприклад, тертя поршневого кільця про циліндр становить близько 20–30% механічних втрат [2], а деякі дослідження навіть оцінюють втрати на тертя до 40–70% від усіх силових втрат у силовому агрегаті. Таким чином, контроль тертя через оптимальне мащення і правильний вибір компонентів є критично важливим для підвищення ефективності та ресурсу ДВЗ.

Фізика тертя у ДВЗ

Тертя – це сила, що протидіє відносному руху двох контактуючих поверхонь. У найпростішому наближенні сила сухого тертя $F_{\text{тертя}}$ пропорційна нормальному навантаженню N через безрозмірний коефіцієнт тертя μ (тобто $F_{\text{тертя}} = \mu N$). Коефіцієнт тертя залежить від матеріалів поверхонь, їх шорсткості, навантаження і наявності мастила. Навіть при гарячому киплячому двигуні не всі поверхні контактують безпосередньо: мастило у системі розподіляється між ними і утворює тонкі плівки. Із збільшенням швидкості руху поверхні переходять від межового (граничного) до змішаного та гідродинамічного режиму мащення. За граничного мащення поверхні контактують через молекулярні або хімічні плівки адсорбованого мастила, і тертя тут переважно залежить від хімічних і адсорбційних процесів. У змішаному режимі частина поверхні розділена рідким мастилом, а частина – контактує сухо. При гідродинамічному мащенні швидке переміщення призводить до того, що поверхні розділяються повною мастильною плівкою, і тертя визначається виключно в'язким розшаруванням цього шару. У цьому випадку сили тертя практично визначає закон внутрішнього тертя рідини, і тертя значно зменшується. Згідно з класичними дослідженнями, гідродинамічне мащення забезпечує найменші втрати – адже поверхні розділені товстою плівкою мастила [3].

Пояснення механізму гідродинамічного змащення дає так звана крива Стрібека: з початку руху (низька швидкість або великий тиск) тертя високе, потім із ростом швидкості його величина спочатку зменшується (змішане мащення), а у високошвидкісному режимі виходить на мінімальне значення гідродинамічного мащення [8]. Тобто, за певного співвідношення швидкості і навантаження мастило створює плівку, товщина якої перевищує суму шорсткостей поверхонь в кілька разів, забезпечуючи м'яке ковзання по рідині і зводячи до мінімуму контакт «метал по металу» [3]. Важливо відзначити, що ключовим параметром для такого режиму є в'язкість мастила: чим вища в'язкість, тим стійкішою є плівка при заданих умовах. У граничних та змішаних режимах у роботу вступають адсорбційні та хімічні плівки (присадки) для захисту поверхонь від зносу.

Умовно можна виділити такі режими мащення:

Граничне (boundary) – поверхні практично контактують, відповідає низьким швидкостям/високим навантаженням. Захист надають тонкі шаруваті молекулярні/хімічні плівки присадок.

Змішане (mixed) – частина навантаження сприймається рідиною, частина – контактами поверхонь. Це перехідний режим (напр., під час розгону чи гальмування).

Гідродинамічне (fluid film) – повне розділення поверхонь рідиною, тертя майже виключно в'язке (шар мастила працює як тонке змащення). Такий режим переважає при сталому великому оберті, наприклад, у підшипниках колінчастого валу; для цього характерно мінімальне тертя і знос [3].

Для оцінки режиму змащення часто вводять безрозмірне відношення

$$\lambda = \frac{h}{\sigma_1 + \sigma_2},$$

де h – товщина масляної плівки, а $\sigma_{1,2}$ – середні шорсткості контактуючих поверхонь.

Якщо $\lambda > 3$, діє повне гідродинамічне змащення; при $\lambda < 1$ домінує змішаний або граничний режими. В реальному двигуні під дією високих температур і тисків λ часто зменшується, тому важливо підтримувати чистоту мастила, його відповідну в'язкість та належну систему охолодження.

В'язкість та характеристики мастильних оли

В'язкість – це міра внутрішнього тертя рідини (сила, що протидіє деформації при зсуві) [3]. У мастильних системах двигуна ДВЗ використовуються масла зі змінною в'язкістю, що зберігають достатню густину (товщину плівки) в широкому діапазоні температур. Класифікація моторних оли за SAE (наприклад, 5W-30, 10W-40) вказує, якою є динамічна в'язкість при низьких та високих температурах; наприклад, «5W» означає, що олива залишається текучою при -30°C , а число «30» відповідає високій температурі й в'язкості при 100°C . Важлива також в'язкісна індекс – здатність зберігати в'язкість при різких змінах температури. Низькотемпературні властивості (поріг застигання) та термічна стабільність – критичні фактори: мастило не повинно сильно розріджуватися або втрачати властивостей при високих температурах циліндра.

Моторні оли містять спеціальні присадки, що покращують їх властивості. Наприклад, антиокиснювачі уповільнюють руйнування оливи, а протизносні і антифрикційні (на основі сульфідів молібдену, фосфору, ZDDP тощо) утворюють захисні граничні плівки при суворих умовах. Однак

надлишок деяких присадок може впливати на сумісність з матеріалами двигуна (наприклад, фосфор знижує активність каталізатора у відпрацьованих газах). При виборі оливи важливо дотримуватися специфікацій виробника двигуна і норм міжнародних стандартів (API, ACEA, SAE).

Фізико-хімічні властивості палива (бензину)

Бензин – це суміш вуглеводнів (переважно вуглець C4–C12), одержувана з нафти фракційними перегонками та каталітичним крекінгом. Він являє собою легку рідину: питома вага бензину становить приблизно 0,700–0,780 кг/л [6]. Бензин легко випаровується і утворює вибухонебезпечні суміші з повітрям у широкому діапазоні концентрацій; температура спалаху у звичайних марок зазвичай нижче 0°C [6]. Типовим є діапазон кипіння ~40...200°C – це забезпечує необхідну леткість для ефективного змішування з повітрям в карбюраторі чи форсунках. Бензини в основному містять парафіни,олефіни, нафтени й ароматичні вуглеводні; наприклад, у класичному «азотованому» бензині 20–50% становлять парафіни, 30–60% – розгалужені ізопарафіни, 5–15% – ароматичні сполуки і решта – нафтени і олефіни. Етанол часто додають до бензину (наприклад, до 5–10%) для поліпшення октанового числа та зменшення шкідливих викидів.

У технічних характеристиках бензину ключовим параметром є октанове число (ОЧ) – міра стійкості палива до автозапалення при стисненні. Чим вище октанове число, тим паливо стабільніше і менше схильне до детонації («стуку») при високих тисках у циліндрі [4]. Наприклад, в Україні поширений бензин «А-95» (RON $\approx$ 95) дозволяє використовувати підвищені коефіцієнти стиснення в двигунах. Якщо октанове число недостатнє, в двигуні виникає небажане samozapalювання до того, як свічка запалювання ініціює процес, що призводить до перевантаження та зношування деталей.

Важливою фізичною характеристикою є теплота згоряння бензину – кількість енергії, що виділяється при повному згорянні одиниці палива. Нижча теплота згоряння бензину становить приблизно 44–46 МДж/кг [5]. Оскільки середня густина бензину близько 0,75 кг/л, це відповідає енергії ~33 МДж/л. При згорянні в оптимальних умовах (задовільна подача палива та кисню, правильна іскра) вивільняється максимальна тепловіддача. Збитки від неповного згоряння (CO, незгорілі вуглеводні, нагар) означають втрати енергії та підвищені викиди забруднювачів. Для нормальної роботи бензинових двигунів підтримують стехіометричне співвідношення кисню й палива ($\approx$ 14,7:1 за масою), а додавання кисневмісних компонентів (наприклад, тієї ж етанолу) зменшує вміст CO і HC, але може збільшити тепловіддачу та впливати на змащення.

Таким чином, паливо є ще однією важливою змінною трибологічної системи: його властивості визначають робочі температури, тиск в циліндрі та

характеристики горіння. З одного боку, висока теплота згоряння і стабільність до детонації сприяють потужності; з іншого – хімічний склад і домішки впливають на агресивність середовища, окислюваність і довговічність компонентів двигуна.

Висновки

Фізичні властивості та трибологічні характеристики компонентів двигуна внутрішнього згоряння взаємопов'язані. Тертя між металевими деталями приводить до значних енергетичних втрат (до третини енергії палива у легковому автомобілі [1]) і зносу. Використання ефективної системи мащення з правильно підбраною в'язкістю оливи та сучасними присадками дозволяє відтворити умови гідродинамічного мащення і мінімізувати сухе контактування поверхонь (мінімізуючи граничне тертя) [3]. Надзвичайно важливо, щоб мастило витримувало високі температури та не втрачало в'язкість, а також було сумісним з матеріалами двигуна й екологічними стандартами.

Паралельно фізичні властивості палива, зокрема октанове число та теплота згоряння, визначають ефективність термодинамічного циклу двигуна. Високоякісні бензини з високим октановим числом дозволяють збільшити коефіцієнт стиснення та отримати більше роботи з одиниці палива без ризику детонації. Однак робоча суміш та продукти згоряння впливають на мастильні властивості (наприклад, розріджування оливи паливом чи утворення шламу) і тому можуть непрямо збільшувати тертя і знос, як показують дослідження [1, 2].

Таким чином, підвищення ефективності ДВЗ досягається комплексно: покращенням трибологічних властивостей деталей та мастила, а також використанням палива з оптимальними фізико-хімічними характеристиками. Сучасна наука про тертя і змащення (трибологія) та технології синтетичних мастил і палива спрямовані на зменшення втрат на тертя і підвищення енерговіддачі двигунів, що має як економічне, так і екологічне значення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Holmberg K., Erdemir A. The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally. *Friction*. 2019. Vol. 7, № 3. P. 400–432.
2. Skonieczna D., Vrublevskiy O., Janulin M., Szczygłak P. Analysis of tribological properties of engine lubricants used in hybrid vehicles. *Materials*. 2024. Vol. 17, № 21. Art. 5304.
3. Ateshian G. A. Fluid film lubrication. *Journal of Biomechanics*. 2009. Vol. 42, № 1. P. 1–22.
4. Gasoline explained: Octane in depth. U.S. Energy Information Administration (EIA). URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/gasoline/octane-in-depth.php> (дата звернення: 10.03.2026).

5. Calorific value of natural gas (MJ/m³ and BTU/SCF). MET Group. 23 Feb 2021. URL: <https://met.com/en/media/energy-insight/calorific-value-of-natural-gas/> (дата звернення: 10.03.2026).

6. Бензин. Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Бензин> (дата звернення: 10.03.2026).

7. Fluid film lubrication – overview. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fluid-film-lubrication> (дата звернення: 10.03.2026).

8. Tribology: main concepts about lubrication. URL: <https://vciandlubricants.com/about-lubrication-tribology.html> (дата звернення: 10.03.2026).

9. The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally. OSTI. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1559285> (дата звернення: 10.03.2026).

УДК 629.331:621.43.06

Дужик І.Г.¹, Артюх О.М.²

¹ студ. гр. Т-212 НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

СУЧАСНІ АСПЕКТИ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОМОБІЛЬНИХ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК: ВИКЛИКИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ

Сьогодні ми бачимо, як автомобільний світ стрімко змінюється. Якщо ще десять років тому гібридний автомобіль здавався чимось екзотичним на дорогах України, то сьогодні це реальність, з якою щодня працюють водії, механіки та інженери. Проте процес переходу від звичайних двигунів до гібридних систем не є простим «копіюванням» західних технологій. Він ставить перед нашою транспортною галуззю низку серйозних викликів, які стосуються як етапу проєктування, так і щоденної експлуатації.

Головна складність проєктування гібридів полягає в тому, що це не просто «машина з двома двигунами». Це надскладна система, де електромотор і двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) мають працювати як один злагоджений організм. Основна проблема, яку ми, молоді науковці, досліджуємо – це ефективне управління енергією. Як зробити так, щоб батарея заряджалася саме тоді, коли це вигідно, і щоб машина не втрачала динаміку в складних міських умовах? В умовах великих міст України, де затори є звичною справою, гібриди мають величезний потенціал. Саме тут проявляється їхня головна перевага – рекуперация енергії під час

гальмування. Ми розглядаємо цей процес як можливість перетворити «марне» гальмування на корисну електрику для наступного старту.

Однак експлуатація в Україні додає свої «нюанси». Перший виклик – це стан доріг. Високотехнологічні компоненти, такі як інвертори та літій-іонні батареї, дуже чутливі до вібрацій. Наші дослідження показують, що постійне трясіння на нерівному асфальті може призводити до мікротріщин у платах керування та передчасного зносу кріплень акумуляторного блоку. Це означає, що при проектуванні гібридів для нашого ринку потрібно закладати більший запас міцності та кращу віброізоляцію.

Ще один важливий аспект – сервісна база. Гібридний автомобіль потребує специфічного обслуговування. Викладачі нашої кафедри часто наголошують, що сучасний фахівець має розумітися і на термодинаміці ДВЗ, і на високовольтній електриці. Брак кваліфікованих кадрів та спеціалізованого діагностичного обладнання в регіонах робить експлуатацію гібридів дорожчою та складнішою. Це виклик для освіти: нам потрібно вчитися працювати з «розумними» системами вже зараз.

Екологічність також залишається топ-темою. Ми розуміємо, що гібриди – це місток до повної електрифікації. Але вони вже сьогодні дозволяють дихати легше у містах, бо при русі в тягучках ДВЗ може взагалі не вмикатися. Це суттєво зменшує концентрацію шкідливих газів на рівні дихання пішоходів.

У підсумку, розвиток гібридних технологій в Україні – це не лише про купівлю нових машин. Це про створення власної школи проектування, яка враховує наші реалії: холодні зими (що впливають на ємність батарей), специфіку доріг та потреби в економії. Для нас, студентів, це величезне поле для творчості та наукових пошуків. Ми маємо навчитися не просто користуватися чужим, а створювати рішення, які зроблять український транспорт ефективнішим і чистішим.

УДК 629.423.3:621.432

Железняк Є.О.¹, Артюх О.М.²

¹ студ. гр. Т-212 НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

РОЗВИТОК ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В УКРАЇНІ: ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИКЛИКИ ТА СТРАТЕГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Україна поступово стає частиною глобального екологічного руху, і розвиток гібридного транспорту є одним із найяскравіших доказів цього.

Проте шлях від теорії до масового використання гібридів на наших дорогах супроводжується багатьма технологічними викликами. Як майбутні інженери, ми намагаємося розібратися: що заважає гібридам стати «номером один» в Україні і як ми можемо покращити їхню роботу вже сьогодні.

Перший серйозний виклик – технологічний. Більшість гібридів, що їздять нашими дорогами, були спроектовані для м'якого клімату та ідеальних доріг Європи чи США. В українських реаліях ми стикаємося з проблемою швидкої деградації батарей через суворі зими. Холод значно знижує ефективність хімічних процесів в акумуляторах, що змушує ДВЗ працювати частіше для обігріву салону та підзарядки. Стратегією оптимізації тут може стати розробка додаткових систем терморегуляції для батарейних відсіків, адаптованих саме під наш клімат.

Інша проблема – оптимізація експлуатаційних характеристик у змішаних режимах руху. Для України характерні як переважані міські вулиці, так і швидкісні траси (де вони є). На трасі гібрид часто втрачає свою перевагу в економії палива, бо працює переважно бензиновий двигун, а важка батарея стає лише додатковим баластом. Наша наукова група вважає, що виходом може бути інтелектуальне планування маршруту через GPS-навігацію, яка б заздалегідь підказувала системі управління автомобілем, де краще приберегти заряд батареї (наприклад, перед в'їздом у місто), а де – використати всю потужність обох двигунів.

Ми також бачимо проблему в «технологічному консерватизмі» багатьох перевізників. Багато хто боїться купувати гібриди через міфи про їхню ненадійність чи складність ремонту. Насправді ж, сучасні гібридні установки часто мають довший ресурс, ніж звичайні авто, бо ДВЗ працює в набагато легших режимах. Оптимізація експлуатації тут полягає в грамотному моніторингу стану системи. Ми пропонуємо ширше впроваджувати телематичні системи, які б у реальному часі передавали дані про стан кожної комірки батареї та ефективність рекуперації.

Не можна забувати і про економічний аспект. Гібрид дорожчий при купівлі, тому він має «відбивати» свою ціну за рахунок меншої витрати палива та рідшого обслуговування гальмівних колодок (завдяки гальмуванню двигуном). Наша задача як дослідників – розрахувати ці терміни окупності для конкретних українських умов, щоб надати реальні цифри бізнесу та державі.

На завершення, розвиток гібридного транспорту в Україні – це складна задача. Нам потрібно не просто купувати іноземні технології, а адаптувати їх, створювати свої методики діагностики та навчання. Технологічні виклики великі, але вони дають нам шанс побудувати якісно нову транспортну систему. Ми віримо, що поєднання сучасного програмного забезпечення та надійної інженерної бази дозволить зробити гібриди по-справжньому

«народними» автомобілями в Україні, що буде корисно і для гаманця водія, і для екології нашої країни.

УДК 629.114.2:004.896

Петрюк Ю.І.¹, Артюх О.М.²

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ ЯК ОСНОВА ЇХНЬОЇ РОБОТИЗАЦІЇ В УМОВАХ ЗМІННИХ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТІВ

Сучасне сільськогосподарське машинобудування України перебуває на етапі глобальної цифровізації, де традиційні методи підвищення продуктивності за рахунок нарощування потужності двигунів вичерпали свій потенціал. Сьогодні ключовим вектором розвитку галузі стає інтелектуалізація та роботизація машинно-тракторних агрегатів (МТА). Проте, широке впровадження роботизованих систем в українському агросекторі гальмується низкою технічних і технологічних викликів, серед яких найважливішим є висока динамічність умов експлуатації. На відміну від промислових роботів, що працюють у стабільному середовищі, сільськогосподарський робот стикається із постійною зміною фізико-механічних властивостей ґрунтів, що вимагає розробки принципово нових алгоритмів адаптивного керування.

Галузь вітчизняного машинобудування при створенні інтелектуальних МТА стикається з проблемою нестабільності тягово-зчіпних характеристик. Специфіка українських чорноземів полягає у суттєвій зміні опору обробітку навіть у межах одного поля через коливання вологості, щільності та складу ґрунту. Класичні системи управління, що базуються на жорстко заданих параметрах, не здатні оперативно реагувати на ці зміни, що призводить до значного буксування, перевитрати палива (до 20–30%) та передчасного зносу трансмісії. Крім того, існує технологічний розрив між механічною частиною існуючих тракторів та сучасними електронними системами управління, що робить задачу роботизації неможливою без створення перехідних інтелектуальних інтерфейсів.

В основі нашого дослідження лежить розробка алгоритмів адаптивного керування, які дозволяють МТА самостійно коригувати швидкісний режим та зусилля на робочих органах у реальному часі. Ключовим моментом є перехід від статичного регулювання до динамічного прогнозування стану системи

«машина-грунт». Запропонований підхід базується на використанні даних від датчиків крутного моменту та буксування, які інтегруються в єдиний контур управління в середовищі MATLAB/Simulink. Це дозволяє системі ідентифікувати тип ґрунту «на ходу» та миттєво змінювати стратегію управління двигуном і трансмісією для підтримання оптимального ККД агрегату.

Роботизація МТА в таких умовах розглядається не просто як заміна водія автоматикою, а як засіб мінімізації негативного техногенного впливу на ґрунт. Адаптивне управління дозволяє уникати надмірного ущільнення родючого шару, що є критично важливим для сталого землеробства. Водночас, машинобудівна галузь отримує запит на створення нових модульних платформ, які будуть готові до інтеграції таких «розумних» алгоритмів. Це створює передумови для модернізації існуючого парку техніки (наприклад, тракторів серії ХТЗ) шляхом їх дообладнання системами автоматизованого контролю.

Перспективні результати моделювання показують, що впровадження адаптивних алгоритмів дозволяє стабілізувати тягове зусилля та знизити питому витрату палива в середньому на 15%. Практична значущість роботи полягає у формуванні методичної бази для вітчизняних конструкторських бюро, що займаються розробкою систем точного землеробства. Розроблені алгоритми можуть бути використані як програмна основа для блоків управління роботизованих МТА нового покоління.

Таким чином, розв'язання задачі адаптивного керування в умовах змінних властивостей ґрунтів є фундаментальним кроком до створення автономних аграрних комплексів. Це не лише підвищує економічну ефективність використання техніки, а й закладає підґрунтя для інноваційного стрибка українського машинобудування, трансформуючи його з виробника «заліза» у розробника високотехнологічних інтелектуальних систем.

УДК 629.013.001

Абажей Є.П.

асп. НУ «Запорізька політехніка»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОХІДНОСТІ КОЛІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ: ВІД МЕХАНІЧНИХ БЛОКУВАНЬ ДО ЕЛЕКТРИЧНОЇ ВЕКТОРИЗАЦІЇ КРУТНОГО МОМЕНТУ

Підвищення прохідності колісних транспортних засобів (КТЗ) при русі по ґрунтах, які деформуються, та бездоріжжю залишається актуальною

інженерною задачею. Традиційно для її вирішення застосовуються механічні пристрої блокування диференціала, які забезпечують примусовий перерозподіл крутного моменту між ведучими колесами. Однак поширення гібридних силових установок (ГСУ) з незалежним електроприводом ведучих коліс відкриває принципово нові можливості, зокрема технологію Torque Vectoring (TV) яка дозволяє здійснювати безперервний та незалежний розподіл потоку потужності між колесами [1, 2].

Аналіз взаємодії рушія з опорною поверхнею в тяговому режимі кочення показує, що ефективність реалізації тягового зусилля визначається коефіцієнтом ковзання колеса. Для опорних поверхонь, що деформуються (грунт, сніг, зволожена дернина), оптимальне ковзання за тяговими властивостями знаходиться в межах 0,15...0,45, після чого тягова сила різко знижується. Механічне блокування диференціалів, примушуючи всі колеса обертатися з однаковою кутовою швидкістю, не дозволяє підтримувати оптимальне ковзання незалежно для кожного колеса і може призводити до надмірного буксування та погіршення тягових властивостей КТЗ.

Технологія Torque Vectoring на базі ГСУ принципово змінює підхід до забезпечення прохідності КТЗ. Електродвигуни здатні формувати крутний момент з часом реакції менше 20 мс, що є на порядок швидшим за механічні актуатори. Це дозволяє реалізувати адаптивні алгоритми, які в реальному часі відслідковують режими кочення кожного колеса, та оптимізувати розподіл потоків потужності за критерієм максимальної тяги. Цільова функція керування сформулюється як мінімізація відхилення фактичного ковзання від оптимального:

$$J = \sum[(\delta_i - \delta_{opt})^2 + \alpha(\Delta M_i)^2], \quad (1)$$

де δ_i – поточне ковзання i -го колеса; δ_{opt} – оптимальне ковзання; ΔM_i – відхилення моменту від базового значення; α – вагова стала регулятора.

Проведений аналіз свідчить, що застосування Torque Vectoring на базі ГСУ є більш ефективним рішенням поліпшення тягових властивостей КТЗ порівняно з механічним блокуванням диференціалів в умовах екстремальних навантажень.

У таблиці 1 наведено порівняльні характеристики розглянутих методів підвищення прохідності за ключовими критеріями.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз методів підвищення прохідності колісних транспортних засобів

Критерій	Механічне блокування	Torque Vectoring (TV)
Час реакції	~200 – 500 мс	< 20 мс
Розподіл моменту	Дискретний (0/100%)	Безперервний (0 – 100%)
Вплив на стійкість	Погіршення	Покращення
Ефективність на слабкому ґрунті	Висока при симетричному буксуванні	Висока з адаптацією
Складність	Низька	Висока
Адаптивність	Відсутня	Програмована

TV забезпечує безперервний та адаптивний контроль тяги, підвищує курсову стійкість і знижує руйнівний вплив на ґрунт. Подальший розвиток досліджень передбачає математичне моделювання динаміки КТЗ із ГСУ та верифікацію алгоритмів TV на фізичному стенді.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Vanlalhriatpuia F. та ін. A comprehensive review on intelligent torque vectoring control for electric vehicle // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – 2025. DOI: 10.1177/01445987251328181.

2. Крайник Л.В., Кіхтан А.В., Габрієль Ю., Ужва А. Методичні засади визначення базових параметрів гібридного приводу автомобіля високої прохідності [Електронний ресурс] // OUCI – 2022. URL: <http://semanticscholar.org/paper/Методичні-засади-визначення-базових-параметрів-Крайник-Кіхтан/373f1f9594358fa3a83a8a36e0ae192cf82e16b8>.

УДК 539.4.015:539.43

Пужаєнко Н.В.¹, Беженов С.О.²

¹ студ. гр. БАДз-213 НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ВПЛИВ ФОРМИ ТЕРМІЧНО МАСИВНИХ ВИРОБІВ З ХРОМОНІКЕЛЕВИХ СТАЛЕЙ НА ПАРАМЕТРИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ЇХ НАГРІВАННЯ ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ

Хромонікелеві сталі, маючи у своєму складі від 15 до 22% хрому, є корозійностійкими, жаростійкими та жароміцними. Наявність в них нікелю в

кількості від 8 до 12% сприяє одержанню аустенітної структури, що характеризується високою технологічністю при операціях гарячого та холодного деформування. У загартованому стані хромонікелеві сталі мають низьке відношення границі плинності до границі міцності. Однак рівномірність фізичних властивостей у значній мірі залежить від рівномірності температурного поля, що утворюється в процесі нагрівання виробу до заданих температур. Гострою стає така проблема, якщо нагріваються термічно масивні тіла з достатньо великим внутрішнім термічним опором ($Bi > 0,5$).

Метою дослідження є аналіз впливу форми виробів з хромонікелевих сталей на параметри ефективності нагрівання термічно масивних виробів з урахуванням кінцевої нерівномірності температурного поля уздовж перерізу виробів, а також енерговитрат і витрат часу на здійснення технологічної операції нагрівання.

Досліджували процес нагрівання виробів циліндричної та пластинчастої форми хромонікелевих сталей від початкової температури $t_0 = 20^\circ\text{C}$ до температури гартування сталей такого класу ($t_{x/L=1} = 1100^\circ\text{C}$) з різними режимами теплообміну. Розглядали процес перенесення теплоти теплопровідністю від поверхні виробу необмеженої довжини до його центру за незмінних умов зовнішнього теплообміну, що є нестационарною однорідною задачею з граничними умовами III-го роду.

Варіювали інтенсивність процесу підведення теплової енергії до поверхні виробів, що характеризується значенням сумарного коефіцієнта тепловіддачі α_Σ , та величину температурного напору на поверхню виробу, що характеризується значенням безрозмірного температурного критерію $\Theta_{|x/L=1} = (t_h - t_{|x/L=1}) / (t_h - t_0)$, де t_h – температура зовнішнього теплоносія.

Ефективність процесу симетричного нагрівання оцінювали за такими параметрами: нерівномірність розподілу температур уздовж перерізу виробів $\Delta t = t_{|x/L=1} - t_{|x/L=0}$, $^\circ\text{C}$; тривалість процесу нагрівання τ , с; сумарна кількість теплової енергії, яку затрачено на нагрівання одиниці площі поверхні виробу до заданої температури, Q , $\text{Гкал}/\text{м}^2$.

Результати дослідження представлено на рисунку 1 у вигляді залежностей параметрів ефективності від відносного температурного напору для різних способів нагрівання, а також для різних значень коефіцієнта тепловіддачі α_Σ , який змінювали від $\alpha_{\Sigma(\min)} = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $\alpha_{\Sigma(\max)} = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, що відповідало діапазону значень критерію Біо від 0,562 до 0,749.

Найбільш істотний вплив на всі параметри ефективності процесу нагрівання хромонікелевих сталей до температур гартування має величина відносного температурного напору, при збільшенні якого в межах від 0,5% до 4,5% нерівномірність температур уздовж перерізу виробів зростає майже на порядок. Час процесу нагрівання та споживання теплової енергії

зменшуються приблизно однаково на 30% як для виробів циліндричної форми, так і у формі пластин.

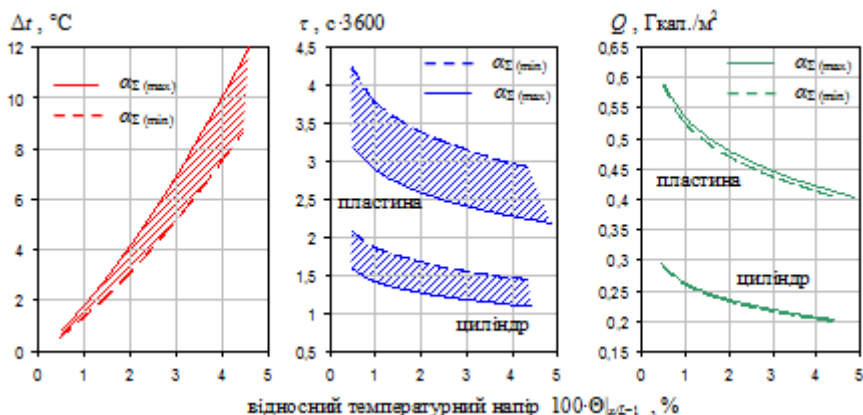


Рисунок 1 – Залежності ефективних параметрів процесу нагрівання виробів різних форм з хромонікелевих сталей від відносного температурного напору

Проте циліндричні вироби потребують майже вдвічі меншої кількості теплової енергії та часу для нагрівання. Збільшення коефіцієнта тепловіддачі майже не впливає на кількість спожитої теплової енергії (близько 0,1% для пластин і 1,5% для циліндрів), проте дуже суттєво скорочує як для пластин, так і для циліндрів (близько 25%) час процесу нагрівання з відносно незначним збільшенням нерівномірності поля температур.

УДК 621.43

Рябошапка Н.Є.¹, Вайновський О.С.²

¹ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Т-213 НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ ПАЛИВНИМИ ФОРСУНКАМИ В СИСТЕМАХ ПРЯМОГО ВПОРСКУВАННЯ ПІД ЧАС ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДВИГУНА З УРАХУВАННЯМ ТИСКУ ВПОРСКУВАННЯ, ТЕМПЕРАТУРИ ЗАРЯДУ ТА КОРЕКЦІЙ ЕБУ

Системи бензинового прямого впорскування (GDI) є базовим компонентом сучасних ДВЗ, забезпечуючи підвищену економічність, зниження токсичності та оптимізацію процесу згоряння. Управління

форсунками високого тиску є одним із найбільш складних завдань електронного блоку управління двигуном, особливо у перехідних режимах, коли навантаження та параметри робочого процесу змінюються дуже швидко.



Рисунок 1 – Принцип дії прямого впорскування GDI

Форсунки прямого впорскування працюють під тиском від 200 до 350 бар, а в найсучасніших системах – до 500 бар (рис. 1). Вони відкриваються за дуже короткий час і дозволяють виконувати багаторазове впорскування за один цикл роботи циліндра. Через електромагнітні або п'єзоелектричні елементи забезпечується точне дозування палива та формування факела розпилу. Процес керування здійснюють спеціальні драйвери в складі ЕБУ, які забезпечують високий стартовий струм для відкриття, та стабілізований утримувальний струм.

Управління форсунками базується на декількох основних картах (maps), що визначають тривалість відкриття, фазування впорскування, цільовий тиск у паливній рейці та корекційні коефіцієнти. Електронний блок керування обробляє дані датчиків у реальному часі й на їх основі визначає оптимальні параметри роботи форсунок. Усі карти взаємопов'язані та формують комплексну логіку керування паливopoдачею (рис. 2).

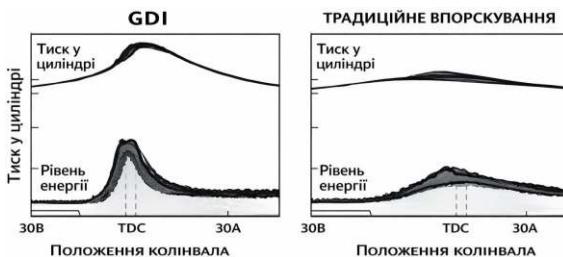


Рисунок 2 – Різниця між традиційним впорскуванням та системою GDI

До перехідних режимів належать різке відкриття або закриття дросельної заслінки, зміна частоти обертання колінчастого валу, стрибки навантаження, зміни тиску наддуву та умови холодного запуску. У ці моменти ЕБУ повинен забезпечити стабільне утворення паливоповітряної суміші та запобігти коливанням обертів, провалам тяги або детонаційним явищам.

Параметри, що визначають алгоритми керування:

- тиск упорскування (Електронний блок управління постійно коригує тиск у паливній рейці залежно від навантаження, температури палива, режиму роботи насоса високого тиску та необхідності багаторазового впорскування. Вищий тиск дозволяє зменшити тривалість імпульсу при тій самій масі палива, що є критично важливим під час швидких змін навантаження);

- температура заряду (Температура повітря та палива впливає на густину заряду, швидкість випаровування крапель і можливість виникнення детонації. За низьких температур система вимагає тривалішого імпульсу впорскування та раннього впорскування для забезпечення повноцінного утворення суміші. За високих температур необхідно коригувати фазування, щоб уникнути передчасного займання або детонаційних явищ).

ЕБУ застосовує короткострокові та довгострокові корекції подачі палива, корекції на основі датчика детонації, температурні корекції та спеціальні алгоритми збагачення у перехідних режимах. Їх сукупність дає можливість адаптувати подачу палива до поточного стану двигуна.

Під час змін навантаження ЕБУ застосовує поділ упорскування на попереднє, основне та післявпорскування. Це дозволяє стабілізувати тиск у рейці, покращити підготовку суміші, зменшити ймовірність детонації та знизити емісії незгорілих вуглеводнів. Багаторазове впорскування є одним з ключових інструментів оптимізації процесу згоряння в GDI двигунах.

Маса палива, що подається за цикл, залежить від тривалості імпульсу відкриття форсунки, тиску в рейці, температури палива та сумарних корекційних коефіцієнтів. У перехідних режимах ЕБУ перераховує ці значення у реальному часі, щоб забезпечити стабільність складу паливоповітряної суміші.

Під час різкого натискання на педаль акселератора відбувається збільшення навантаження та зміна тиску у впускному тракті. Система може відчувати короточасний дефіцит палива, пов'язаний з інерцією насоса високого тиску. ЕБУ компенсує це збільшенням імпульсу форсунок, підняттям цільового тиску рейки, корекцією фаз упорскування та додатковим збагаченням для уникнення провалів тяги.

При швидкому закритті дроселя повітряний потік різко зменшується, збільшується розрідження в колекторі, а наддув падає. ЕБУ скорочує подачу

палива, може повністю відключати впорскування під час гальмування двигуном і знижує цільовий тиск у рейці для економії енергії насоса. Додаткові корекції застосовуються для контролю токсичності вихлопних газів.

За підвищених температур заряду збільшується ризик передчасного займання та детонації, тому ЕБУ зміщує запалювання, коригує фазу впорскування та може використовувати додаткові цикли впорскування для охолодження суміші. За низьких температур, навпаки, система збільшує тривалість імпульсу, виконує раннє впорскування для покращення випаровування та стабілізації згоряння, а також підвищує тиск упорскування.

Алгоритми управління форсунками в системах GDI є критичним елементом електронної системи керування двигуном. Перехідні режими потребують найвищої точності розрахунків, оскільки саме в них виникають ризики нестабільної роботи, провалів, детонації та погіршення екологічних характеристик. Сучасні ЕБУ використовують багаторівневі карти, температурні та навантажувальні корекції, багаторазове впорскування та адаптивні алгоритми для забезпечення максимального ефективного, стабільного та безпечного горіння паливоповітряної суміші в усіх режимах роботи двигуна.

УДК 621.43:004.8:534.83

Слинько Г.І.¹, Тхор Є.А.²

¹ д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

² асп. НУ «Запорізька політехніка»

СУЧАСНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТВАННЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АКУСТИЧНИХ СИСТЕМ

У сучасному автотранспорті підвищення надійності та ефективності експлуатації двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) безпосередньо пов'язане із впровадженням сучасних методів технічної діагностики. Традиційні підходи, що базуються на вимірюванні параметрів робочого процесу, таких як тиск у циліндрі, температура або склад відпрацьованих газів, потребують складного обладнання та часто є інвазивними. У зв'язку з цим актуальним напрямком є розвиток акустичних методів діагностики, які дозволяють здійснювати оцінку технічного стану двигуна без втручання у його конструкцію.

Акустичний сигнал, що генерується під час роботи ДВЗ, є складною суперпозицією механічних, газодинамічних та ударних процесів. Він містить інформацію про режими роботи двигуна, навантаження, а також можливі

відхилення у функціонуванні окремих вузлів. Це робить акустичний аналіз перспективним інструментом для діагностики.

До сучасних методів акустичної діагностики ДВЗ належать спектральний, часо-частотний та статистичний аналізи сигналів, а також методи машинного навчання.

Спектральний аналіз є одним із базових підходів, що широко використовується для дослідження акустичних сигналів. Він ґрунтується на застосуванні швидкого перетворення Фур'є для переходу від часової до частотної області. У результаті отримується амплітудно-частотний спектр сигналу, який дозволяє виділити основні гармонійні складові, пов'язані з частотою обертання колінчастого валу, роботою клапанного механізму, процесами згоряння та іншими джерелами шуму. Даний метод є ефективним для виявлення періодичних процесів, однак має обмежену інформативність у випадку нестационарних режимів роботи двигуна, зокрема при зміні навантаження або перехідних процесах [1–2].

Більш інформативним є часо-частотний аналіз, який реалізується, зокрема, у вигляді спектрограм. У цьому випадку сигнал розбивається на короткі часові інтервали, для кожного з яких обчислюється спектр, що дозволяє відстежувати зміну частотного складу сигналу у часі. Це особливо важливо для аналізу реальних умов роботи ДВЗ, де процеси мають нестационарний характер. Спектрограми дозволяють виявляти характерні «акустичні підписи» різних режимів роботи двигуна, включаючи зміну обертів, навантаження, а також появу додаткових шумових компонентів. Недоліком методу є залежність результатів від вибору параметрів вікна аналізу та значний обсяг обчислень [3].

Статистичні методи обробки сигналів передбачають виділення узагальнених характеристик акустичного сигналу, таких як середнє значення, дисперсія, енергія сигналу, коефіцієнти асиметрії та ексцесу. Дані ознаки можуть використовуватись як вхідні параметри для подальшої класифікації. Перевагою такого підходу є зменшення розмірності даних та можливість швидкої обробки сигналів. Водночас, агрегування інформації призводить до втрати частини корисних характеристик сигналу, що може негативно впливати на точність діагностики, особливо у складних режимах роботи двигуна.

Найбільш перспективним напрямком розвитку акустичної діагностики є методи машинного навчання та нейромережеві підходи. У цьому випадку акустичний сигнал або його представлення (наприклад, спектрограма) подається на вхід моделі, яка навчається розпізнавати закономірності між ознаками сигналу та відповідними режимами роботи двигуна. Нейронні мережі, зокрема згорткові (CNN), є ефективними для обробки спектрограм,

оскільки здатні автоматично виділяти інформативні ознаки без необхідності їх ручного задання [4].

Перевагою нейромережевих підходів є здатність працювати з великими обсягами даних та враховувати складні нелінійні залежності між параметрами сигналу. Це дозволяє виконувати класифікацію навіть у випадках, коли відмінності між сигналами є незначними, наприклад, при однакових обертах двигуна, але різних умовах навантаження. У таких умовах зміни проявляються переважно у варіаціях амплітуди, шумових складових та розподілу енергії сигналу, що складно виявити традиційними методами.

Разом з тим, застосування нейромереж потребує формування якісної навчальної вибірки, налаштування архітектури моделі та значних обчислювальних ресурсів. Незважаючи на це, саме даний підхід на сьогодні є найбільш перспективним для задач автоматизованої діагностики ДВЗ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Li Zengfang, He Yong, Xu Gaohuan. Engine Fault Diagnosis Model Based on Sound Intensity Analysis and Neural Network Integration // Journal of Agricultural Machinery. 2008. Vol. 39. № 12. P. 170-173.
2. Randall R. B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. Wiley, 2011. 448 p. DOI: 10.1002/9780470977668.
3. Boashash B. Time-Frequency Signal Analysis and Processing. Elsevier, 2016. 81 p.
4. Khan S., Yairi T. A review on the application of deep learning in system health management // Mechanical Systems and Signal Processing. 2018. Vol. 107. P. 241–265. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.11.024.

УДК 621.43.068

Слинько Г.І.¹, Зайцев М.П.², Сухонос Р.Ф.³, Слинько В.В.³

¹ д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Т-415м НУ «Запорізька політехніка»

³ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

СИСТЕМИ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ У ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Сучасний розвиток автомобільної техніки тісно пов'язаний із необхідністю зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище. Однією з головних проблем двигунів внутрішнього згоряння є утворення оксидів азоту (NO_x), які виникають при високих температурах згоряння

паливоповітряної суміші. Для зменшення їх кількості широко застосовується система рециркуляції відпрацьованих газів (EGR), яка дозволяє ефективно знижувати температуру згоряння та, відповідно, рівень токсичних викидів.

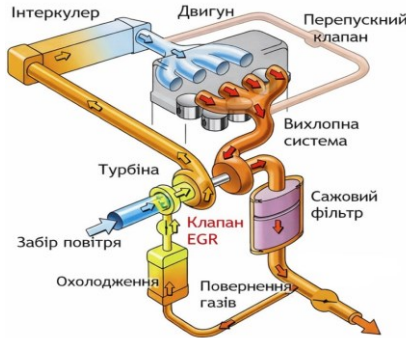


Рисунок 1 – Схема роботи системи рециркуляції відпрацьованих газів двигуна автомобіля [1]

Система EGR (Exhaust Gas Recirculation) полягає у частковому поверненні відпрацьованих газів із випускного колектору назад у впускний тракт двигуна. Ці гази, що практично не містять кисень, змішуються зі свіжим повітрям, що призводить до зниження концентрації кисню у циліндрі. Внаслідок цього процес згоряння відбувається повільніше, а пікова температура у камері згоряння зменшується. Саме це є основним фактором зниження утворення оксидів азоту. Регулювання кількості рециркульованих газів здійснюється за допомогою клапана EGR, який може мати вакуумне або електронне керування залежно від конструкції двигуна.

Система EGR широко застосовується як у бензинових, так і в дизельних двигунах сучасних автомобілів. Зокрема, вона використовується у дизельних двигунах Volkswagen TDI, бензинових двигунах Renault K, а також у двигунах Opel Ecotec. У деяких випадках існують різні модифікації одного й того ж двигуна, які відрізняються наявністю або відсутністю системи EGR. Як правило, версії двигунів із системою EGR відповідають більш жорстким екологічним нормам, але мають дещо нижчі показники потужності, тоді як двигуни без цієї системи характеризуються кращими динамічними характеристиками, проте вищим рівнем шкідливих викидів.



Рисунок 2 – Клапан системи рециркуляції відпрацьованих газів двигуна автомобіля Renault Clio [2]

З метою підвищення ефективності роботи системи EGR застосовуються різні методи її оптимізації. Одним із основних напрямків є вдосконалення конструкції системи, зокрема використання охолоджувачів відпрацьованих газів (EGR cooler), що дозволяє додатково знижувати їх температуру перед подачею у впускний тракт. Це підвищує ефективність зниження NO_x та зменшує негативний вплив на процес згоряння. Важливу роль відіграє також впровадження електронних систем керування, які забезпечують точне дозування кількості рециркульованих газів залежно від режиму роботи двигуна. Наприклад, при високих навантаженнях або обертах система EGR може частково або повністю відключатися для збереження потужності двигуна.

Таким чином, система рециркуляції відпрацьованих газів є важливим елементом сучасних двигунів внутрішнього згоряння, який дозволяє значно знизити рівень шкідливих викидів. Незважаючи на певні недоліки, пов'язані зі зниженням потужності та утворенням нагару, її використання є виправданим з точки зору екології. Подальший розвиток технологій керування та конструктивних рішень дозволяє мінімізувати ці недоліки та забезпечити ефективну роботу двигуна з урахуванням сучасних екологічних вимог.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, Inc. 2018. 930 p.
2. BOSCH Automotive Handbook. 11th Edition. 2022. 2044 p.
3. Stone R. Introduction To Internal Combustion Engines. Palgrave Macmillan, 1992. 574 p.

УДК 621.43.013

Євсєєва Н.О.¹, Зайцев М.П.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Т-415м НУ «Запорізька політехніка»

БУДОВА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ СИСТЕМИ ВПУСКУ ДВИГУНА RENAULT K7J

Впускна система двигуна Renault K7J автомобіля Renault Symbol є простою та надійною, побудована на основі механічної дросельної заслінки та системи МРІ з MAP-сенсором, що забезпечує стабільну роботу двигуна в усіх режимах. Послідовність процесів під час такту впуску: в циліндрах створюється розрідження, атмосферне повітря через повітрозабірник починає всмоктуватись у впускну систему двигуна, далі повітря проходить через повітряний фільтр з паперовим фільтрувальним елементом. Фільтр затримує пил, пісок та інші механічні домішки, запобігаючи зносу циліндропоршневої групи. Повітряний фільтр з паперовим елементом (рис. 1) – це основний компонент системи очищення повітря, що забезпечує високу ефективність (до 99%) затримання пилу та абразивних частинок. Він має низький опір потоку, що підвищує потужність двигуна та зменшує витрату палива.



Рисунок 1 – Фільтр з паперовим елементом Renault K7J

Після очищення повітря надходить у впускний тракт, де його параметри вимірюються:

- MAP-сенсором (manifold absolute pressure) визначається абсолютний тиск (розрідження) у впускному колекторі;
- MAF-сенсором (mass air flow) визначається поточна витрата повітря через систему впуску;
- датчик температури повітря (IAT) (intake air temperature) призначений для вимірювання температури повітря, що надходить у двигун.

Отримані дані передаються до електронного блоку керування (ЕБУ), який на їх основі визначає масу повітря у впускній системі та коригує роботу двигуна. Датчик температури охолоджуючої рідини (ДТОР) контролює температуру антифризу в системі охолодження. Зазвичай його встановлюють безпосередньо на двигуні – у найбільш нагрітих ділянках системи, щоб забезпечити максимально точний контроль температури. На двигуні Renault K7J датчик розташований на корпусі термостата (рис. 2).



Рисунок 2 – Розташування датчика температури охолоджуючої рідини на двигуні Renault K7J

Кількість повітря, яке потрапляє в двигун, регулюється дросельною заслінкою (рис. 3). Призначення: відкриття заслінки збільшує кількість повітря, підвищуючи оберти; закриття - зменшує, забезпечуючи холостий хід.



Рисунок 3 – Дросельна заслінка

Змішування повітря з паливом. У впускному колекторі відбувається утворення паливо-повітряної суміші. Форсунки MPI (Multi-Point Injection) – це компоненти системи розподіленого упорскування палива, де кожен циліндр двигуна має власну форсунку. Вони впорскують бензин у впускний колектор перед впускним клапаном, де він змішується з повітрям. Ця технологія відрізняється надійністю, простотою конструкції та меншою вимогливістю до якості палива порівняно з безпосереднім упорскуванням.

Впускна система двигуна Renault K7J забезпечує очищення, точне вимірювання та дозування повітря, а також ефективне утворення паливо-повітряної суміші, що є необхідною умовою стабільної та економічної роботи двигуна.

УДК 629.3.01

Бойченко В.С.¹, Кудін О.П.², Дударенко О.В.³

¹ студ. гр. Т-214, НУ «Запорізька політехніка»

² асп. НУ «Запорізька політехніка»

³ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ СИСТЕМИ ВИПУСКУ АВТОМОБІЛЯ

Зазвичай система управління двигуном внутрішнього згоряння сучасного автомобіля має розширений апарат самодіагностики (OBD – On-Board Diagnostic) і при виявленні відхилень від зазначених виробником діапазонів значень параметрів інформує про наявність несправності шляхом запалювання інформаційного індикатора check engine [1]. Для несправностей впускної системи загалом і системи каталітичної нейтралізації відпрацьованих газів характерні наступні коди несправностей (табл. 1).

Тим не менш, зустрічаються ситуації, коли бортова система не діагностує помилок і лампа індикації несправності не загоряється. В якості прикладу розглянуто автомобіль Hyundai Grandeur із розподільним впорскуванням палива з встановленим газовим обладнанням виробника AG Zenit. Власник автомобіля скаржився на втрату потужності двигуна, погану динаміку розгону.

Діагностичний сканер відхилень у паливних корекціях не фіксував, паливні корекції були в нормі (SFT: -3% LFT: -2%). Для подальшого діагностування було прийнято рішення провести тест Рх роботи двигуна за допомогою мотортестера (осцилографа Постоловського версії IV).

Таблиця 1 – Коди OBD2, що стосуються несправностей системи нейтралізації відпрацьованих газів

Код	Опис	Можлива причина
P0420, P0430	Ефективність каталізатора нижче норми (банк 1, банк 2)	Зношений каталізатор, несправний лямбда-зонд
P0421, P0431	Низька ефективність прогріву каталізатора (банк 1, банк 2)	Повільний прогрів, старіння каталізатора
P0422, P0433	Основний каталізатор неефективний (банк 1, банк 2)	Руйнування або забруднення
P0423, P0433	Низька ефективність підігрівасмого каталізатора (банк 1, банк 2)	Проблеми з підігрівом
P0424, P0434	Температура каталізатора занижена (банк 1, банк 2)	Несправність датчика або нагрівача
P0425, P0435	Несправність датчика температури каталізатора (банк 1, банк 2)	Обрив або коротке замикання
P0426, P0436	Некоректна робота датчика температури (банк 1)	Невірні покази датчика
P0427, P0437	Низький сигнал датчика температури (банк 1, банк 2)	Обрив або слабкий сигнал
P0428, P0438	Високий сигнал датчика температури (банк 1, банк 2)	Коротке замикання або помилка датчика
P0429, P0439	Несправність керування підігрівом каталізатора (банк 1, банк 2)	Проблема в електричному колі

Датчик тиску з подовжувачем було встановлено у свічний отвір першого циліндру, виконано калібрування датчику відносно поточного атмосферного тиску і зроблено відповідний тест роботи двигуна, отримано наступні результати, які зображено на рисунку 1.

ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Комплексні втрати газу при 700 RPM (15...20), %	19
Розрахункова геометрична ступінь стиснення (10:1...12:1)	10.7:1
Оберти холостого ходу (650...950), RPM	700
Фази газорозподілу при 790 RPM	
Кут відкриття впускного клапана (130...160), °	135
Кут закриття впускного клапана (360...395), °	374
Кут відкриття впускного клапана (350...385), °	370
Кут закриття впускного клапана (585...615), °	601

Рисунок 1 – Загальні характеристики за результатами діагностування

Негерметичності циліндру чи нетипових кутів фаз системи газорозподілу в результаті діагностики виявлено не було. Проте датчиком тиску було діагностовано великий опір випускного тракту автомобіля, що видно на наступних рисунках 2, 3.

Як видно з рисунку 3, при роботі двигуна на обертах 3949 хв-1, тиск в системі вихлопу становив 1,508 бар, що свідчить про засміченість і заплавлення системи каталітичної нейтралізації автомобіля. Після демонтажу вихлопної системи це було підтверджено візуально, що добре видно на рисунку 4.

ВИПУСКНИЙ ТРАКТ



Втрати потужності на такті випуску	
при 1000 RPM (0...7), %	9
при 2000 RPM (0...11), %	13
при 2500 RPM (0...13), %	18
при 3000 RPM (0...15), %	23
при 3500 RPM (0...18), %	29
при 4000 RPM (0...20), %	36
при 4500 RPM (0...23), %	44
при 5000 RPM (0...25), %	51
при 5500 RPM (0...28), %	52

Рисунок 2 – Результати діагностування системи випуску

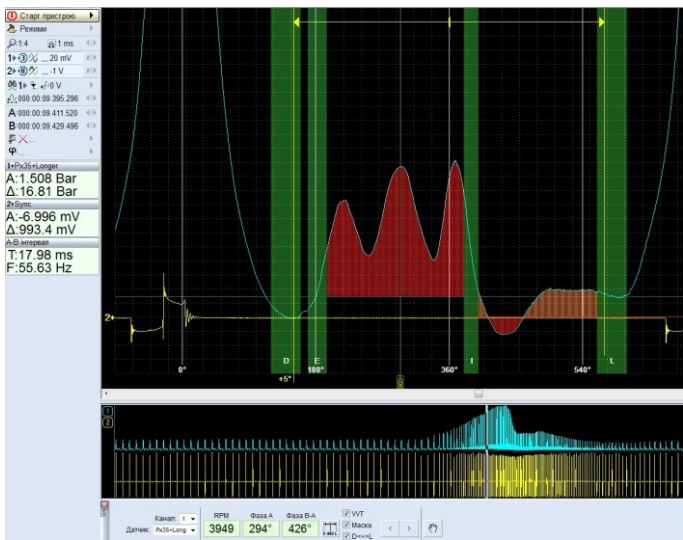


Рисунок 3 – Діаграма тиску вимірюного в першому циліндрі автомобіля



Рисунок 4 – Пошкодження каталізатора автомобіля Hyundai Grandeur

Застосований підхід дозволяє досить точно виявляти проблеми системи вихлопу автомобіля у той час, коли бортова система самодіагностики не реєструє помилок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. OBD2 Trouble Codes Explained – Complete Diagnostic DTC Guide [Електронний ресурс]. Available at: <https://obdguides.com/obd2-trouble-codes-explained-complete-diagnostic-dtc-guide/> (дата звернення: 02.04.2026).
2. Діагностика систем керування осцилографом Постолювського [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://kovsh.com/service/home/service/electric_equipment_service/postolovsky_oscilloscope (дата звернення: 02.04.2026).

УДК 629.113

Степанченков В.О.¹, Репін М.Л.²

¹ викл. Запорізького будівельного фахового коледжу

² студ. гр. БМ1-22 Запорізького будівельного фахового коледжу

БЮДИЗЕЛЬ

Паливо можна отримувати не тільки з нафти. Розповсюдженим явищем стало альтернативне джерело – біологічна маса рослинного походження. Термін «біодизель» включає складні ефіри жирних кислот,

трансестерифіковані метанолом або етанолом оливи або мастила. В Європі використовують найчастіше ріпакову олію, в Південній та Північній Америці – соєву, в Азії – пальмову, в Індії – олію ятрофи. Також використовують метилефіри, що виробляються у всьому світі, які отримують з відходів (UFOME). Європейський стандарт EN 14214 (2010) найбільш всеосяжна специфікація для біодизеля в усьому світі, незалежно від того, з чого та в якій якості використовують біодизель – чистого палива або суміші до дизельного палива. Найчастіше видобувають його з ріпакової олії, бо вона є найдешевшою.

Переваги біодизеля.

1. Традиційне дизпаливо стає дорожчим з кожним роком внаслідок зменшення кількості нафти у надрах Землі. По розрахункам вчених при нинішньому обсязі використання нафтового палива нафта на Землі закінчується у 2050 році. Так, через 30–40 років запаси цієї речовини просто зникнуть.

2. Біодизельне паливо не є абсолютно екологічно чистим, але порівняно з нафтовим воно все ж чистіше. У продуктах згоряння біопалива на 8–10% менше окису вуглецю, майже на 50% менше сажі й значно менше сірки, ніж у звичайного дизпалива.

3. Біодизель відзначається високим цетановим числом (характеристика samozapalennia дизельних палив в циліндрі двигуна), що дає можливість використовувати біопаливо без додаткових речовин, які б забезпечували краще запалювання, особливо під час запуску двигуна.

4. Біопаливо має гарні мастильні властивості завдяки особливому хімічному складу та високому вмісту кисню. При виборі такого палива не потрібно змінювати двигун та інші його системи.

5. У разі попадання у ґрунт або воду біодизельне паливо протягом 25–30 днів практично повністю розпадається й не завдає екологічної шкоди, тоді як один кілограм мінеральних нафтопродуктів може забруднити майже мільйон літрів питної води, знищуючи в ній всю флору й фауну.

Недоліки біодизеля.

1. Дизельне паливо – інертна та неполярна суміш парафінів і ароматичних з'єднань, в той час як ефіри жирних кислот – полярні та хімічно реагуючі. Біопаливо агресивніше щодо гумових і полімерних деталей двигунів, ніж звичайне нафтове. В разі потрапляння на лакофарбове покриття кузова біопаливо треба якнайшвидше витерти, бо воно досить швидко роз'їдає його верхній шар.

2. Потужність двигуна під час роботи у номінальному режимі з використанням біопалива знижується на 6–8%. Разом з цим витрата палива підвищується приблизно на 5–8%. Крім незначної втрати потужності в

холодну пору року та за високої вологості спостерігається неприємний специфічний запах відпрацьованих газів.

3. Виробництво біопалива для його використання в чистому вигляді потребує чималих додаткових капіталовкладень. Тому в більшості країн практикують змішування нафтового дизельного палива з ріпаковою олією або ж використовують як добавку (від 5 до 30%) до традиційного дизельного палива. Більш високі пропорції біодизеля у Франції В30 та у США В20.

4. У випадку великого вмісту біопалива висока точка кипіння біодизеля може призвести до його активного потрапляння із камери згоряння через ущільнення на стінках циліндрів в моторну оливу, що потребує більш коротких термінів інтервалу заміни оливи.

5. У зв'язку з підвищеною щільністю та в'язкістю, разом з високою випарованістю ріпакова олія не підходить до використання в сучасних дизельних двигунах із системою впорскування під високим тиском. Для них запропоновано використовувати гідрогенізовану рослину олію згідно специфікації CWA 15940 (2009) експертів Європейського комітету по стандартизації (CEN).

6. Ріпак є культурою з дуже дрібним зерном і тому для його сівби, збирання та первинної переробки потрібна спеціальна техніка або ж удоскоалена традиційна. Придбання такої техніки або переобладнання вже існуючої потребує чималих втрат робочого часу та коштів, яких у господарствах, як правило, бракує.

Але, незважаючи на всі наведені переваги й недоліки біодизеля, нині перехід на екологічно чисті види палива є потребою вже не тільки сьогодення, а й завтрашнього дня, і не враховувати цього не можна.

УДК 629.113

Степанченков В.О.¹, Магницький М.С.²

¹ викл. Запорізького будівельного фахового коледжу

² студ. гр. БМ1-22 Запорізького будівельного фахового коледжу

НАЛАШТУВАННЯ КЛАПАНІВ

Налаштування клапанів є важливим етапом технічного обслуговування двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Від правильного регулювання клапанних зазорів залежить ефективність роботи двигуна, його потужність, економічність, довговічність і рівень викидів шкідливих речовин. Неправильне налаштування може призвести до втрати потужності, перевитрати пального, підвищеного зношення деталей та інших серйозних проблем. У цій роботі розглядаються принципи роботи клапанного

механізму, методи налаштування клапанів, сучасні технології діагностики та регулювання, а також можливі наслідки неправильного регулювання.

Клапанний механізм двигуна виконує функцію подачі паливо-повітряної суміші в циліндри (впускні клапани) і випуску відпрацьованих газів (впускні клапани). Основні елементи клапанного механізму:

- клапани – забезпечують герметичність камери згоряння та регулюють подачу та випуск газів;
- розподільчий вал – керує відкриттям і закриттям клапанів у відповідності до фаз газорозподілу;
- штовхачі, коромисла, важелі – передають рух від розподільчого валу до клапанів;
- пружини клапанів – забезпечують закриття клапанів після завершення такту роботи.

Робота клапанів синхронізується з роботою колінчастого валу за допомогою механізму газорозподілу, який може бути ланцюговим або ремінним. З часом зазори між клапанами і приводними елементами змінюються через зношення деталей, температурне розширення металу, накопичення нагару, механічні деформації елементів приводу клапанів. Налаштування клапанів необхідно проводити відповідно до регламенту технічного обслуговування автомобіля. Зазвичай це робиться кожні 20 000–50 000 км пробігу або відповідно до рекомендацій виробника. Налаштування клапанів може виконуватись різними методами, залежно від конструкції двигуна. Основні методи наступні.

Регулювання клапанів щупом.

1. Підготовка: заглушити двигун, зняти клапанну кришку.
2. Визначення положення поршня у ВМТ (верхній мертвій точці) такту стиснення.
3. Перевірка зазорів між коромислом і клапаном за допомогою щупа.
4. Регулювання:
 - послаблення контргайки;
 - коригування зазору гвинтом або шайбами;
 - затягування контргайки та повторна перевірка.
5. Збірка та тестування – встановлення кришки та перевірка роботи двигуна.

Регулювання гідрокомпенсаторами.

У деяких двигунах використовуються гідрокомпенсатори, які автоматично підтримують необхідний зазор. У такому випадку регулювання зазорів не потрібне, але необхідно контролювати рівень і якість моторної оливи, оскільки від нього залежить робота компенсаторів.

Можливі помилки та їх наслідки.

1. Завеликий зазор:

- підвищений шум клапанного механізму;
- втрата потужності;
- нерівномірна робота двигуна;
- прискорене зношення клапанів і розподільчого валу.

2. Замалий зазор:

- перегрів клапанів;
- прогорання клапанів;
- зниження компресії та потужності двигуна;
- збої в роботі двигуна.

З розвитком технологій з'явилися нові методи контролю стану клапанів, серед яких:

- ендоскопічна діагностика – використовується для огляду стану клапанів без розбирання двигуна;
- комп'ютерна діагностика – дозволяє визначити порушення в роботі клапанного механізму за показниками датчиків;
- лазерні вимірювальні системи – високоточне визначення зазорів.

Налаштування клапанів є ключовим процесом у підтримці оптимальної роботи двигуна. Правильна регуляція забезпечує:

- зниження витрат пального;
- підвищення ефективності двигуна;
- подовження терміну служби компонентів;
- зменшення рівня шуму та викидів шкідливих газів.

Регулярне обслуговування клапанного механізму та використання сучасних методів діагностики допомагає уникнути серйозних поломок і підвищити надійність автомобіля.

СЕКЦІЯ «ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

УДК 669.715:669.018.25:620.186

Пучек С.В.¹, Беліков С.Б.²

¹ асп НУ «Запорізька політехніка»

² д-р. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

СПІВСТАВЛЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СУПЕРСПЛАВІВ ЖС26-ВІ ТА ЖС32-ВІ ЯК МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Розвиток авіаційного газотурбобудування вимагає забезпечення зростанню робочих параметрів газотурбінних двигунів (ГТД), а саме рівнем температур на вході в турбіну, підвищенням питомої потужності, економічності та ресурсу роботи ГТД. Надійність та довговічність роботи ГТД, в багатьом, залежить від експлуатаційних параметрів матеріалів для виготовлення найбільш відповідальних деталей ГТД – робочих та соплових лопаток. Жароміцні суперсплави на основі нікелю є найбільш вживаними матеріалами для виготовлення цих деталей.

Метою роботи було вивчення макро- та мікроструктурного стану дослідних плавок складнолегованих жароміцних сплавів на основі нікелю ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ для виробництва відповідальних деталей ГТД в умовах підприємства «Мотор Січ», оцінка їх механічних властивостей та жароміцності.

Параметри структурної стабільності оцінювали за відомими методиками РНАСОМР та NewРНАСОМР. Дослідні плавки сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ здійснювали в умовах промислового виробництва АТ «Мотор Січ» на сучасній вакуумній плавильній установці: FM-1-2-100 фірми «ULVAC» (Японія) з використанням свіжих шихтових матеріалів. Рівень короткотермінових та тривалих механічних характеристик зразків визначали після термічної обробки за стандартними режимами.

Макроструктура заготовок була представлена зонами дрібних підкоркових кристалів, стовпчастих кристалів та рівновісних кристалів.

Мікроструктура дослідних заготовок обох сплавів ідентична та до термічної обробки являє собою γ - твердий розчин з наявністю інтерметалідної γ' - фази, евтектичної ($\gamma - \gamma'$) фази, карбидів та карбонитридів. В структурі дослідних плавок сплаву ЖС32-ВІ виявлено скелетоподібні виділення карбоборидної евтектики, що розташовані поблизу частинок евтектичної ($\gamma - \gamma'$) фази.

Механічні властивості та жароміцність обох сплавів відповідає вимогам технічної документації до відповідального литья.

Розрахунково-аналітична оцінка структури та фазової стабільності сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ, що виконана за комплексною методикою КРАМ [1], підтвердила високій рівень структурної стабільності за показником схильності сплавів до утворення ТЩУ-фаз, а також за параметром дисбаланса системи легування.

Більші показники границі міцності σ_b сплаву ЖС32-ВІ обумовлені корегуванням системи легування, а саме заміною частини вмісту вольфраму на легування танталом і ренієм, які є ефективними зміцнювачами твердого розчину та впливають на несуттєве зниження показників пластичності сплаву.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Гайдук С.В. Наукові основи проектування ливарних жароміцних нікелевих сплавів з необхідним комплексом службових властивостей /С.В. Гайдук, С.Б. Беліков. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 80 с.

УДК 656.13:004.9

Васильєва Л.О.¹, Острогляд О.О.², Боженова Є.В.³

¹ доц. НУ «Запорізька політехніка»

² доц. НУ «Запорізька політехніка»

³ студ. гр. Т-323 НУ «Запорізька політехніка»

ЄВРОІНТЕГРАЦІЯ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ І ЦИФРОВІЗАЦІЯ МІЖНАРОДНИХ АВТОБУСНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Ринок європейських пасажирських перевезень автобусами є складовою транспортної системи Євросоюзу та забезпечує доступну мобільність для громадян. Характерною особливістю ринку є прозорість, конкуренція, високі стандарти безпеки, соціальна відповідальність та екологічні вимоги. Регулювання зазначеного сектору пасажирських перевезень здійснюється національним законодавством європейських країн та стандартами й регламентами, запровадженими на рівні ЄС [1].

Відповідно до євроінтеграційного курсу в Україні триває гармонізація українського законодавства з Регламентами ЄС, що передбачає, в тому числі, подальшу лібералізацію міжнародних пасажирських перевезень та спрощення доступу до ринку.

Протягом 2024-2025 років відбулись зміни в правових основах міжнародних пасажирських перевезень, які спрямовані на євроінтеграцію, цифровізацію та спрощення процедур. У 2024 році наказами Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України прийнято новий

«Порядок організації регулярних, нерегулярних та маятникових (човникових) перевезень пасажирів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні» [2] та «Вимоги щодо використання автобусів за видами сполучень, режимами руху та протяжністю маршрутів, за параметрами пасажиромісткості, комфортності, технічних та екологічних показників» [3], які відповідають Регламентам (ЄС) № 1073/2009, № 1071/2009, № 181/2011 та іншим.

Новим Порядком [2] завдяки цифровізації передбачено спрощені процедури подання всіх документів і отримання дозволів перевізниками через ЄКІС (Єдиний комплекс інформаційних систем у сфері безпеки на наземному транспорті). Удосконалено процедури прийняття рішень про відкриття нових маршрутів та вимоги до перевізників. Визначено категорії автобусів для міжнародних перевезень, які відповідають сучасним стандартам умов комфортності та обладнанні системою глобального позиціонування GPS.

3 березня 2025 року Міністерством розвитку та відновлення запущено роботу цифрового інструменту – онлайн-кабінет міжнародних маршрутів, який є одним з елементів реформи міжнародних автобусних перевезень. Тільки за перші три місяці роботи кабінету було відкрито 109 нових маршрутів, а за весь 2024 рік за паперовою процедурою – тільки 270. Цифровізація дозволила ухвалювати рішення швидше, якісніше та мінімізувати корупційні ризики, що відповідає євроінтеграційному курсу України. Наразі в онлайн-кабінеті перевізника вже доступні всі функції: відкриття, закриття маршрутів, внесення змін в існуючі тощо. Видача дозволів для нерегулярних перевезень (Interbus) тепер також оцифрована, що забезпечує прозорість процесу та доступ до єдиної бази даних.

Вимогами [3] до використання автобусів регламентуються в залежності від протяжності маршруту такі параметри, як екологічний клас, комфортність, пасажиромісткість та безпечність перевезень пасажирів.

Вагомим внеском в процес цифровізації міжнародних перевезень стало запровадження сервісу «ЄЧерга» – електронної черги перетину кордону. Вперше система «ЄЧерга» для вантажівок почала працювати в тестовому режимі на пункті «Ягодин-Дорогуськ» з 12 грудня 2022 року. Повноцінний запуск відбувся на 16 пунктах пропуску у травні 2023 року, а з 31 липня Міністерством розвитку громад, територій та інфраструктури України розпочалось тестування сервісу «ЄЧерга» для перетину кордону автобусами. Послуга стала доступною для автобусів на всіх ключових пунктах пропуску з квітня 2024 р.

У липні 2025 року було затверджено нові Правила використання системи «ЄЧерга» для автобусів (рис. 1).

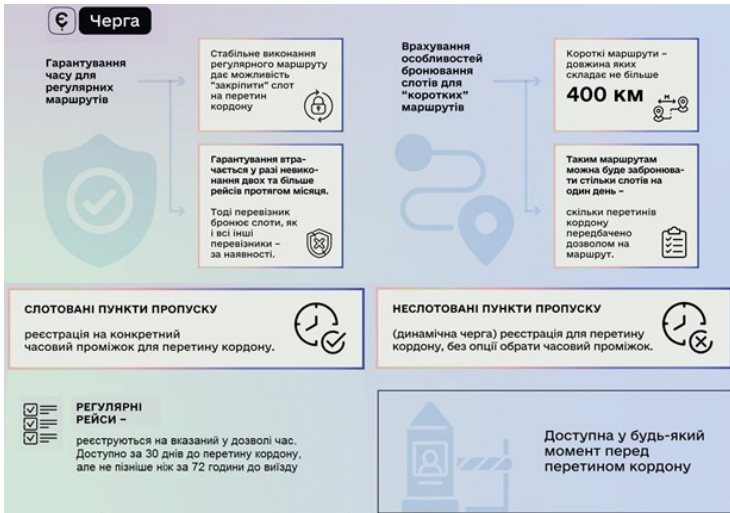


Рисунок 1 – Нові правила використання еЧерга для автобусів

Метою впровадження нових Правил [4] є прогнозований, безпечний і цифровий перетин кордону автобусами. Вони забезпечують справедливий механізм завчасного бронювання місця в онлайн-черзі як для регулярних, так і для нерегулярних рейсів.

Завдяки нововведенням гарантується час перетину кордону за слотованою системою для перевізників, які стабільно виконують регулярні перевезення – за ними закріплюється часовий слот для перетину кордону під його маршрут. Вільні часові слоти можуть використовувати для запису нерегулярні перевізники. Оновлена система має також функціонал для коротких маршрутів, протяжність яких не більше 400 км, та які мають дозвіл на два і більше перетинів кордону за добу.

З 13 травня цього року набирає чинності новий Порядок формування та ведення реєстру автобусних маршрутів [5], який впроваджує повну цифровізацію, замінюючи паперові процедури на Єдиний електронний реєстр автобусних маршрутів. Реформування ринку пасажирських перевезень триває. Протягом 2026 року Міністерством розвитку громад та територій України передбачено суттєве оновлення нормативної бази з регулювання сфери пасажирських автомобільних перевезень. Ключовою метою за планових змін є повна цифровізація галузі пасажирських перевезень, діджиталізація дозвільних документів і маршрутів та підвищення вимог до екологічності рухомого складу.

Таким чином, сучасний етап розвитку міжнародних автобусних перевезень в Україні характеризується активною трансформацією нормативно-правової бази відповідно до вимог Європейського Союзу та впровадженням цифрових інструментів управління галуззю. Реалізація нових підходів до організації перевезень, зокрема через електронні сервіси, сприяє підвищенню прозорості, ефективності та доступності ринку, а також створює передумови для зниження адміністративних бар'єрів і корупційних ризиків. Водночас посилення вимог до технічних, екологічних та організаційних аспектів функціонування перевізників забезпечує підвищення якості та безпеки надання транспортних послуг. У сукупності зазначені зміни формують підґрунтя для інтеграції національної транспортної системи до європейського транспортного простору та подальшого сталого розвитку сфери пасажирських перевезень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. РБК-Україна. Шлях України до прозорого ринку пасажирських перевезень: веб-сайт. URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/vid-reydiv-tsfrovih-dashbordiv-shlyah-ukrayini-1768394697.html>

2. Порядок організації регулярних, нерегулярних та маятникових (човникових) перевезень пасажирів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні. Затверджено Наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України 05.09.2024 р. № 966 (із змінами, редакція від 29.07.2025 р.). Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1662-24#Text>

3. Вимоги щодо використання автобусів за видами сполучень, режимами руху та протяжністю маршрутів, за параметрами пасажиромісткості, комфортності, технічних та екологічних показників. Затверджено Наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України 24 липня 2024 року № 688. Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1320-24#Text>

4. Правила черговості прибуття автобусів до міжнародних та міждержавних пунктів пропуску через державний кордон України з використанням електронної системи «Електронна черга перетину кордону». Затверджено Наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України 24.07.2025 р. № 1177. Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1213-25#Text>

5. Порядок формування, затвердження та ведення реєстру міжнародних та міжміських і приміських автобусних маршрутів загального користування. Затверджено Наказом Міністерства розвитку громад, територій та

інфраструктури України 28.11.2025 р. № 1650. Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1937-25#Text>

УДК 656.2:004.9

Васильєва Л.О.¹, Острогляд О.О.², Сущенко П.Р.³

¹ доц. НУ «Запорізька політехніка»

² доц. НУ «Запорізька політехніка»

³ студ. гр. Т-814сп НУ «Запорізька політехніка»

ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНІСТЬ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ В УМОВАХ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ

В багатьох країнах світу залізнична інфраструктура, а також правила експлуатації та контролю залізничного транспорту відрізняються, оскільки були створені кожною країною, враховуючи її особливості і можливості. Тим не менш, залізничний транспорт займає провідне місце у транспортному забезпеченні міжнародних перевезень вантажів і пасажирів. Але існуючі відмінності ускладнюють технологічні процеси залізничної галузі [1]. Європейським залізничним агентством (ERA) розроблено правила технічної сумісності (інтероперабельності - технічної та операційної сумісності систем), завдяки яким залізничні потяги можуть виконувати перевезення в будь-якій країні ЄС.

Євроінтеграційні реформи в Україні попри тривалу війну здійснюються і одним з її ключових напрямків є транспортна інфраструктура України, зокрема залізничний транспорт. Адаптація залізничного транспорту України до стандартів ЄС (Acquis EU) відбувається через масштабну реформу, що передбачає ухвалення низки законів, ключовим з яких є законопроект № 14174 «Про безпеку та інтероперабельність залізничного транспорту України», прийнятий Верховною Радою України за основу 17.12.2025 року [2]. Цей Закон адаптує українську залізницю до стандартів ЄС, запроваджує європейські вимоги до безпеки, сертифікації рухомого складу, технічного обслуговування та впровадження принципу «єдиного вікна» для дозвільних процедур (рис. 1).

Законопроект передбачає [3]:

- створення сучасної системи управління безпекою на залізничному транспорті за вимогами ЄС;
- запровадження оцінки ризиків і єдиних правил технічного регулювання;
- нову систему обслуговування рухомого складу та відповідальності за його стан;

- європейські стандарти допуску машиністів до роботи, а також навчання й підвищення кваліфікації;
- технічну та операційну сумісність залізничної інфраструктури з країнами ЄС.

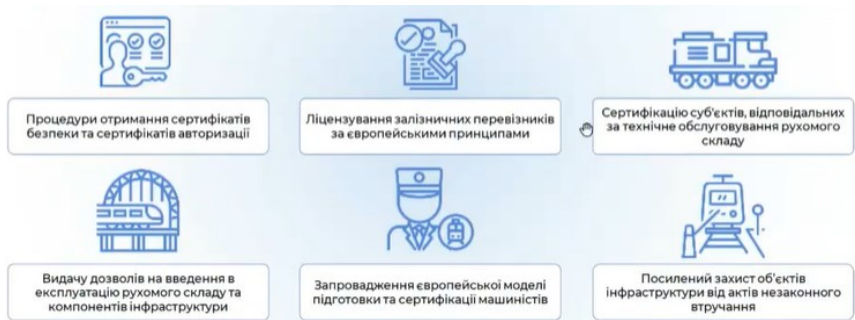


Рисунок 1 – Основні положення Закону «Про безпеку та інтероперабельність залізничного транспорту України»

Законопроект є частиною виконання зобов'язань України в межах Угоди про асоціацію з ЄС та індикаторів ініціативи Ukraine Facility, що відкриває шлях до багатомільярдного фінансування від Євросоюзу та Світового банку. На цей час триває робота в підкомітеті з питань залізничного транспорту ВР, над поданими поправками і пропозиціями. Прийняття Закону Верховною Радою є важливим кроком до європейської інтеграції залізниці. Перехід від національних стандартів до єдиних європейських правил відкриває Україні можливість до створення спільного ринку залізничних перевезень, підвищує безпеку руху і довіру міжнародних партнерів [4].

Гармонізація інфраструктури з європейською мережею триває прискореними темпами. Будівництво колії європейського стандарту 1435 мм Чоп – Ужгород, яке було завершено минулого року, стало першим етапом масштабної інтеграції української залізниці до європейської мережі. Наступний крок – з'єднання Ужгорода зі Львовом колією 1435 мм та будівництво ділянки Скнилів – Мостиська-2, що відкриє прямий шлях від Львова до Польщі та інших країн ЄС. Це створить пряме інтероперабельне сполучення України з основною мережею TEN-T і суттєво посилить логістичні можливості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Інтєроперабельність залізниць: вимоги: веб-сайт. URL: <https://industry.hlr.ua/blog/2370-interoperability>
2. Проект Закону про безпеку та інтєроперабельність залізничного транспорту України. Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://itd.rada.gov.ua/billinfo/Bills/Card/58624>
3. URFF Association. Залізнична євроінтеграція: експерти про ключові кроки реформування галузі: веб-сайт. URL: <https://aurff.com.ua/zaliznychna-uevointegracziya-eksperty-pro-klyuchovi-kroky-reformuvannya-galuzi/>
4. Інтеграція української залізниці з європейською: перспективи 2026 року: веб-сайт. URL: <https://ndu.kr.ua/847-integratsiya-ukrajinskoji-zalznitsi-z-evropejskoyu-perspektivi-2026-roku>

УДК 656.01

Каплуновська А.М.¹, Сагайдак Б.О.²

¹ старш. викл. каф., ТТ НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Т-814 НУ «Запорізька політехніка»

СУЧАСНІ АСПЕКТИ РЕФОРМУВАННЯ ЛОГІСТИКИ В УМОВАХ ВЕДЕННЯ ПОВНОМАСШТАБНОЇ ВІЙНИ В УКРАЇНІ

Реформування логістики в Збройних силах України під час повномасштабної війни є критично важливим для забезпечення військової ефективності та адаптації до нових умов [1]. Це вимагає інтеграції сучасних технологій, оптимізації процесів і гнучкості у прийнятті рішень, таких як:

1. Адаптація інфраструктури - Відновлення і модернізація транспортних шляхів та складів. - Розвиток альтернативних маршрутів постачання.

2. Використання сучасних ІТ-рішень - Автоматизація управлінських процесів. - Інтеграція систем управління ланцюгами постачання (SCM) та геолокаційних технологій.

3. Різноманітність постачальників - Створення резервних постачальницьких мереж для зменшення ризиків. - Співпраця з місцевими виробниками та міжнародними партнерами.

4. Гнучкість у плануванні - Адаптація до швидко змінюваних умов на фронті. - Використання аналітики та прогнозування для оперативного реагування.

5. Підвищення рівня безпеки - Захист критично важливої інфраструктури. - Використання систем моніторингу та сенсорів для відстеження стану техніки і вантажів.

6. Підготовка кадрів - Навчання особового складу новим технологіям і методам управління. - Впровадження практичних тренінгів у польових умовах.

Одним з перспективних напрямків реформування логістики у збройних силах є використання сучасних ІТ-рішень в логістиці Збройних Сил України, що є критично важливим для забезпечення ефективності та швидкості постачання ресурсів.

Основні напрямки включають застосування ІТ-рішень в частинах : Системи управління ланцюгами постачання (SCM): Автоматизація управлінських процесів, від планування до реалізації, що дозволяє оптимізувати витрати та час доставки.

Геолокаційні технології: Використання GPS і картографічних систем для моніторингу переміщення техніки і вантажів, що підвищує точність та оперативність управління. Геолокаційні технології в логістиці Збройних Сил України грають важливу роль у забезпеченні ефективності та безпеки під час виконання операцій [2].

Ось кілька ключових аспектів їх використання: моніторинг транспорту, аналіз місцевості, координація підрозділів, управління запасами, підвищення безпеки, системи підтримки прийняття рішень.

Інтернет речей (IoT): Впровадження сенсорів для моніторингу стану техніки та вантажів у реальному часі, що дозволяє виявляти проблеми ще до їх виникнення. Впровадження сенсорів для моніторингу стану техніки та вантажів у реальному часі в Збройних Силах України є важливим кроком для підвищення ефективності та безпеки логістичних операцій: моніторинг технічного стану, відстеження вантажів, запобігання втратам, аналіз даних, прогнозування потреб, інтеграція з іншими системами, поліпшення безпеки, гнучкість і швидкість реакції, прогнозування попиту, оптимізація запасів, адаптація до змін, аналіз ризиків.

Виявлення аномалій: Аналітичні інструменти можуть виявляти відхилення у звітності, що може свідчити про проблеми з постачанням або управлінням запасами.

- Автоматизація процесів: Впровадження рішень на базі машинного навчання дозволяє автоматизувати рутинні завдання, такі як облік запасів і управління замовленнями.

- Поліпшення комунікації: Аналітика допомагає зібрати дані з різних джерел, що покращує взаємодію між різними підрозділами і забезпечує актуальність інформації.

- Планування ресурсів: Використання аналітичних інструментів для створення прогнозів, які враховують всі аспекти, від бойових завдань до забезпечення техніки. Електронні платформи для управління запасами:

Автоматизація обліку та управління запасами, що знижує ризики дефіциту або надлишку ресурсів.

Комунікаційні системи: Забезпечення безперервного зв'язку між різними підрозділами, що дозволяє оперативно реагувати на зміни обстановки. Забезпечення безперервного зв'язку між різними бойових завдань.

Ось кілька ключових аспектів цього процесу: системи зв'язку, інтеграція інформаційних систем, моніторинг в реальному часі, створення єдиних командних центрів, протоколи комунікації, навчання особового складу, аварійні комунікаційні системи, взаємодія з цивільними структурами, зворотний зв'язок.

Кібербезпека: Впровадження заходів для захисту інформаційних систем від кібератак, що є важливим аспектом в умовах війни. Системи підтримки прийняття рішень (DSS): Впровадження рішень, які аналізують дані та надають рекомендації для оптимізації логістичних процесів [3].

Висновок: Успішне реформування логістики в Україні в умовах війни вимагатиме інтеграції сучасних технологій, адаптації до нових реалій та стратегічного планування. ІТ-рішення допомагають не лише підвищити ефективність логістики, але й забезпечити швидке реагування на зміни в умовах бойових дій, що є ключовим фактором у забезпеченні успіху військових операцій. Запропоновані рішення можуть значно підвищити точність прогнозування і управління запасами в логістиці Збройних Сил України, що в умовах війни є вирішальним для забезпечення бойової готовності та ефективності військових операцій. Впровадження систем підтримки прийняття рішень в логістиці Збройних Сил України допомагає підвищити ефективність управлінських процесів, що в свою чергу сприяє успішному виконанню бойових завдань та забезпеченню бойової готовності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Доктрина застосування сил логістики- ВКП4-32(03).01. КОМАНДУВАННЯ СИЛ ЛОГІСТИКИ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ, 2021.
2. “Інформаційно-аналітичний збірник №1 логістики Сил територіальної оборони Збройних Сил України”- КОМАНДУВАННЯ СИЛ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ОБОРОНИ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ, 2023.
3. Управління повсякденною діяльністю підрозділів: навч. посібн. / колектив авторів. – К. : НУОУ імені Івана Черняховського, 2021. – 416 с.

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ КАНБАН (ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ)

У сучасних умовах розвитку економіки, глобалізації ринків та зростання конкуренції, ефективне управління запасами є одним із ключових факторів забезпечення стабільної діяльності підприємств. Запаси, з одного боку, гарантують безперервність виробничих і логістичних процесів, а з іншого — потребують значних фінансових ресурсів для їх формування та зберігання. Надлишкові запаси призводять до заморожування оборотного капіталу, зростання складських витрат і ризику морального старіння продукції, тоді як недостатні запаси можуть спричинити зупинку виробництва, зрив термінів виконання замовлень та втрату ділової репутації. У зв'язку з цим підприємства дедалі частіше впроваджують сучасні логістичні системи, орієнтовані на мінімізацію запасів і підвищення гнучкості управління, серед яких важливе місце посідає система КАНБАН.

Система КАНБАН виникла в Японії у 1950-х роках на підприємствах компанії Toyota Motor Corporation як відповідь на необхідність підвищення ефективності виробництва в умовах обмежених ресурсів. Її створення було тісно пов'язане з формуванням виробничої філософії Toyota Production System, що ґрунтується на усуненні всіх видів втрат та безперервному вдосконаленні процесів. Основною ідеєю КАНБАН стало перенесення логіки роботи супермаркетів у виробництво: кожна наступна операція «замовляє» рівно ту кількість продукції, яка їй необхідна в конкретний момент часу. Згодом ця система стала одним із базових інструментів концепції «точно вчасно» (Just-in-Time) та отримала широке поширення у світовій практиці [3].

З позицій логістики система КАНБАН є мікрологістичною системою управління запасами, що функціонує за принципом «витягування» (pull-system). На відміну від традиційних «штовхаючих» систем, де обсяги виробництва формуються на основі прогнозів, КАНБАН орієнтується на реальний попит з боку наступної ланки логістичного ланцюга. Центральним елементом системи є канбан-картка, яка виконує роль інформаційного носія та сигналізує про необхідність виготовлення або переміщення певної кількості продукції. У сучасних умовах дедалі частіше використовуються електронні канбан-системи, інтегровані з ERP- та WMS-системами підприємств [1].

Практичне впровадження КАНБАН передбачає детальний аналіз матеріальних потоків, визначення оптимальних розмірів партій, встановлення мінімальних і максимальних рівнів запасів, а також стандартизацію операцій. Особливу увагу приділяють організації зворотного інформаційного зв'язку між виробничими підрозділами, складом і постачальниками. Ефективність системи значною мірою залежить від стабільності процесів, надійності постачальників і дисципліни персоналу, оскільки будь-яке порушення може призвести до дефіциту матеріалів [1].

Найбільш відомим прикладом практичного застосування КАНБАН є діяльність компанії Toyota, де система використовується для управління потоками деталей між окремими виробничими ділянками. Наприклад, у процесі складання автомобілів кожна ділянка отримує комплектуючі лише після надходження відповідного сигналу від наступної операції. Це дозволило значно скоротити обсяг незавершеного виробництва, зменшити потребу у складських площах та підвищити прозорість матеріальних потоків, що, у свою чергу, позитивно вплинуло на продуктивність праці та якість продукції [3].

Досвід застосування КАНБАН також широко представлений у діяльності інших провідних промислових компаній. На підприємствах Bosch система використовується для координації постачання комплектуючих між центральними складами та виробничими лініями. Завдяки цьому вдалося скоротити страхові запаси, зменшити час простою обладнання та підвищити точність планування матеріальних ресурсів. У компанії Siemens КАНБАН інтегрований у цифрові системи управління виробництвом, що забезпечує оперативний обмін інформацією між підрозділами та дозволяє швидко реагувати на зміни попиту [2].

Особливий інтерес становить використання КАНБАН у високотехнологічних галузях. Так, у компанії Intel система була адаптована для управління потоками електронних компонентів, де критично важливими є не лише обсяги запасів, а й дотримання жорстких термінів постачання. Використання КАНБАН дало змогу зменшити ризики дефіциту матеріалів, підвищити гнучкість виробничих процесів і забезпечити стабільну роботу підприємства навіть за високої складності продукції [2].

В українській практиці система КАНБАН поступово впроваджується на підприємствах машинобудування, харчової промисловості, логістичних центрах і складських комплексах. Найчастіше КАНБАН використовується як перший етап переходу до концепції ощадливого виробництва (Lean Production). Практичний досвід свідчить, що навіть часткове впровадження елементів КАНБАН дозволяє знизити рівень запасів на 20–40 %, скоротити тривалість виробничого циклу та підвищити керованість матеріальних потоків. Так, на окремих виробничих підрозділах ПАТ «Мотор Січ» система

КАНБАН використовується для організації внутрішнього постачання комплектуючих між складом і виробничими дільницями, що дозволяє зменшити обсяги незавершеного виробництва та підвищити ритмічність випуску продукції. У харчовій промисловості елементи КАНБАН застосовуються на підприємствах групи компаній «Оболонь», де система використовується для своєчасного поповнення запасів сировини й пакувальних матеріалів без створення надлишкових складських залишків. Крім того, принципи КАНБАН активно впроваджуються в діяльності українських логістичних операторів і розподільчих центрів, зокрема у складських комплексах мереж «АТБ» та «Сільпо», де система використовується для управління потоками товарів між складом і торговельними залами. Це дозволяє підвищити швидкість обробки товарів, знизити рівень запасів і покращити рівень обслуговування споживачів [1].

Таким чином, система управління запасами КАНБАН є ефективним інструментом мікрологістичного управління, що поєднує простоту реалізації з високою практичною результативністю. Її застосування сприяє оптимізації витрат, підвищенню прозорості логістичних процесів і зростанню конкурентоспроможності підприємств. Практика провідних світових компаній і поступове впровадження КАНБАН в Україні підтверджують доцільність її використання як у виробничій, так і в логістичній діяльності підприємств [1–3].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Система управління запасами КАНБАН у виробництві: BPI Group.
URL: <https://bpi-group.com.ua/classes/sistema-upravlinnya-zapasami-kanban-u-virobnicztvi>
2. Менеджмент. Мікрологістична система KANBAN: Освіта.UA.
URL: <https://osvita.ua/vnz/reports/management/14542>
3. Канбан: Вікіпедія.URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A_%D0%B0%D0%BD%D0_%B1%D0%B0%D0%BD

ВПРОВАДЖЕННЯ АУТСОРСІНГУ ЛОГІСТИЧНИХ ПОСЛУГ В УКРАЇНІ

В умовах висококонкурентного ринку критично важливою компетенцією для суб'єктів підприємництва стає здатність гнучко реагувати на зміни в бізнес-середовищі при мінімальних інвестиціях. Ефективним інструментом досягнення цієї мети виступає аутсорсинг, який передбачає передачу певних бізнес-процесів спеціалізованим компетентним сторонам.

Термін «аутсорсинг» («outsourcing») походить від англійського «outside resource using» – використання зовнішніх ресурсів. У сучасній науковій літературі дефініція аутсорсингу інтерпретується досить широко: від простого перекладання власних завдань на сторонніх виконавців до контрактного делегування складних бізнес-процесів. Ще можна зустріти поняття “контрактна логістика” або “3PL-логістика”, що також означає залучення третьої сторони для виконання логістичних функцій [1].

Світова практика класифікує рівні такої співпраці від 1PL до 5PL (Party Logistics), де зростання рівня означає глибшу інтеграцію провайдера у бізнес-процеси замовника.: Особливої уваги заслуговують: 3PL (Third Party Logistics): Комплексний аутсорсинг. Довгострокова співпраця, що включає перевантаження, обробку вантажів, використання субпідрядників, перевезення, складування, перевалку та надання інформаційних послуг; 4PL (Fourth Party Logistics): Інтегрований аутсорсинг. Провайдер управляє всім ланцюгом постачання, займається проектуванням бізнес-процесів та впровадженням ІТ-технологій.

Процес становлення ринку логістичного аутсорсингу в Україні бере свій початок у 1990-х роках, еволюціонуючи від фрагментарних послуг перевезення до комплексних рішень. Безумовними лідерами на українському ринку послуг за популярністю є транспортні перевезення, які готові делегувати зовнішнім виконавцям 94% українських підприємств. Також надзвичайно високим є попит на ІТ-технології в логістиці, що становить 86%, та оренду складських приміщень, якою користуються 65% компаній.

Характерною рисою вітчизняного ринку є домінування міжнародних гравців. Серед лідерів галузі провідні позиції займають транснаціональні корпорації, такі як Kuehne + Nagel, DSV Logistics, FM Logistics, Raben та DB Schenker. Водночас національний сегмент представлений меншою кількістю

потужних операторів, серед яких варто виділити компанії Zammler, Pakline Logistics, UVK, та «Логістик-Плюс».

Якщо у світі з 2012 року на аутсорсинг передається більше половини обсягу логістичних послуг у вартісному вираженні, а провайдери трансформуються у віртуальних логістичних інтеграторів, то на вітчизняному ринку домінують 2PL-оператори, 75% виробників працюють саме за цією схемою.

В умовах воєнного стану та загальної економічної нестабільності, що призводить до зменшення доходів та платоспроможності, український бізнес змушений фокусуватися на ефективному використанні наявних ресурсів задля збереження конкурентоспроможності. Одним із ключових інструментів виживання та адаптації стало впровадження аутсорсингу логістичних послуг — передача функцій перевезення, зберігання та митного оформлення зовнішнім провайдерам (3PL та 4PL операторам).

По-перше, критичним фактором стало різке зростання вартості енергоресурсів. Вимушена переорієнтація на імпорт пального з країн Європейського Союзу (ЄС) призвела до значного здорожчання транспортної складової у собівартості продукції.

По-друге, логістична галузь переживає гостру кризу людського капіталу. Дефіцит кваліфікованих кадрів зумовлений комплексом демографічних та міграційних факторів: мобілізація чоловічого населення, виїзд жінок з дітьми за кордон та внутрішня міграція. У сукупності ці фактори роблять утримання власної логістики (інсорсинг) надмірно витратним.

Найбільш драматичних змін зазнав морський транспорт, який до 2022 року був основним каналом експорту. Блокування чорноморських портів та зупинка традиційних контейнерних ліній призвели до колапсу налагоджених ланцюгів постачання.

У секторі залізничних перевезень аутсорсинг набув критичного значення через необхідність перевезення великих обсягів вантажів, які раніше транспортувалися морем. Оскільки залізниця залишилася одним із найнадійніших видів сполучення, бізнес почав масово делегувати логістичним компаніям функції експедирування та взаємодії з «Укрзалізницею» та іноземними залізничними операторами.

Аутсорсинг автомобільних перевезень став інструментом виживання для багатьох підприємств, оскільки утримувати власний автопарк стало економічно недоцільним. Особливої популярності набули збірні вантажі (LTL), коли провайдер консолідує товари різних замовників в одній машині. Це дозволяє клієнтам платити лише за місце в кузові, а не фрахтувати цілу фуру, що в умовах зниження купівельної спроможності є критично важливим.

Суттєвого удару зазнала складська інфраструктура, яка є невід'ємною частиною контрактної логістики. Внаслідок бойових дій було знищено понад 400 000 квадратних метрів складських площ, що спровокувало дефіцит та міграцію логістичних хабів у західні регіони України [2]. Це змусило компанії переходити від моделей довгострокового зберігання до технологій крос-докінгу.

Окремо варто виділити аутсорсинг у сфері зовнішньоекономічної діяльності (ЗЕД). Блокування портів та переорієнтація на західні кордони ускладнили митні процедури. Логістичні провайдери взяли на себе роль митних брокерів, забезпечуючи правильне оформлення транзитних декларацій Т1 та сертифікатів походження EUR.1.

Суттєвим фактором розвитку ринку стала цифровізація та ІТ-інтеграція. Аутсорсинг тепер неможливий без надання доступу до систем WMS (система управління складом) та TMS (система управління транспортом). Технологічною відповіддю на виклики воєнного часу та недовіру до аутсорсингу стає встановлення на транспортні засоби GPS-трекери, датчики, використання Центру керування IoT. IoT-пристрої можуть збирати інформацію про стан вантажу, що дуже допомогло при транспортуванні вантажів під час військового стану, та передають інформацію через бездротове з'єднання, використовуючи M2M SIM-карти [3].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що правильно спланований логістичний аутсорсинг (особливо рівнів 3PL-5PL) є не просто способом зниження витрат, а стратегією виживання бізнесу в умовах воєнного стану та фундаментом для його швидкого відновлення у післявоєнний період. Таким чином, логістичний аутсорсинг в умовах війни перетворився з інструменту оптимізації витрат на ключовий механізм забезпечення безперервності бізнесу та національної економічної безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Scientific opinions on modern methods of solving problems: collective monograph / International Science Group. Boston: Primedia eLaunch. 2023. 345 p. C. 38–41. URL: https://www.researchgate.net/profile/Vlada-Zaichko/publication/374589977_SCIENTIFIC-OPINIONS-ON-MODERN-METHODS-OF-SOLVING-PROBLEMS_1/links/652675a8bc063850eab5888f/SCIENTIFIC-OPINIONS-ON-MODERN-METHODS-OF-SOLVING-PROBLEMS-1.pdf#
2. Матеріали XVI-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту». 2023. 396 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/375715532_Materiali_HVI_Miznarodnoi_naukovo-prakticnoi_konferencii_Sucasni_tehnologii_ta_perspektivi

3. Kyivstar business hub – корпоративний блог для бізнесу від Київстар, розповідають про різні види вирішення проблем в логістиці. URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/logistyka-v-period-vijny-vyklyky-ta-rishennya>

УДК 656.01

Каплуновська А.М.¹ Обертінська В.О.²

¹ старш. викл.каф. ТТ НУ “Запорізька політехніка”

² студ.гр. Т-314 НУ “Запорізька політехніка”

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РИНКУ ТРАНСПОРТНИХ ПОСЛУГ ПІД ЧАС ВОЄННОГО СТАНУ: ЦИФРОВІЗАЦІЯ ТА ЕКОЛОГІЧНІ СТАНДАРТИ

Незважаючи на складні умови воєнного часу, Україна продовжує інтеграцію до європейського транспортного простору, що передбачає виконання вимог екологічної безпеки. Впровадження стандартів Європейського Союзу сприяє зменшенню негативного впливу транспорту на навколишнє середовище та підвищенню ефективності використання ресурсів.

Одним із ключових екологічних напрямів є перехід на транспортні засоби, що відповідають стандартам Євро-5 та Євро-6. Такі транспортні засоби характеризуються нижчим рівнем викидів шкідливих речовин та більш високою паливною ефективністю. Впровадження екологічних стандартів сприяє не лише зменшенню шкідливих викидів, але й підвищенню конкурентоспроможності українських перевізників на міжнародному ринку [5].

У рамках реформування транспортної галузі значну увагу приділяють розвитку альтернативних джерел енергії. Використання електротранспорту та транспортних засобів на альтернативному паливі поступово стає одним із перспективних напрямів розвитку галузі [2]. У великих містах України активно впроваджуються електробуси та зарядні станції для електромобілів, що сприяє зменшенню рівня забруднення повітря.

Важливим напрямом державної політики є реформування ринку пасажирських перевезень. Уряд проводить заходи, спрямовані на підвищення якості транспортних послуг та забезпечення рівного доступу до них для всіх громадян. Одним із ключових елементів реформ стало створення відкритих конкурсів на маршрути, що дозволяє підвищити конкуренцію між перевізниками та покращити якість обслуговування пасажирів.

Суттєві зміни відбулися також у сфері контролю за діяльністю перевізників. Впровадження електронних систем моніторингу дозволило забезпечити більш ефективний контроль за виконанням умов ліцензування та дотриманням правил перевезень. Це сприяє підвищенню рівня безпеки та зменшенню кількості порушень у сфері транспортних послуг [7].

Особливу роль у функціонуванні транспортного ринку під час воєнного стану відіграє розвиток логістичних центрів. Переміщення значної частини виробничих підприємств у безпечніші регіони сприяло створенню нових логістичних вузлів. Такі центри забезпечують консолідацію вантажів, їх сортування та подальше транспортування до кінцевих споживачів.

Одним із викликів, з якими зіткнулася транспортна галузь, стала нестача кваліфікованих кадрів. Значна частина працівників була мобілізована або змушена змінити місце проживання. Це призвело до необхідності підготовки нових спеціалістів та впровадження програм професійного навчання.

У сучасних умовах важливу роль відіграє інтеграція українського транспортного ринку до європейської транспортної системи. Укладення міжнародних угод сприяло спрощенню процедур перетину кордонів та розвитку міжнародних перевезень. Це дозволило забезпечити стабільність експорту та імпорту навіть у складних умовах воєнного часу.

Не менш важливим фактором розвитку транспортного ринку є впровадження інноваційних технологій. Використання безпілотних транспортних засобів, автоматизованих складів та систем штучного інтелекту відкриває нові можливості для підвищення ефективності логістичних процесів [10]. Хоча повномасштабне впровадження таких технологій в Україні ще перебуває на початковому етапі, їх використання має значний потенціал для майбутнього розвитку галузі.

Таким чином, функціонування ринку транспортних послуг під час воєнного стану характеризується високим рівнем адаптивності та впровадженням нових технологічних рішень. Цифровізація логістичних процесів, впровадження екологічних стандартів та реформування ринку пасажирських перевезень сприяють підвищенню ефективності транспортної системи та створюють передумови для її подальшого розвитку.

Підсумовуючи викладене, можна зробити висновок, що сучасний ринок транспортних послуг в Україні функціонує в умовах постійних викликів, пов'язаних із воєнним станом. Водночас впровадження цифрових технологій, розвиток екологічних стандартів та проведення державних реформ створюють можливості для модернізації транспортної галузі та підвищення її конкурентоспроможності на міжнародному рівні.

У післявоєнний період очікується подальший розвиток транспортної інфраструктури, інтеграція до європейського ринку та зростання ролі інновацій у сфері транспортних технологій [4].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про транспорт : Закон України від 10.11.1994 № 232/94-ВР.: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр> (дата звернення: 10.04.2026).
2. Про автомобільний транспорт : Закон України від 05.04.2001 № 2344-ІІІ.: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14> (дата звернення: 10.04.2026).
3. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 № 430-р.: <https://zakon.rada.gov.ua/go/430-2018-%D1%80> (дата звернення: 10.04.2026).
4. Про затвердження операційного плану реалізації у 2025–2027 роках Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року : Постанова Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 № 1550-п.: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1550-2024-%D0%BF> (дата звернення: 10.04.2026).
5. Стратегічні документи транспортної галузі : вебсайт / Міністерство розвитку громад та територій України.: <https://mindev.gov.ua/pro-nas/stratchiia> (дата звернення: 10.04.2026).
6. Розвиток громадського транспорту України в контексті транспортної стратегії. Економіка та суспільство. 2022. № 39.: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/4860> (дата звернення: 10.04.2026).
7. Аналітичні матеріали щодо оновлення транспортної стратегії України : репозитарій НУ «Одеська юридична академія».: <https://dspace.onua.edu.ua/items/a3d5167e-a92e-4b9c-bd58-ea8d3a1e956f> (дата звернення: 10.04.2026).
8. Транспорт і зв'язок України : статистична інформація / Державна служба статистики України.: <https://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 10.04.2026).
9. Transport and Environment Report : official website / European Commission.: <https://transport.ec.europa.eu> (дата звернення: 10.04.2026).
10. Аналітичні матеріали щодо розвитку транспорту та логістики України : вебсайт / Міністерство інфраструктури України.: <https://mtu.gov.ua/content/strategiya-2015.html> (дата звернення: 10.04.2026).

ВОДЕНЬ ЯК ПАЛИВО ДЛЯ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Впровадження водневих паливних елементів у сегменті вантажних автомобілів великої вантажопідйомності (див. рис. 1) є важливим кроком глобальної стратегії декарбонізації транспортної галузі. Традиційні акумуляторні рішення стикаються з серйозними фізичними та економічними обмеженнями при експлуатації на дальніх дистанціях.

Основна перевага водневих технологій полягає у високій енергетичній щільності паливної системи порівняно з літій-іонними батареями: для забезпечення запасу ходу магістральної фури на 800-1000 км вага необхідних акумуляторів може сягати 5-7 тонн, що критично зменшує корисну вантажопідйомність транспортного засобу [2]. На противагу цьому, воднева система, що складається з композитних балонів та паливних елементів, важить значно менше, дозволяючи перевізникам зберігати високу ефективність експлуатації без втрати тоннажу.

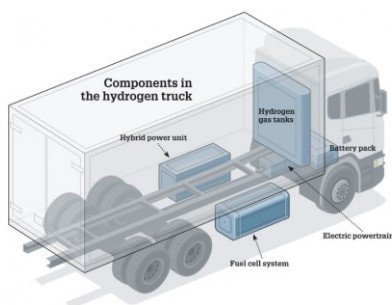


Рисунок 1 – Схема розташування водневих паливних елементів на вантажному автомобілі [1]

Процес перетворення енергії у таких вантажівках базується на хімічній реакції між воднем та киснем всередині паливного стека, результатом якої є електричний струм, тепло та звичайна водяна пара, що робить транспорт повністю екологічним у місці експлуатації. Важливою перевагою над чистими електромобілями є швидкість заправки, яка триває лише 15-20 хвилин [3], що практично відповідає стандартам дизельних аналогів і

дозволяє уникати тривалих простоїв у логістичних циклах. Крім того, водневі установки демонструють значно вищу стійкість до низьких температур, забезпечуючи стабільний запас ходу взимку, тоді як ефективність акумуляторів у морози суттєво падає.

Проте масове впровадження водневого транспорту наразі стримується низкою інфраструктурних та економічних бар'єрів, серед яких найгострішими є висока вартість будівництва заправних станцій та необхідність масштабування виробництва саме «зеленого» водню, отриманого з відновлюваних джерел. Незважаючи на те, що загальний ККД циклу «виробництво - транспортування - споживання» у водню нижчий, ніж у прямих електромобілів [4], він залишається єдиним життєздатним рішенням для важкої техніки, де час і вантажопідйомність мають вирішальне значення.

Сучасний ринок уже демонструє перехід від концептуальних розробок до серійного виробництва, де такі лідери як Volvo, Daimler та Hyundai активно тестують прототипи, здатні долати понад 1000 км на одній заправці рідким воднем. Очікується, що завдяки державним субсидіям та створенню мережі водневих коридорів уздовж головних транспортних артерій, ця технологія стане основним інструментом для трансконтинентальних перевезень, тоді як акумуляторні електричні вантажні автомобілі зосередяться на регіональній та міській доставці. Таким чином, водень виступає не конкурентом, а необхідним доповненням до електрифікації, забезпечуючи стійкість логістичних систем у майбутньому безвуглецевому світі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Scania. Як працює електрична вантажівка на водневих паливних елементах? [Електронний ресурс]. URL: <https://www.scania.com/ua/uk/home/about-scania/newsroom/news/2021/how-does-a-hydrogen-fuel-cell-electric-truck-work.html> (дата звернення: 29.03.2026).
2. omEV. Analysis of advanced battery-electric long haul trucks. [Електронний ресурс]. URL: <https://omev.se/2019/09/26/analysis-of-advanced-battery-electric-long-haul-trucks/> (дата звернення: 03.04.2026).
3. TankTransport. Positive Momentum: Nikola Hydrogen Trucks Lead Zero-Emission Market With 5 Key Breakthroughs. [Електронний ресурс]. URL: <https://tanktransport.com/2025/01/nikola-hydrogen-trucks-2024/> (дата звернення: 05.04.2026).
4. Transport & Environment. Hydrogen's role in transport. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.transportenvironment.org/discover/how-efficient-are-electric-and-hydrogen-cars-really/> (дата звернення: 07.04.2026).

УДК 656.078

Тарасенко О. В.¹, Обертінська В. О.²

¹старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

²студ. гр. Т-314 НУ «Запорізька політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РОЗВИТКУ АВТОМОБІЛЬНОГО РИНКУ ЄВРОПИ

Ще 30 років тому перед майбутнім автовласником стояв вибір, автомобіль з яким силовим агрегатом обрати, на якому пальному: дизель, бензин або ГБО. Зараз під час купівлі нового автомобіля майбутній водій робить вибір перед більш широким діапазоном силових агрегатів: крім традиційних двигунів внутрішнього згорання на ринку в наявності результати розвитку технологій автомобілебудування: електромобілі, гібриди, плагін-гібриди, автомобілі з водневим двигуном.

Сучасні транспортні засоби стрімко трансформуються. Зараз автомобіль це вже не просте «залізо на колесах», а більше цифровий продукт. Відповідно, ринок автомобільних транспортних засобів ланцюговою реакцією зазнає значних змін від потужного впливу електричних автомобілів, поглиблення цифровізації транспортних засобів та впровадження більш жорстких екологічних нормативів у більшості країн Європи.

Проаналізуємо динаміку змін структури ринку автомобілів на прикладі Європи. В останні роки європейський автомобільний ринок суттєво змінився: частка дизельних та бензинових автомобілів зменшилася, а електромобілів — стрімко зросла, зробив їх лідерами продаж в багатьох країнах.

Основна причина змін у обсягах продаж - поява нових доступних електромобілів. У той час як продажі машин з бензиновими і дизельними двигунами продовжують знижуватися, загальне зростання забезпечують саме електрифіковані моделі.

У 2025 р. реєстрація нових легкових автомобілів у Європі (ЄС, Велика Британія та ЄАВТ) зросла на 2,4% порівняно з 12,96 млн за 2024 р., а європейський автомобільний ринок вперше з 2019 року перевищив 13,3 мільйонів продажів [1].

Реєстрації електромобілів (BEV), плагін-гібридів (PHEV, із зарядкою від мережі), і гібридів (HEV, з батареєю, яка заряджається під час руху) значно зросли. На них тепер припадає вже близько двох третин усіх продажів у ЄС - ще рік тому їхня частка складала менше 60 %.

За підсумками обсягів продаж за 2025 р., 26,6% усіх нових автомобілів, зареєстрованих у Європейському Союзі, працюють на бензині, тоді як дизельні автомобілі складають 8,9% реєстрацій. 26,8% нових легкових

автомобілів у ЄС – це транспортні засоби з електричною зарядкою (17,4% електромобілів + 9,4% плагін-гібридів із підзарядкою від мережі), тоді як «чисті» гібриди становлять 34,5% від загального обсягу продажів автомобілів. Наведена нижче діаграма показує тенденції у використанні типів пального для нових автомобілів за період 2019-2025 років (рис. 1) [2].

Аналіз змін автомобільного ринку Європи за типом джерела живлення (2019-2025) показує, що з 45-50% ринку у 2016-2017 р. р. (2019 р. – 31%) дизельні автомобілі значно втратили, але їх частка різко зменшилася до 11,9% у 2024 р. та 8,9% за 2025 р., що було зумовлено скандалами та політикою щодо викидів. Бензин ще один великий в минулому тип ДВЗ, який втратив позиції від 58% частки у 2019 р., до 26,6% у 2025. Зафіксовано стрімке падіння обсягів продажу автомобілів з бензиновим ДВЗ, причому у грудні 2025-го вони вперше поступилися електрокарам за підсумками продаж.

Продажі гібридів (переважно HEV) зросли з 5,7% у 2019 р. до приблизно 30,9% у 2024 році та на 34,5% у 2025 році, ставши найкращим вибором покупців. Плагін-гібриди (PHEV) зросли з незначних 1,1% у 2019 р. до 9,4% у 2025 році, причому за рік зафіксовано зростання обсягів їх продажу на 33%. У поєднанні з чистими електромобілями (BEV), частка електромобілів досягла 61,3% до 2025 року. Частка електромобілів (BEV) різко зросла з 1,9% у 2019 році до 17,4% у 2025 році (2,58 млн одиниць, зростання на 29,7% за 2025 р.) [3].

Значна зміна структури продаж нових автомобілів на автомобільному ринку Європи ланцюгом починає змінювати логістику і транспортні системи. Електромобілі впливають не лише на структуру ринку, але й на логістичні процеси, виробництво, інфраструктуру та економіку.

Електрифікація транспорту впливає на логістичні процеси на всіх етапах життєвого циклу автомобіля. Автовиробники змінюють структуру виробництва, переходячи на модульні електричні платформи. Зростає попит на літій, кобальт, нікель та рідкісноземельні метали, що змінює глобальні ланцюги постачання. Зростає потреба у спеціалізованому транспортуванні батарей, які є небезпечним вантажем. Це потребує нових стандартів упаковки, зберігання та перевезення.

Розвиток електричної мобільності стимулює створення зарядних станцій, енергетичних мереж та цифрових платформ управління транспортом.

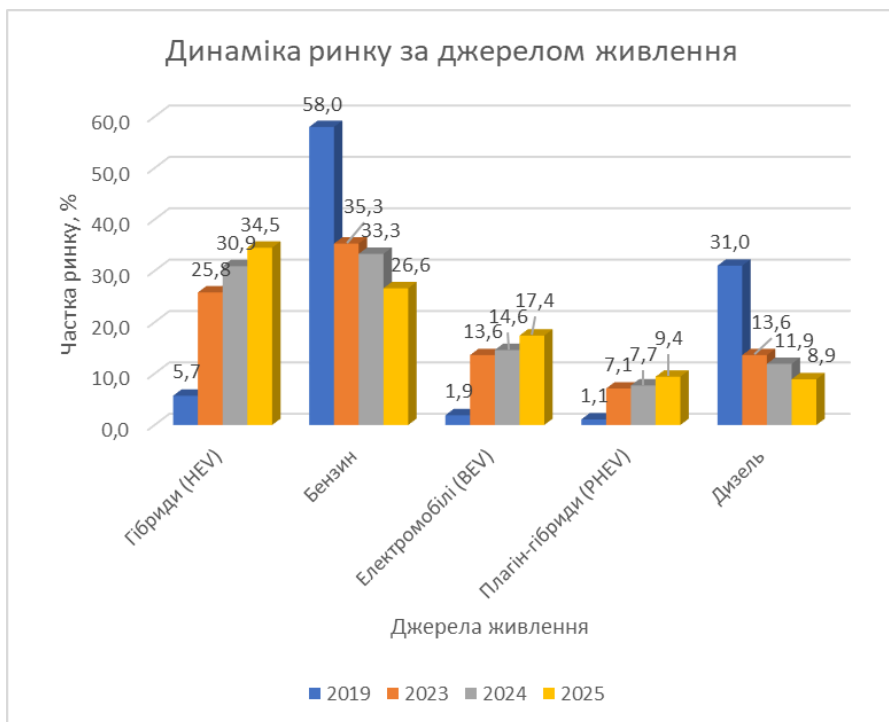


Рисунок 1 – Динаміка ринку за джерелом живлення [2]

Висновок: Автомобільний ринок Європи перебуває у фазі масштабної трансформації, основним каталізатором якої є електромобільність. Аналіз динаміки продажів показує значне зростання частки електрифікованих транспортних засобів та скорочення частки автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння. Очікується, що у перспективі електрифікація транспорту стане ключовим фактором сталого розвитку транспортної системи Європи. Експерти прогнозують, що до 2035 року продаж нових автомобілів з ДВЗ у ЄС буде значно обмежено або заборонено. Електромобілі та гібриди стануть основним видом легкового транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 2025 (повний рік) Європа: аналіз продажів автомобілів та європейського ринку. URL: <https://www.best-selling-cars.com/europe/2025-full-year-europe-car-sales-and-european-market-analysis/>

2. Економічний та ринковий звіт: Світова та європейська автомобільна промисловість – повний 2025 рік. URL: <https://www.acea.auto/publication/economic-and-market-report-global-and-eu-auto-industry-full-year-2025/>

3. New Electric Passenger Vehicle Registrations by European Country in 2025. URL: <https://www.reportlinker.com/market-report/Electric-Vehicle/>

УДК 352:656.078

Тарасенко О. В.¹, Фукалова О. О.²

¹старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Т-324 НУ «Запорізька політехніка»

ПЛАН СТАЛОЇ МІСЬКОЇ МОБІЛЬНОСТІ ЯК СУЧАСНА КОНЦЕПЦІЯ ПЛАНУВАННЯ МІСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Розуміння необхідності економії ресурсів, впровадження програм, спрямованих на боротьбу зі змінами клімату призвели до того, що уряди багатьох країн почали шукати шляхи більш ефективного використання транспортних засобів, покращення транспортного обслуговування населення з мінімізацією експлуатаційних витрат. Так, ЄС ще з 2005 р. систематично працював над створенням конкурентоспроможної та ресурсно-ефективної європейської транспортної системи. Наприкінці 2013 р. було опубліковано Пакет міської мобільності, де Європейська Комісія визначила в додатку концепцію планів сталої міської мобільності.

Так що таке План сталої міської мобільності та чим він відрізняється від традиційного транспортного планування?

План сталої міської мобільності (ПСММ) — це стратегічний документ, розроблений для задоволення потреб людей і бізнесу в мобільності в містах та їхніх околицях для покращення якості життя. ПСММ базується на принципах інтегрованого планування залучення громадськості та пріоритеті екологічних видів транспорту. Його мета — підвищити якість життя забезпечивши доступність безпеку екологічність та ефективність переміщень для всіх верств населення [1].

На відміну від традиційного транспортного планування, ПСММ базується на таких ключових принципах:

Планування для людей, а не для автомобілів: тобто основний фокус планування зміщується з розбудови дорожньої інфраструктури для машин на забезпечення зручного пересування мешканців.

Комплексний підхід: Планування охоплює всі види транспорту поєднуючи їх у єдину систему, а також інтегрується з містобудівною

політикою. Передбачається об'єднана робота різних підрозділів міської влади (транспорт, екологія, землекористування, соціальна сфера) для узгодження спільних дій.

Співпраця та залучення громадськості: Крім місцевої влади, планується активне залучення місцевих мешканців та інших зацікавлених сторін (стейкхолдерів) на всіх етапах розробки та впровадження плану. Очікується активна участь громадян бізнесу та громадських організацій на всіх етапах розробки та впровадження.

Охоплення функціональної міської зони: Планування виходить за межі адміністративних кордонів міста, враховуючи потреби агломерації та приміських територій. Особливо треба відмітити глибоку синергію міста з приміськими громадами.

Визначення довгострокового бачення та чіткого плану дій: План зазвичай розробляється з візією на 10 років та включає детальний графік реалізації заходів на найближчі 4 роки.

Моніторинг та оцінка: Регулярний збір даних та аналіз ефективності впровадження заходів для коригування стратегії за потреби. Регулярний контроль показників ефективності (екологія, безпека, доступність) для корекції плану.

Оцінка всіх видів транспорту: Рівноцінна увага приділяється пішому та велосипедному руху, громадському транспорту, вантажним перевезенням та новим формам мобільності. Причому, перевага надається пішохідному руху, велосипедам та громадському транспорту, а не приватному автомобілю.

Спостерігається зміна підходу до транспортного планування в академічній сфері та плануванні [2].

З оглядом на досвід європейських міст, які вже активно впроваджують ПСММ та отримують позитивні результати в сфері зменшення викидів та зниження рівня аварійності, частина крупних населених пунктів України вже розробила ПСММ та розпочала поетапне його впровадження, але більшість – лише на початку цього шляху. Наприклад, ПСММ Львова був затверджений ухвалою Львівської міської ради 13.02.2020 та почав впроваджуватися [3].

У Запоріжжі 26.01.2022 тільки було оголошено про початок розробки ПСММ міста Запоріжжя. 10 лютого 2022 р., буквально за 2 тижні до початку повномасштабного вторгнення в рамках розробки ПСММ м. Запоріжжя стартувало опитування експертного середовища. Метою опитування є визначення основних викликів; напрацювання пропозицій щодо визначення стратегічних цілей розвитку міської мобільності; напрацювання заходів і потенційних проєктів для їх досягнення [4].

Таким чином у фахівців в сфері транспорту роботи з розробки та повноцінного впровадження ПСММ м. Запоріжжя ще попереду. Треба готувати майбутніх магістрів транспорту змісту та особливостям

впровадження Плану сталої міської мобільності, спираючись на досвід європейських міст, які вже активно його впроваджують та отримують позитивні результати.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sustainable urban mobility plan as one of the tools of management of urban transport systems URL: <https://www.researchgate.net/publication/380204741>
2. Guidelines for developing and implementing a sustainable urban mobility plan second edition, 2019. URL: https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/system/files/2023-09/sump_guidelines_2019_second%20edition.pdf
3. План розвитку електромобільності Львівської міської територіальної громади. URL: https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2024/06/240422_Lviv_E-Mobility_Plan-2s.pdf
4. ПСММ м. Запоріжжя. URL: <https://zet.zp.ua/novyny/334-pro-plan-staloji-miskoji-mobilnosti-mista-zaporizhzhya>

УДК 656.032

Кузькін О.Ф.¹

¹ проф. НУ «Запорізька політехніка»

ОЦІНКА ГРАНИЧНОЇ ВЕЛИЧИННИ ТАРИФУ НА ПОСЛУГИ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ НА ПРИМІСЬКИХ ТА МІЖМІСЬКИХ АВТОБУСНИХ МАРШРУТАХ

Механізм та порядок формування тарифів на послуги з перевезення пасажирів на автобусних маршрутах загального користування регламентується Методикою розрахунку тарифів на послуги пасажирського автомобільного транспорту, затвердженою наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 17.11.2009 № 1175. Ця методика є обов'язковою для застосування під час встановлення регульованого тарифу органами виконавчої влади та місцевого самоврядування на послуги пасажирського автомобільного транспорту і носить рекомендаційний характер під час формування вільних тарифів на ці послуги. При цьому державне і муніципальне регулювання тарифів на пасажирські автомобільні перевезення скасовано постановою КМУ від 25.04.2015 р. № 240, якою внесені зміни до додатку постанови Кабінету Міністрів України від 25.12.1996 р. № 1548 «Про встановлення повноважень органів виконавчої влади та виконавчих органів міських рад щодо регулювання цін (тарифів)». Крім іншого, що п. 1.6

згаданої методики передбачає необхідність перегляду рівня тарифів у зв'язку зі зміною умов виробничої діяльності та реалізації послуги з перевезення пасажирів, що не залежать від господарської діяльності перевізника, в тому числі в разі зміни вартості палива більш ніж на 10 %.

Згідно методики, тариф T (грн./пас-км) на послуги з перевезення пасажирів на міжміських та приміських автобусних маршрутах загального користування визначається за формулою

$$T = (S_{\text{п}} + \Pi_{\text{п}}) / W_{\text{п}}, \quad (1)$$

де $S_{\text{п}}$ – планові річна собівартість послуг з перевезення пасажирів, грн. Вона включає в себе усі витрати автотранспортного підприємства (витрати на паливо і мастильні матеріали, шини, акумулятори, ремонт і технічне обслуговування автобусів, заробітну плату та нарахування на неї, адміністративні витрати, загальновиробничі витрати та інше), грн.; $\Pi_{\text{п}}$ – плановий річний прибуток від надання послуг з перевезення пасажирів, грн. При розрахунках тарифу на перевезення пасажирів зазвичай визначається на підставі рівня рентабельності, який встановлюється на рівні 5 ... 15%; $W_{\text{п}}$ – запланована річна транспортна робота на маршруті, пас.-км, яка обґрунтовується перевізником на підставі фактичних показників роботи або встановлюється по результатах обстеження пасажиропотоків на маршруті.

З метою недопущення необґрунтованого збільшення автотранспортними підприємствами-перевізниками тарифу в умовах наявної на маршрутній мережі безальтернативності вибору маршрутів пасажирями у низці населених пунктів, організатори регулярних перевезень зазвичай ініціюють підписання угод з автотранспортними підприємствами-перевізниками, що обслуговують маршрути, щодо встановлення граничного тарифу на перевезення пасажирів. Відповідний граничний тариф на перевезення пасажирів на міжміських та приміських автобусних маршрутах у Запорізькій області у 2022 році було встановлено на рівні 1,50 грн./пас.-км.

На даний час спостерігається стрімке зростання цін на паливо, відповідно зростають витрати автотранспортних підприємств практично за усіма статтями витрат. Дохідна частина автотранспортних підприємств є складно прогнозованою через суттєву міграцію населення та зміни у транспортній рухливості в Україні внаслідок воєнного стану та бойових дій. За таких умов пропонується визначати граничну величину тарифу на послуги з перевезення пасажирів за формулою

$$T_1 = T_0 \times k_3, \quad (2)$$

де T_0 – значення граничного тарифу на послуги з перевезення пасажирів до його перегляду, грн./пас.-км; k_3 – коефіцієнт збільшення граничного тарифу на послуги з перевезення пасажирів, що враховує збільшення

експлуатаційних витрат перевізників протягом періоду між переглядами граничного тарифу. Останній враховує збільшення окремих складових собівартості перевезень та визначається за формулою

$$k_3 = 1 + 0,01 \times (L_{\text{пм}} \times \Delta_{\text{пм}} + L_{\text{зп}} \times \Delta_{\text{зп}} + L_{\text{ін}} \times \Delta_{\text{ін}} + R), \quad (3)$$

де $L_{\text{пм}}$, $L_{\text{зп}}$, $L_{\text{ін}}$ – відсоток зростання відповідно вартості палива, мінімальної заробітної плати та інших складових собівартості перевезень на момент перегляду граничного тарифу у порівнянні з базовим роком, %; $\Delta_{\text{пм}}$, $\Delta_{\text{зп}}$, $\Delta_{\text{ін}}$ – частка відповідно вартості палива, заробітної плати та інших складових у собівартості послуг з перевезення пасажирів; R – планова рентабельність перевезень, %.

Розрахунки, проведені на кафедрі «Транспортні технології» для міжміських та приміських автобусних маршрутів Запорізької області станом на квітень 2026 року показали, що коефіцієнт збільшення тарифу, обчислений за (3) по відношенню до базового граничного тарифу, встановленого у 2022 році складає $k_3 = 1,459$ при зростанні вартості палива на 34,9 %, мінімальної заробітної плати на 32,0 % та інших витрат на 65,8 %. Останнє значення визначено як відносне відсоткове збільшення індексу цін виробників промислових товарів за даними Міністерства фінансів України у квітні 2026 року до середньорічного значення базового 2022 року.

УДК 656

Турпак С.М.¹, Іщенко С.О.², Фурсіна А.Д.³

¹ проф. НУ «Запорізька політехніка»

² проф. НУ «Запорізька політехніка»

³ доц. НУ «Запорізька політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ЗА ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНИМ РОЗПОДІЛОМ З ОБМЕЖЕННЯМИ

Одним із сучасних та перспективних методів моделювання транспортних потоків є імітаційне моделювання. Програмні засоби, за допомогою яких реалізуються різні процеси функціонування транспорту, мають певний інструментарій, користування яким потребує розуміння того, що вкладене розробниками у сенс тих чи інших функцій.

У програмному середовищі Енілоджік для генерації надходження транспортних засобів зручно використовувати елемент типу source, де в полі «Arrivals defined by» можна обрати опцію «Interarrival time» та вказати відповідну теоретичну функцію розподілу цього параметру, або скористатись методом «inject()» та викликати замовлення в source з елементу типу event.

Як відомо, часто процес надходження транспортних засобів, зокрема, составів вантажних поїздів на промислові станції, описується експоненціальним законом із обмеженнями за мінімальним та максимальним значенням. На рисунку 1 наведена діаграма емпіричного розподілу фактичних даних підприємства ПАТ «Запоріжсталь». В даному випадку маємо обмеження мінімальних значень – 2 години, а максимальних – 6 годин. Середнє значення становить 2,86 години.

При використанні вбудованої функцію середовищі Енілоджік `exponential (double min, double max, double shift, double stretch)`, то відбувається відкидання кожного зразка поза інтервалом від мінімуму до максимуму та виконання наступної спроби генерації випадкових чисел. Тобто у разі застосування функції з введенням в якості середнього значення до функції `exponential 2.86` отримаємо в результаті моделювання згенеровані інтервали, середнє значення яких буде значно вищим за 2,86.

Тому в якості середнього значення в функцію необхідно вводити мінімальне значення, а параметр `double stretch` визначати, як різницю між середнім та мінімальним значенням.

За таких умов отримуємо достатньо адекватні результати генерації, що цілком відповідають параметрам вихідного емпіричного розподілу.

Тобто в нашому випадку, функція приймає вид: `exponential(2.0, 6.0, 2.0, 0.86)`.

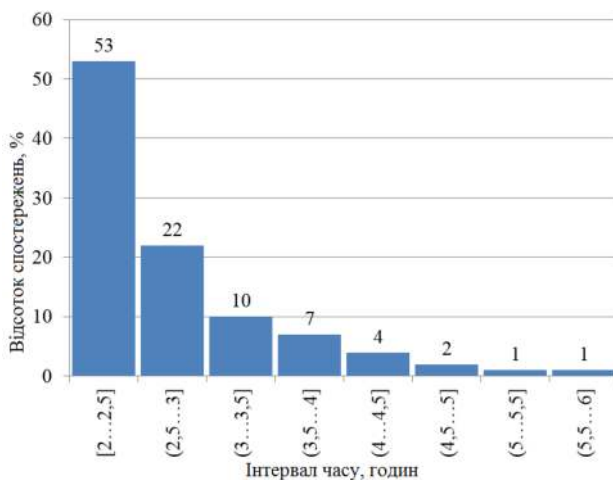


Рисунок 1 – Діаграма емпіричного розподілу фактичних даних надходження поїздів на промислову станцію

Отримані результати можуть бути використані при моделюванні транспортних потоків за експоненціальним розподілом з обмеженнями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Турпак С.М. Логістичні системи управління залізничним транспортом металургійних підприємств : монографія. Херсон : Грінь Д. С., 2015. 264 с.

2. Серeda Б.П., Турпак С.М., Кругляк І.В., Острогляд О.О., Муковська Д.Я., Серeda Д.Б., Кругляк Д.О. Підвищення експлуатаційної стійкості та ефективності роботи промислового транспорту в умовах металургійного підприємства : монографія. Кам'янське : ДДТУ, 2021. 272 с.

УДК 656.13

Трушевський В.Е.¹

¹канд. техн. наук., доц. НУ «Запорізька політехніка»

НЕДОЛІКИ ПОФАЗНОГО МЕТОДУ ФОРМАЛІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

З метою забезпечення автоматизації процесів під час розробки та запровадження проектів організації дорожнього руху, що містять режими світлофорного регулювання, розробляються та нормуються певні стандартні підходи до їх формалізації.

Наприклад, можна порівняти зміну сигналів за напрямками регулювання №8 та №10, що застосовується на перехресті Соборного просп. та Фортечної вул. м. Запоріжжя (табл. 1 та рис. 1). Формально напрям №10 не включений до другої фази регулювання, натомість, напрям 8 – включений.

Таблиця 1 – Структура циклу світлофорного регулювання

Фаза	Напрями регулювання
1	1, 2, 5, 6
2	1, 5, 7
3	3, 4, 7, 8, 9, 10

Аналогічне подвійне тлумачення можливе навіть для визначень «основний такт» та «проміжний такт», оскільки протягом одного інтервалу у циклі регулювання для однієї з послідовностей може тривати ефективний час, а для іншої – втрачений, оскільки включені до перехідних інтервалів зелені додаткові сигнали та ранні старту передбачають таку можливість.

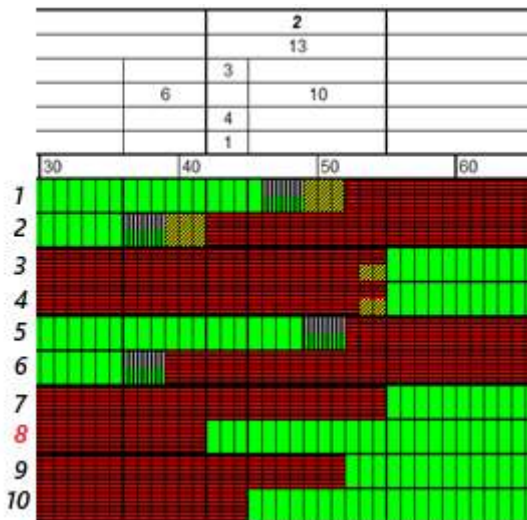


Рисунок 1 – Фрагмент циклограми світлофорного регулювання

Універсальним способом уникнення таких ускладнень під час формалізації складних режимів світлофорного регулювання є повна відмова від пофазного принципу із переходом на керування світлофорною сигналізацією за окремими напрямками регулювання.

Такий перехід був би абсолютно логічним і обґрунтованим, як мінімум з двох причин:

- у діючій редакції національного стандарту ДСТУ 4092:2024 обов'язковою нормою приписане застосування матриці тривалостей конфліктів під час проєктування світлофорної сигналізації;

- апаратні можливості дорожніх контролерів вже з початку 2000-х років налаштовані виключно на каналне керування сигнальними групами без релейного поділу циклу регулювання на основні такти та перехідні інтервали, як це було, наприклад в контролері УК-2.

Однак, базовим підходом до формалізації режимів світлофорного регулювання, судячи з редакції національного стандарту ДСТУ 4092:2024, лишається пофазний. З огляду на це, для забезпечення можливості введення фаз регулювання, у яких в базовій циклограмі дозволяючі сигнали певних напрямків регулювання введено лише до перехідного інтервалу, пропонується змінити нормативні вимоги ДСТУ 4157-2003 в частині діапазону тривалостей основних тактів регулювання, дозволивши нульову тривалість основного такту.

СЕКЦІЯ «ТЕОРЕТИЧНА І ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА»

УДК 621.316.13

Скребцов А.А.¹, Омельченко О.С.²,

Кононенко А.В.³, Омельченко О.В.³

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

³ асп. «Запорізька політехніка»

ВПЛИВ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРИ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА РОЗРАХУНОК ГРАНИЦІ МІЦНОСТІ

Титанові сплави є критично важливими для аерокосмічної, автомобільної та медичної промисловості. Розвиток порошкової металургії вимагає уточнення методики розрахунку деталей з урахуванням особливостей структури матеріалів з порошків. В академічному курсі опору матеріалів гіпотеза суцільності передбачає, що матеріал не містить пор і традиційна формула розрахунку границі міцності не включає в себе площу пор. Проте матеріали, отримані з порошків, завжди мають у своїй структурі пори різних форм та розмірів, які виступають концентраторами напружень. Одним із таких матеріалів є конструкційний титановий нелегований сплав ВТ1-0. Механічні характеристики такого сплаву загалом відповідають литому аналогу.

Для отримання сплаву ВТ1-0 використовували термомеханічний порошок титану ПТ5 у стані постачання. Пресування зразків проводилося під тиском 700 МПа. Спінання здійснювали у вакуумі при температурі 1250 °С із витримкою впродовж 3 годин. Аналіз мікроструктури виконували за допомогою оптичного мікроскопу. Кількісну оцінку пористості проводили лінійним методом Розівалія. Вимірювання мікротвердості здійснювали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 0,49 Н.

Аналіз мікроструктури литого сплаву ВТ1-0 показав наявність зерен розміром 150-200 мкм із пакетами паралельних пластин. Структура спеченого порошкового сплаву була представлена зернами α -фази та порами різної конфігурації. Пори розташовувалися переважно по межах зерен. Середній розмір зерен не перевищував 100 мкм. Частка пор за площею шліфа – 13 %. Середній розмір пор не перевищував 60 мкм. Тобто, єдиною суттєвою відмінністю порівнюваних сплавів є саме пористість.

Титанові сплави, що отримують з порошку ПТ5 мають збільшений вміст домішок (кисню, заліза та ін.). Відомо, що кожні 0,1% кисню підвищують міцність титанового сплаву на 100 МПа. Якби спечений сплав не містив пор і мав суцільну структуру, його міцність могла би досягти значень

у 450-500 МПа за рахунок легування киснем. Проте наявність 13% пор зменшує фактичну площу зразка. Випробування на міцність при розтяганні показали, що межа міцності порошкових зразків склала 330,5 МПа, що на 45,5 МПа нижче за межу міцності литого титану, яка становила 376,0 МПа. При цьому встановлено зниження рівня пластичності спечених сплавів, що обумовлене насиченням матеріалу азотом, киснем і воднем.

Тобто, при використанні порошкового сплаву реальна площа поперечного перерізу буде меншою на величину площі пор. Таким чином, фактичний негативний вплив пористості на зменшення значення міцності значно перевищує позитивний ефект від легування киснем. Вплив пористості на значення границі міцності є багатовимірним і потребує врахування форми пор, їхніх розмірів, наявності гострих кутів та об'ємного фактору.

УДК 669.2

Ланін В.Ю.¹, Доновський І.О.¹, Кононенко А.В.¹,

Скребцов А.А.², Кононенко Ю.І.³

¹ асп. «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

³ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

ПОЛІПШЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПРЕСУВАННЯ ТА СПІКАННЯ ТИТАНОВИХ ПОРОШКІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ AEROSIL®

Високі вимоги до матеріалів в авіакосмічній галузі та медицині зумовлюють необхідність розробки нових перспективних сплавів або вдосконалення технології отримання вже існуючих. Застосування методів порошкової металургії дозволяє виготовляти деталі майже без відходів, що забезпечує суттєву економію сировини. Це є особливо актуальним для дороговартісних виробів із титану та його сплавів.

Основними технологічними етапами порошкової металургії, які визначають формування заготовки, є пресування та спікання. Незадовільне компактування під час пресування призводить до високої залишкової пористості та неоднорідності щільності, що унеможливорює використання таких матеріалів у відповідальних вузлах. Низький ступінь ущільнення часто спричинений недостатньою текучістю порошку, наявністю дефектів частинок, а також порушенням суворих умов його пакування та зберігання (зокрема, через адсорбцію вологи). Знизити чутливість титанових порошків до умов зберігання та покращити їхнє формування можна за допомогою спеціальних допоміжних речовин.

Ефективним рішенням для покращення текучості є використання продуктів лінійки AEROSIL® (виробництва Evonik Industries AG), які являють собою високодисперсний діоксид кремнію (SiO_2). Згідно з рекомендаціями виробника, для істотного підвищення сипкості достатньо ввести мінімальну кількість цієї добавки. Водночас, відповідно до діаграми стану системи Ti-Si, кремній має вкрай обмежену розчинність в титані. Встановлено, що граничною концентрацією, яка не чинить негативного впливу на процеси структуроутворення під час спікання, є 0,2 % діоксиду кремнію.

Для вивчення того, як допоміжна речовина впливає на структуру та властивості пресованих матеріалів, було підготовлено дослідні зразки на основі порошку ПТ5. До вихідної суміші додавали діоксид кремнію у кількості від 0,05 % до 0,2 % із кроком 0,05 %. Процес виготовлення відбувався за класичною технологією порошкової металургії: суміш пресували під тиском 18 т/см³, після чого спікали у вакуумі за температури 1200 °C з ізотермічною витримкою протягом 240 хвилин.

Проводили статистичну обробку результатів вимірювання: діаметру, висоти, усадки лінійних розмірів та об'єму після пресування та спікання. Отримані дані дозволили встановити, що при збільшенні вмісту діоксиду кремнію в порошковій суміші не відбуваються зміни діаметру і висоти. При цьому усадка діаметру зменшується з 2,3 % до 2,1 %, а висоти від 3,0 % до 2,5 %. Критерієм позитивного перебігу процесу спікання є об'ємна усадка зразків. Спостережуване зменшення усадки зі збільшенням вмісту добавки після спікання можна пояснити таким чином. За умов високотемпературного нагріву активізується взаємна дифузія між контактуючими частинками титанового порошку. Інтенсифікація цих дифузійних процесів зумовлює зростання міжчастинкових контактів (формування "шийок"), об'єднання частинок та подальшу рекристалізацію. Однак наявність залишків діоксиду кремнію на поверхні частинок створює бар'єрний прошарок, який перешкоджає безпосередньому контакту між ювенільними поверхнями металу. Відповідно, збільшення концентрації SiO_2 гальмує процеси масопереносу та негативно впливає на величину усадки. Наряду з цим, оцінка дисперсії усадки діаметру показала, що вона збільшується від 0,01 % (при 0,05 % SiO_2) до 0,17 % (при 0,15 % SiO_2), а потім знижується до 0,04 % (при 0,20 % SiO_2). Зміна дисперсії усадки висоти відбувалась за схожою тенденцією: збільшувалась від 0,4 % (при 0,05 % SiO_2) до 1,7 % (при 0,15 % SiO_2), а потім знижувалась до 0,5 % (при 0,20 % SiO_2).

Результати досліджень усадки та її дисперсії дозволяють рекомендувати для поліпшення процесів пресування та спіканні порошку титану ПТ5 Aerosil у концентрації до 0,05 %.

УДК 669.2

Ланін В.Ю.¹, Доновський І.О.¹, Лебедєв Р.В.¹,

Скребцов А.А.², Кононенко Ю.І.³

¹ асп. «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

³ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

ПОЛІПШЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПРЕСУВАННЯ ТА СПІКАННЯ ТИТАНОВИХ ПОРОШКІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ SIPERNAT®

Жорсткі вимоги до експлуатаційних характеристик матеріалів в авіакосмічній галузі та медицині зумовлюють постійну потребу в розробці нових перспективних сплавів або оптимізації технологій виробництва вже існуючих. У цьому контексті застосування методів порошкової металургії є надзвичайно ефективним, оскільки дозволяє отримувати вироби з мінімальним припуском на механічну обробку. Така ресурсозберігаюча технологія забезпечує суттєву економію дороговартісної сировини, що є особливо критичним для виробництва деталей із титану та його сплавів.

Визначальними технологічними етапами, які формують структуру та властивості майбутнього виробу, є пресування та високотемпературне спікання. Проте незадовільне компактування на етапі формування призводить до виникнення високої залишкової пористості та градієнта щільності по об'єму заготовки, що обмежує застосування таких матеріалів у високонавантажених відповідальних вузлах. Низький ступінь початкового ущільнення найчастіше зумовлений незадовільною текучістю порошку, морфологічними дефектами його частинок, а також недотриманням жорстких регламентів щодо пакування та зберігання (зокрема, через адсорбцію атмосферної вологи). Ефективним шляхом зниження чутливості титанових порошків до умов зовнішнього середовища та покращення їхньої пресованості є використання спеціальних функціональних добавок таких, як SIPERNAT® виробництва Evonik Industries AG.

Щоб дослідити вплив легуючої добавки на кінцеві властивості та структуру зразків, було виготовлено суміші порошку ПТ5 із діоксидом кремнію. Вміст SiO_2 варіювався від 0,05 % до 0,2 % із кроком 0,05 %. Зразки формували методом порошкової металургії, який включав пресування із зусиллям 18 т/см³ та подальше вакуумне спікання при 1200 °С. Час ізотермічної витримки становив 240 хвилин.

Збільшення вмісту SIPERNAT в порошковій суміші також мало впливає на зміни діаметру та висоти після пресування та спікання. Однак, оцінка усадки показала більш складніший вплив домішки. Найменший (0,05 % SiO_2) та найбільший (0,20 % SiO_2) вміст забезпечує найбільшу усадку діаметру

(2,0 % та 2,2 % відповідно) та висоти (2,4 % та 2,5 % відповідно). Проміжні значення кількості домішки SiO₂ погіршують усадки. Наряду з цим, оцінка дисперсії усадки діаметру показала, що вона стрімко збільшується від 0,01 % (при 0,05 % SiO₂) до 0,14 % (при 0,15 % SiO₂), а потім знижується до 0,07 % (при 0,20 % SiO₂). Дисперсія усадки висоти нелінійно зменшувалась від 1,9 % (при 0,05 % SiO₂) до 1,0 % (при 0,20 % SiO₂).

Результати досліджень усадки та її дисперсії дозволяють рекомендувати для поліпшення процесів пресування та спікання порошку титану ПТ5 використання SIPERNAT у кількості 0,05 % та 0,20 %.

УДК 62-272

Ryagin S.¹, Onyshchenko R.², Chernenko D.³

¹ PhD, Assistant professor, NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

² PhD student, NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

³ student of the group M-614, NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

COMPARISON OF APPROACHES TO THE OPTIMIZATION OF SPRING ELEMENTS IN MACHINES

Springs are widely used in mechanical engineering as elements for storing and transmitting mechanical energy and for load compensation in mechanical systems. Since such components usually operate under cyclic loading and high stress levels, the rational selection of their geometric parameters significantly affects the reliability, durability, and dimensions of engineering structures.

Traditional spring design relies mainly on standard design solutions and empirical relationships, which do not always provide an optimal combination of mass, stiffness, and strength characteristics. Therefore, the application of optimization methods is an important task in the design of spring elements.

Various optimization approaches are used in engineering practice. Parametric optimization is based on varying geometric parameters while preserving the structural topology and is widely applied due to its relatively low computational cost. Shape optimization focuses on improving stress distribution by modifying the geometry of elements. Topology optimization determines the rational distribution of material within a given design space and is mainly applied at the conceptual design stage. In addition, heuristic global search methods, including genetic and evolutionary algorithms, can be used for complex optimization problems.

The analysis shows that the design of spring elements generally represents a multi-criteria optimization problem, since several performance indicators must be considered simultaneously, including mass, overall dimensions, stiffness, and stress state.

Therefore, the authors propose the application of multi-criteria parametric optimization for the design of spring elements. The proposed approach includes several stages: development of a parametric model and selection of design variables; definition of objective functions and constraints; analysis of the stress–strain state using analytical or numerical methods; and determination of rational parameter values providing a compromise between multiple performance criteria.

The proposed method allows simultaneous consideration of structural and operational requirements and can be applied to the optimal design of various spring systems in mechanical engineering.

УДК 531

Безгінов Г.Г.¹, Кружнова С.Ю.², Шалева Н.В.³

¹ студ. гр. М-314 НУ «Запорізька політехніка»

² старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

³ асист. НУ «Запорізька політехніка»

ДО ПИТАННЯ ПРО КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВАЖІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ

Досліджуються особливості використання аналітичного методу кінематичного аналізу важільних механізмів. Важільні механізми набули широкого поширення. Вони використовуються не тільки для переміщення вантажів вантажопідіймними кранами, а також як механізми маніпуляторів та автооператорів, трансформовані щогли мобільних комплексів зв'язку. У більшості важільні механізми відрізняються компактністю у складеному стані та великим діапазоном переміщень, мають шарнірно-важільні механізми з ідентичними напластованими дволанковими групами Ассура з приводом поступального руху.

В процесі проектування таких механізмів постає питання працездатності механізму загалом, причому з погляду як забезпечення міцності окремих його частин, а й взаємодії частин і вузлів у процесі роботи, для чого найчастіше використовується кінематичний аналіз.

Кінематичний аналіз – необхідний етап розробки нових машин та покращення роботи існуючих. Величини кінематичних характеристик механізму (переміщення, швидкість, прискорення) потрібні як для визначення положення механізму, так і для подальшого динамічного дослідження.

Якщо розглядати загальні методи рішення таких задач, в якості універсальних для любого механізму, можна виділити два їхні різновиди:

метод замкнутих контурів, який запропонував В.А Зінов'єв;

метод перетворення координат, який запропонував Ю.Ф.Морошкін.

Перший метод більш зручний для кінематичного дослідження плоских механізмів, другий – для просторових.

Зміст завдання кінематичного аналізу важільних механізмів полягає у визначенні функцій положень перших та других передаточних функцій ланок (їх узагальнених координат) у вигляді функції від узагальненої координати вхідної ланки, рух якої рахується завданням.

Незалежно від класу важільного механізму визначення першої і другої передаточних функцій зазвичай зводиться до рішення системи лінійних рівнянь і, як правило, не викликає труднощів. Рішення задачі про положення ланок механізму залежить від класу важільного механізму: для механізму другого класу, незалежно від кількості ланок, ця задача вирішується у явному вигляді, для важільних механізмів вищих класів – істотно ускладнюється.

Сьогодні на допомогу проведення кінематичного аналізу важільних механізмів приходять нові, досконаліші інструменти. Пропонується розглянути застосування обчислювального блоку «Given-Find» сучасної прикладної комп'ютерної програми MathCAD.

Об'єктом дослідження є просторовий багатоланковий шарнірно-важільний механізм, ступінь волі механізму дорівнює 1. У конструкції механізму закладено чотири зайві зв'язки. При створенні математичної моделі досліджуваного механізму приймаємо позначення всіх вихідних та розрахункових параметрів. Складаємо алгоритм проведення кінематичного аналізу, який дозволить виконати комп'ютерне моделювання кінематичних схем багатоланкових шарнірно-важільних механізмів числовим методом з використанням обчислювального блоку «Given-Find». Отримані результати моделювання можуть бути використані при кінематичному дослідженні різних механізмів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. Підручник. Київ: Наукова думка. 2002. 660 с.

2. Булгаков В.М., Черниш О.М., Адамчук М.Г. Теорія механізмів і машин. Підручник для студентів закладів вищої освіти. Київ: ЦУЛ. 2020. 608 с.

УДК 621.791

Shevchenko V.¹, Shumykin S.², Ryagin S.², Onyshchenko R.³

¹ PhD, Head of the Department, NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

² PhD, Assistant professor, NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

³ PhD student, NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

MECHANICAL PROPERTIES OF METAL OF CAST PARTS OF COMPLEX SHAPE FOR GAS TURBINE UNITS

Heat-resistant, complex-alloyed nickel-based casting alloys are widely used to manufacture hot-gas tract components for gas turbine units. However, cast components face the challenge of structural inhomogeneity due to the development of liquation during alloy crystallization, leading to instability in the metal properties of different sections of the components. Achieving uniform structures is particularly challenging when casting turbine blades, which have complex airfoil profiles of varying thicknesses and voids due to the different crystallization conditions of the airfoil metal and the massive locking section. Therefore, studying the structure and properties of the metal in different sections of the airfoil and locking section of cast components is of interest.

This study investigated the microstructure and metal properties of cast rotor blades for gas turbines at compressor stations. The parts were manufactured from a heat-resistant, complex-alloyed nickel alloy, type X16H70, using investment casting in a vacuum. After casting, they underwent standard heat treatment, including high-temperature homogenization and process aging.

Metallographic studies of the microstructure of the airfoil metal compared to the blade key metal revealed significant differences. The airfoil metal exhibits a fine-grained structure with grain sizes of 1–3 mm, while the key metal has grains measuring 5–8 mm. Furthermore, the airfoil grains have a columnar structure and are oriented perpendicular to the airfoil walls. In the thinner upper sections of the airfoil, these columnar grains intersect. In the thicker lower sections, a small number of small equiaxed grains are present between them. The blade key metal exhibits only large equiaxed grains.

To determine the mechanical properties, small-sized flat specimens with a working cross-section of 1.5x4.0 mm² were manufactured, based on the possibility of fabricating them from blade airfoils. Mechanical tests for long-term strength at 850 °C and a load of 320 MPa showed that the airfoil metal has a significantly shorter time to failure (60...85 h) compared to the metal of the locking section (80... 40 h), which is likely due to the columnar grain structure of the airfoil metal with unfavorable grain orientation. Short-term strength tests at 850 °C showed that the yield strength and tensile strength of the airfoil and locking section metal are

identical; at the same time, the plastic properties of the airfoil metal are somewhat higher, but have a significantly greater spread of values.

Thus, the blade airfoil metal has inferior properties compared to the locking section metal due to its unfavorable grain structure. Clearly, by controlling the solidification of the part during casting, it is possible to improve the properties of the most heavily loaded working section.

УДК 656:620.17

Турпак С.М.¹, Фурсіна А.Д.²

¹ д-р техн. наук, проф., зав. каф. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПРОБЛЕМИ МІЦНОСТІ НЕСУЧИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНИХ ПРИЧЕПІВ

Сучасний розвиток транспортної галузі супроводжується підвищенням вимог до надійності та довговічності причіпних систем. Особливого значення набуває забезпечення міцності несучих конструкцій, які працюють в умовах складного поєднання статичних і динамічних навантажень. Нерівномірність дорожнього покриття та змінний характер експлуатаційних впливів спричиняють виникнення значних напружень і прискорене втомне руйнування елементів рами. У зв'язку з цим актуальним є розроблення та вдосконалення методів розрахунку, що дозволяють адекватно оцінити напружено-деформований стан і ресурс таких конструкцій.

Сучасні транспортні причеми експлуатуються в умовах підвищених динамічних навантажень, що обумовлено зростанням швидкостей руху, нерівномірністю дорожнього покриття та збільшенням маси перевезених вантажів. У таких умовах несучі системи, зокрема рамні конструкції, працюють у складному напружено-деформованому стані, який визначається сумісною дією статичних і випадкових динамічних навантажень.

Запропоновано підхід до оцінювання напружено-деформованого стану рамних конструкцій із використанням методу кінцевих елементів та спектрального опису дорожніх нерівностей.

Аналіз експлуатаційних відмов показує, що руйнування рам має переважно втомний характер і виникає внаслідок циклічних змін напружень. Вплив дорожнього покриття враховується через спектральну щільність потужності мікропрофілю відповідно до стандарту ISO 8608 [1].

Розрахунок виконується методом кінцевих елементів у середовищі ANSYS Mechanical [2]. Перехід до частотної області здійснюється з

урахуванням швидкості руху, що дозволяє сформувати вхідні кінематичні збурення для розрахункової моделі.

Рама дискретизована на 109 вузлів, у яких зосереджуються маси та прикладаються навантаження. Масова модель формується з урахуванням власної маси рами та маси вантажу. Для підвищення адекватності моделювання вантаж розподіляється нерівномірно в межах платформи. Втомна довговічність оцінюється на основі лінійної гіпотези накопичення пошкоджень.

Результати чисельного моделювання показують, що максимальні напруження виникають у середній частині лонжеронів та в зонах конструктивних концентраторів. Урахування динамічних навантажень призводить до збільшення еквівалентних напружень на 30–80% порівняно зі статичним розрахунком, що суттєво впливає на прогноз ресурсу.

Таким чином, застосування методу кінцевих елементів у поєднанні зі спектральним описом дорожнього збурення дозволяє адекватно оцінити напружено-деформований стан і довговічність несучих систем транспортних причепів та визначити ефективні шляхи підвищення їх надійності.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що динамічні навантаження є визначальним фактором формування напружено-деформованого стану несучих систем транспортних причепів. Застосування методу кінцевих елементів у поєднанні зі спектральним описом дорожніх нерівностей дозволяє більш точно оцінити розподіл напружень і виявити критичні зони конструкції. Встановлено, що врахування нерівномірного розподілу вантажу та динамічних впливів призводить до суттєвого зростання еквівалентних напружень і зниження ресурсу. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій причепів та підвищення їх експлуатаційної надійності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ ISO 8608:2023 Механічна вібрація. Профіль дорожнього покриття. Звітність про виміряні дані (ISO 8608:2016, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=102504
2. Загоруйко А.В. Програмний комплекс ANSYS в інженерних задачах: навч. посіб. Суми: Вид-во СумДУ, 2008. 201с.

ВПЛИВ ЗМІЩЕНЬ ТВІРНОГО КОНТУРУ НА ТОВЩИНИ ЗУБІВ ПО КОЛАХ ВЕРШИН ЦИЛІНДРИЧНИХ ПРЯМОЗУБИХ КОЛІС

У монографії [1] наведено формули для діаметра кола вершин $D_{A\lambda}$ і товщини зуба по колу вершин $S_{A\lambda}$ циліндричного евольвентного прямозубого колеса із зовнішніми зубами. Символ λ в нижньому індексі величини позначає її відношення до прямозубого колеса λ ($\lambda=1$ – ведуче, $\lambda=2$ – ведене). Зазначені формули ми можемо подати в такому вигляді:

$$D_{A\lambda} = m \cdot (Z_{\lambda} + 2 \cdot (h_A^* + X_{\lambda} + k_{sh})), \quad (1)$$

$$S_{A\lambda} = D_{A\lambda} \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot Z_{\lambda}} + \frac{2 \cdot X_{\lambda}}{Z_{\lambda}} \cdot \tan \alpha_0 + \tan \alpha_0 - \alpha_0 - \tan \alpha_{A\lambda} + \alpha_{A\lambda} \right), \quad (2)$$

де Z_{λ} і X_{λ} – число зубів і коефіцієнт зміщення твірного контуру для прямозубого колеса λ ; m – модуль зачеплення; $\alpha_{A\lambda}$ – значення в радіанах кута профілю для точок евольвент на вершинах зубів цього колеса; α_0 – значення в радіанах кута профілю твірного контуру; h_A^* – коефіцієнт висоти головки твірного контуру; k_{sh} – коефіцієнт укорочення головок зубів коліс (за європейською термінологією).

Підставивши у формулу $\cos \alpha_{A\lambda} = D_{B\lambda} / D_{A\lambda}$ вираз (1) для діаметра кола вершин і вираз $D_{B\lambda} = m \cdot Z_{\lambda} \cdot \cos \alpha_0$ для діаметра основного кола [1], ми отримали [2] формулу для кута профілю $\alpha_{A\lambda}$ в наступному вигляді:

$$\alpha_{A\lambda} = \arccos \left(\frac{Z_{\lambda} \cdot \cos \alpha_0}{Z_{\lambda} + 2 \cdot (h_A^* + X_{\lambda} + k_{sh})} \right). \quad (3)$$

Добуток $(X_{\lambda} \cdot m)$ є величиною зміщення твірного контуру для прямозубого колеса λ . Коефіцієнт k_{sh} визначають таким чином [1]:

$$k_{sh} = \frac{a_{w12}}{m} - \frac{Z_1 + Z_2}{2} - X_{\Sigma}, \quad (4)$$

де a_{w12} – міжосьова відстань пари прямозубих коліс; X_{Σ} – коефіцієнт

суми зміщень твірного контуру для цієї пари коліс.

Пара циліндричних евольвентних прямозубих коліс із зовнішнім зачепленням при визначених величинах Z_1 , Z_2 , m , a_{w12} має певні значення кута зачеплення α_w і коефіцієнта X_Σ , які розраховують [1] за формулами:

$$\alpha_w = \arccos\left(\frac{m \cdot (Z_1 + Z_2)}{2 \cdot a_{w12}} \cdot \cos \alpha_0\right), \quad (5)$$

$$X_\Sigma = \frac{(\tan \alpha_w - \alpha_w - \tan \alpha_0 + \alpha_0) \cdot (Z_1 + Z_2)}{2 \cdot \tan \alpha_0}. \quad (6)$$

Коефіцієнти X_1 та X_2 для цих коліс пов'язані між собою так: $X_2 = X_\Sigma - X_1$. Тоді з формул (1)–(6) випливає, що для такої пари прямозубих коліс товщини зубів по колах вершин S_{A1} і S_{A2} можна розглядати як функції від коефіцієнта зміщення X_1 твірного контуру ведучого колеса. При цьому, чим більше значення коефіцієнта X_1 та відповідно менше значення коефіцієнта X_2 , тим меншою буде товщина S_{A1} і більшою буде товщина S_{A2} . Значення коефіцієнтів X_1 та X_2 більше впливають на товщину зубів по колу вершин у того прямозубого колеса пари, в якого число зубів менше. В інтенсивно навантажених прямозубих передачах товщини зубів по колах вершин ведучого та веденого коліс мають бути більшими, ніж $(0,4 \cdot m)$. Під час проектування прямозубої передачі, при виборі значень коефіцієнтів зміщення твірного контуру X_1 та X_2 , обов'язково необхідно перевіряти виконання цієї вимоги із застосуванням формул (1)–(6). Наприклад, у нашій статті [2] зазначену вимогу було враховано при визначенні діапазонів відповідних раціональних значень для коефіцієнтів X_1 та X_2 за критерієм підвищення тривалості роботи прямозубої передачі до досягнення допустимого значення товщини зношеного шару.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Linke H., Borner J., Heb R. Cylindrical Gears. Calculation, Materials, Manufacturing. Munich: Carl Hanser Verlag, 2016. 848 p.
2. Попович О.Г., Шевченко В.Г. Раціональні зміщення твірного контуру коліс циліндричної прямозубої передачі для зменшення зношування зубів. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2024. № 3. С. 48–57.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DESIGNS OF SPECIAL TECHNOLOGICAL CONTAINERS FOR CHEMICAL HEAT TREATMENT

Special technological containers for chemical heat treatment (STC for CHT) operate under severe service conditions including high temperatures (up to 950–1050 °C), cyclic thermal loads, mechanical stresses and aggressive process atmospheres. During heating and subsequent quenching of workpieces, significant temperature gradients arise in the container structure, leading to thermomechanical stresses and thermal fatigue. At temperatures close to 1000 °C the creep resistance of the material also becomes an important factor determining the service life of the container.

Cast containers allow the implementation of geometries close to optimal from the standpoint of thermal stress distribution. Smooth section transitions and the absence of welded joints reduce stress concentrations during thermal cycling. Cast Fe–Cr–Ni heat-resistant alloys also demonstrate good creep resistance at high temperatures. However, cast structures are typically heavier and may contain casting defects.

Welded containers manufactured from rolled heat-resistant steels can be designed as thin-walled structures, which significantly reduces their mass and improves the mass utilization factor. At the same time, welded joints and heat-affected zones represent structural heterogeneities that may reduce high-temperature strength and increase crack susceptibility under thermal cycling.

Modern developments include modular and hybrid STC for CHT designs. In hybrid systems, a cast load-bearing frame may be combined with lightweight welded or mesh modules. Such an approach allows the integration of high structural strength with reduced mass and improved openness of the container structure, which enhances heat and mass transfer.

The analysis shows that the most promising direction is the development of open-type hybrid STC for CHT, combining cast supporting elements with replaceable lightweight modules and enabling the future use of ceramic or composite components with high resistance to high-temperature chemical environments.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПЛОСКИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Представлений алгоритм визначення реакцій зовнішніх та внутрішніх в'язей плоского шарнірно-важільного механізму.

Для визначення реакцій механізм розчленовується на окремі ланки та зображуються реакції зовнішніх і внутрішніх в'язей кожної ланки.

Застосовуючи до кожного тіла механізму теорему про рух центру мас (у проекціях на осі координат) та теорему про зміну кінетичного моменту (для кривошипів відносно осей обертання, для шатунів відносно осей, що проходять через центр мас) можна отримати систему рівнянь, які дозволять визначити всі невідомі реакції опорної площини та диференціальне рівняння руху механізму.

Вирішення поставленого завдання зводиться до чисельного інтегрування диференційного рівняння руху механізму та вирішення системи лінійних рівнянь алгебри щодо невідомих динамічних реакцій зовнішніх і внутрішніх в'язів.

Задача інтегрування диференційного рівняння пов'язана з великою кількістю попередніх обчислень і може бути умовно розбита на п'ять блоків:

- вирішення системи рівнянь геометричних в'язей або обчислення геометричних співвідношень;
- обчислення кінематичних співвідношень;
- обчислення зведеного моменту інерції механізму $J_{зв}(\varphi)$ та зведеного моменту зовнішніх сил $M_{зв}(\varphi, \dot{\varphi})$;
- обчислення похідної від зведеного моменту інерції по куту повороту ведучої ланки $J'_{зв}(\varphi)$;
- чисельне інтегрування диференційного рівняння.

Все це може бути виконано в Mathcad декількома способами, що використовують різні вбудовані процедури-функції. Відмінність цих способів і методів полягає у часі обчислень, який потрібний для знаходження: рішення системи рівнянь геометричних в'язів, зведеного моменту інерції механізму $J_{зв}(\varphi)$ та його похідної $J'_{зв}(\varphi)$, зведеного моменту зовнішніх сил $M_{зв}(\varphi, \dot{\varphi})$, а також рішення диференційного рівняння руху.

Для інтегрування системи рівнянь при заданих початкових умовах використовуємо вбудовану пакет Mathcad процедуру-функцію *rkfixed*, що реалізує метод Рунге-Кутта і має вид:

$$rkfixed(u, T_0, T_k, N, D),$$

де $u = \begin{bmatrix} \varphi(0) \\ \dot{\varphi}(0) \end{bmatrix}$ – вектор початкових умов;

T_0, T_k – граничні точки інтервалу пошуку рішення диференційного рівняння.

Початкові умови, що задані у векторі U – це значення рішення в точці T_0 ; N – число точок (не враховуючи початкової точки), в яких шукаємо наближене рішення. За допомогою цього аргументу визначається число рядків $N + 1$ в матриці, що повертається функцією $rkfixed$; $D(t, U) = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}(t, U) \\ \dot{\omega}(t, U) \end{bmatrix}$ – вектор, елементами якого є кутова швидкість та кутове прискорення маховика, що визначаються рівняннями.

Матриця, яка отримується в результаті рішення, містить три стовпці. Перший – для значень часу t , другий – для значень кута повороту $\varphi(t)$, третій – для значень кутової швидкості $\dot{\varphi}(t)$.

Рішення системи лінійних рівнянь алгебри для знаходження динамічних реакцій зовнішніх і внутрішніх в'язів складнощів не викликає і виконується будь-яким з методів реалізованих у Mathcad.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Онищенко С.В., Колосов Д.Л. Розв'язання задач динаміки в середовищі MathCAD. Методичні рекомендації до самопідготовки студентів (практикум) з розділу «Динаміка» дисципліни «Прикладна механіка» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 132 «Матеріалознавство». Дніпро: Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка», 2023. 34 с.
2. Штанько П.К., Шевченко В.Г., Омельченко О.С., Дзюба Л.Ф. Пасіка В.Р., Поляков О.М. Теоретична механіка. Навчальний посібник. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 464 с.

УДК 531.1

Кружнова С.Ю.¹, Шалева Н.В.²,

¹ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² асист. НУ «Запорізька політехніка»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИКИ ПЛОСКИХ МЕХАНІЗМІВ НА ОСНОВІ ВЕКТОРНО-КОНТУРНОГО МЕТОДУ

Об'єктом кінематичного дослідження є плоскі багатоланкові шарнірно-важільні механізми з одним ступенем свободи, для яких відомі всі геометричні розміри та закон руху ведучої ланки.

$$\varphi(t) = \omega_0 \cdot t$$

Положення будь-якої ланки механізму може визначатися параметрами: кутом φ_k щодо будь-якої координатної осі або координатами X_k та Y_k .

Плоский шарнірно-важільний механізм зображується у довільному положенні. Як система відліку приймається права декартова система координат. Початок системи координат розташовується в осі підшипника провідної ланки, а кути повороту ланок спрямовані проти годинникової стрілки.

Кути повороту ланок φ_k , $k = 1, 2, 3 \dots$ відраховуються від горизонтальної осі у позитивному напрямку.

Для складання рівнянь геометричних зв'язків виділяються точки механізму, траєкторії яких відомі. Так як закон плоскопаралельного руху твердого тіла можна визначити по двох будь-яких точках цього тіла. Як базові точки, при складанні рівнянь геометричних зв'язків, приймемо дві точки плоскої ланки. З двох точок, що одночасно належать кривошину, одна є залежною, тобто визначення закону руху однієї точки призводить до можливості визначення закону руху для іншої.

Для цих точок будують векторні контури, за допомогою яких можна скласти рівняння геометричних зв'язків. Для отримання рівнянь геометричних зв'язків записується векторні співвідношення у проекціях на осі координат O_x і O_y .

Отримана система представляє замкнуту систему рівнянь визначення законів руху ланок багатоланкового механізму.

Рішення системи рівнянь можна знайти різними методами, як аналітичними, так і чисельними.

Рівняння дозволяють визначити кутові координати ланок. Кутові та лінійні швидкості ланок механізму визначаються диференціюванням за часом рівнянь геометричних зв'язків. Система рівнянь є лінійною відносно невідомих кутових і лінійних швидкостей ланок, тому її можна представити у матричній формі:

$$A \cdot X_v = B,$$

де A – матриця коефіцієнтів лівих частин рівнянь;

X_v – вектор невідомих кутових і лінійних швидкостей ланок;

B – вектор правих частин рівнянь.

Рішення рівняння має вигляд:

$$X_v = A^{-1} \cdot B.$$

Для визначення лінійних і кутових прискорень ланок механізму двічі про диференціюємо за часом рівняння геометричних зв'язків. Представимо, як і раніше систему рівнянь у матричній формі:

$$A \cdot X_a = C,$$

тут C – вектор правих частин рівнянь.

Рішення рівняння має вигляд:

$$X_a = A^{-1} \cdot C.$$

Співвідношення представляють математичну модель кінематичної поведінки механізму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кошель С.О., Дворжак В. М., Кошель Г.В., Залюбовський М.Г. Кінематичний аналіз складних плоских механізмів вищих класів. Прикладна механіка. 2022. Т. 58. С. 128-142.

2. Штанько П.К., Шевченко В.Г., Омельченко О.С., Дзюба Л.Ф., Пасіка В.Р., Поляков О.М., Теоретична механіка. Навчальний посібник / за ред. Штанька П.К. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 464 с.

Наукове електронне видання
Можна використовувати в локальному та
мережному режимах

ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2026

Транспортний факультет

Збірник тез доповідей щорічної
науково-технічної конференції серед студентів,
викладачів, науковців, молодих вчених та аспірантів

13–17 квітня 2026 року

Один електронний оптичний диск (DVD-ROM); супровідна документація.
Тираж 100 прим. Зам. №496.

Видавець і виготовлювач
Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.