

АВТОШЛЯХОВИК України

— 1'2025 —

КІБЕРБЕЗПЕКА
ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ЇХНІХ
ЗАРЯДНИХ ПРИСТРОЇВ

ДП “ДержавтотрансНДІпроект”
ДП “НІРІ”
НТУ

Науково-виробничий журнал
“Автошляховик України”
Періодичність 4 рази на рік
№ 1 (282) 2025

Заснований у вересні 1960 року
Зареєстрований
14 грудня 2016 року

Свідцтво Міністерства юстиції
України про державну реєстрацію
засобу масової інформації
№22472-12372 ПР серія КВ

Наукове фахове видання
згідно з наказом Міністерства
освіти і науки України
від 10.05.2017 №693

Головний редактор:
Дмитриченко М. Ф.

Заступники
головного редактора:
Горицький В. М.
Новікова А. М.
Безуглий А. О.
Каськів В. І.

Редакційна колегія:
Агєєв В. Б.
Белятинський А. О.
Богомолів В. О.
Бондар Н. М.
Гутаревич Ю. Ф.
Золотарьов В. О.
Клименко О. А.
Колесник Ю. Р.
Криворучко О. М.
Luty Witold
Мержиєвський В. В.
Мозговий В. В.
Нагайчук В. М.
Редзюк А. М.
Сахно В. П.
StereHarz Arnold

Випусковий редактор:
Копаниця І. В.

ISSN 2958-0757

DOI: 10.33868/0365-8392-2025-1-282

Індексується:
Ulrichsweb
CrossRef
Google Scholar
Index Copernicus International
Directory of Open Access Scholarly
Resources (ROAD)

Мови видання: українська
та англійська

ЗМІСТ

Кисловський П. В., Яценко М. М., Яценко В. М. Кібербезпека електромобілів та їхніх зарядних пристроїв	2
Галактіонов М. С., Бредун В. І. Характеристика транспортної інфраструктури Кривого Рогу	8
Пиріг Я. І., Оксак С. В., Ільїн Я. В., Місніченко С. О. Оцінювання технологічної пластичності литих асфальтобетонних сумішей, визначеної різними методами	14
Михалевич М. Г., Шаповаленко В. О. Порівняння вагових та габаритних параметрів легкового автопарку України в контексті бокового удару	23
Завертанний Б. С., Пасов Г. В., Завертанний М. С. Геометричний аналіз проковзування шин авто по дорожньому полотну при неякісному розвалі (куті установки коліс)	29
Крайник Т. Л., Манзяк М. О. Експериментальна оцінка ефективності підвіски автомобіля в умовах бездоріжжя	35
Главацький К. Ц., Біневський М. М., Черкудінов В. Е., Анофрієв П. Г. Пошукові дослідження зубчастої передачі з плавною зміною передаточного числа для автоматичних трансмісій	44
Кашканов А. А., Буряк В. В. Управління ефективністю перевезення зернових культур автомобільним транспортом на основі критеріального підходу	56
Чернега В. Ю. Підвищення ефективності сортування вантажів у логістичному центрі засобами автоматизації	63
Ушаков А. В. Газогенератори минулого... Чи мають перспективу у майбутньому?	68

Редагування: Бойко О. С., Копаниця І. В.
Макетування: Копаниця І. В.

Усі статті проходять двостороннє сліпе рецензування.

За достовірність фактів, цифр, точність імен і прізвищ відповідають автори статей,
за зміст рекламних матеріалів – рекламодавці.
Редакція не завжди поділяє погляди авторів публікацій.
Усі права захищені. Передрук матеріалів можливий лише з дозволу редакції.

Видавець:

ДП “Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут”
Адреса: 03113, Київ, просп. Берестейський, 57, к. 1009 (редакція),
тел. 044 456-30-30, e-mail: ikoranytsya@insat.org.ua
Укомплектовано 31.03.2025

© П. В. Кисловський, заступник завідувача відділу,
ORCID: 0000-0001-8495-7130,
e-mail: pkyslovskyy@insat.org.ua
(ДП «ДержавтотрансНДІпроект»);
© М. М. Ященко, канд. техн. наук, доцент,
ORCID: 0000-0003-2418-1910,
e-mail: nikyaschenko@gmail.com,
(Національний транспортний університет);
© В. М. Ященко, інженер,
ORCID: 0000-0002-3501-6227,
e-mail: vyashchenko@insat.org.ua
(ДП «ДержавтотрансНДІпроект»)

© Petro Kyslovskyy, Deputy Head of Division,
ORCID: 0000-0001-8495-7130,
e-mail: pkyslovskyy@insat.org.ua
(State Road Transport Research Institute);
© Mykola Yashchenko, Ph.D.,
ORCID: 0000-0003-2418-1910,
e-mail: nikyaschenko@gmail.com
(National Transport University);
© Valentyn Yashchenko, Engineer,
ORCID: 0000-0002-3501-6227,
e-mail: vyashchenko@insat.org.ua
(State Road Transport Research Institute)

КІБЕРБЕЗПЕКА ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ЇХНІХ ЗАРЯДНИХ ПРИСТРОЇВ

CYBERSECURITY OF ELECTRIC VEHICLES AND CHARGING SYSTEMS

Анотація. Розглянуто основи роботи комунікаційних систем електромобіля і чинники, що впливають на їхню безпеку. Обґрунтовується використання нових правил щодо стійкості шифрування засобів зв'язку електромобіля та їхні основні недоліки, що можуть призвести до витоку конфіденційної інформації. Оцінюється вплив автовиробників на створення єдиних систем і протоколів щодо взаємодії між електромобілями та зарядною інфраструктурою. Пропонується переглянути стандарти для електромобілів, що підвищить їхню кібербезпеку як єдиної системи, підключеної до споживчих мобільних пристроїв і зарядних станцій.

Ключові слова: електромобіль, зарядна інфраструктура, інтерфейс, комунікаційний стандарт, відкритий протокол заряджання, інфраструктура відкритих ключів, кібербезпека електромобіля.

Abstract. The article shows the basics of communication systems for electric vehicles and charging systems and factors affecting their safety. Electric vehicle has a number of systems for data exchange between electronic control units of the vehicle. This unit's exchange signals, which can be used by hackers to access information through the interfaces that are in the electric vehicle. Charging systems also poses risks to confidential information through unauthorized access to a charging unit. Potential vulnerabilities that can be exploited in case of insufficient protection or charging station are: the combination of short data encryption keys and long periods of their validity; insufficient use of encryption algorithms; using outdated cryptographic algorithms. To increase the safety of the charging infrastructure it: must support the remote change of all passwords; must be able to use certificates issued by the Public Key Infrastructure (PKI); should detect physical tampering by having a cover; must have sufficient memory and processing power. However, the question of information transfer between the electric vehicle and the charging equipment has not been treated sufficiently. Such communication is necessary for the optimization of energy resources and energy production systems so that vehicles can recharge in the most economical and most safely way. It is proposed to review the standards for electric vehicles, which will increase their cyber security as a single system connected to consumers of mobile devices and charging stations. The new communication standard may serve in the future to contribute to the stabilization of the electrical grid as well as to support additional information services required to operate electric vehicles efficiently and economically.

Keywords: electric vehicle, charging infrastructure, charging interfaces, communication standards, open charge point protocol, public key infrastructure, cybersecurity.

Вступ

Збільшення кількості електромобілів на дорогах вимагає ретельного аналізу безпеки як транспортних засобів, так і зарядної інфраструктури. Електромобілі оснащені багатьма електронними блоками керування, датчиками і механізмами, що контролюють системи транспортних засобів. Кожен електронний блок відповідає за керування механічними або електричними компонентами сучасного електромобіля. Значна частина зв'язку між блоками

відбувається через мережу Controller Area Network (CAN). Крім того, блок керування комунікаціями (TCU) надсилає діагностичну інформацію виробнику оригінального обладнання електромобіля. Сучасні електромобілі зазвичай оснащені WiFi, Bluetooth, 4G/5G та іншими видами бездротового зв'язку. Усі перелічені інтерфейси і мережі зв'язку потенційно дозволяють зловмисникам впливати на безпечну роботу транспортного засобу та на його власника.

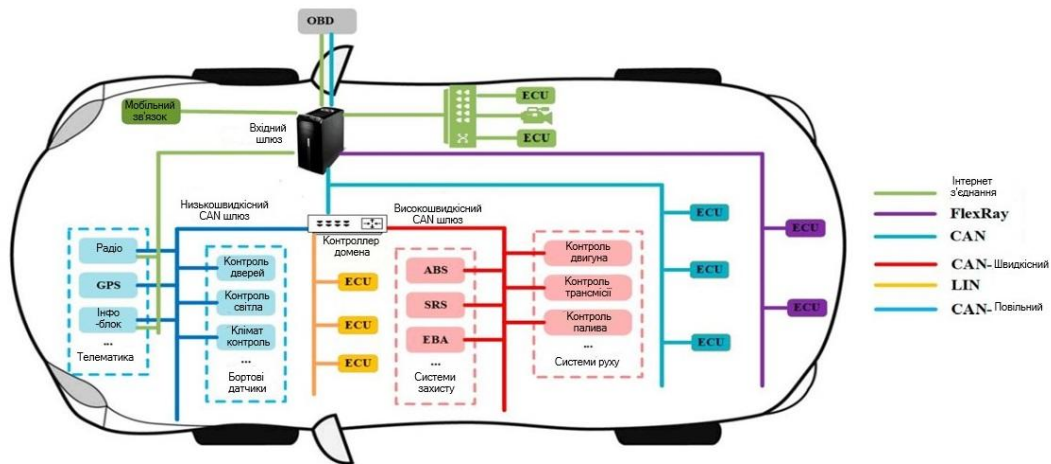


Рис. 1. Види мереж для зв'язку між блоками керування електромобіля

Безпечне заряджання електромобіля також є серйозною проблемою, що пов'язано з різними характеристиками під'єднання, системами авторизації та відмінностями засобів безпеки зарядних пристроїв від різних виробників. Через високу конкуренцію за споживача технічні можливості зарядних пристроїв балансують між функціональністю та сумісністю, вартістю і безпекою.

Подальший розвиток та ускладнення конструкції електромобілів породжують усе нові й нові загрози їхньої безпечної експлуатації. Тому особливу увагу необхідно приділяти безпечній та надійній комунікації електронних засобів електромобіля з навколишнім середовищем. За Правилами № 155 ЄЕК ООН кібербезпека електромобіля – це стан, у якому він та його функції захищені від кіберзагроз, яким можуть піддаватися електричні або електронні компоненти [1].

Основна частина

Для розуміння основних напрямів атаки хакерів необхідно розглянути структуру зв'язку між електронними системами електромобіля, а також їхню електронну взаємодію із зарядними пристроями.

Наслідки атак можуть бути досить руйнівними і за Правилами № 155 ЄЕК ООН охоплюють:

- порушення безпечної роботи або відмову від деяких функцій транспортного засобу;
- модифікацію програмного забезпечення зі зниженням його ефективності;

- порушення цілісності та конфіденційності даних;

- втрату можливості виведення даних;
- інші наслідки, зокрема злочинні дії [1].

Основний зв'язок між блоками керування електромобіля проходить через дроти електронного блока управління ECU (Electronic Control Unit), що з'єднують його компоненти. Цей зв'язок реалізується через мережу контролера CAN (Controller Area Network) і локальну міжсистемну мережу LIN (Local Interconnect Network). CAN є основною мережею електромобіля, яка дозволяє здійснювати швидкісний зв'язок, самодіагностику і виправлення помилок. Мережа LIN є доповненням до мережі CAN. Вона з'єднує між собою меншу кількість блоків керування і пропонує дешевшу реалізацію завдяки нижчій продуктивності та надійності. Мережа LIN може використовуватися для керування двигуном, трансмісією, датчиками і приводами гальм і коліс, кондиціонером, дверима і сидіннями.

Сучасні електромобілі також містять механізми оновлення внутрішнього програмного забезпечення. Ця послуга зазвичай реалізується за допомогою роз'єму зовнішнього пристрою USB або через бездротове підключення до Інтернету. Крім того, сучасний електромобіль має розважальні системи, що можуть розширити можливості небезпечного підключення.

Електромобілі мають, в основному, ту саму побудову, що і транспортні засоби з ДВЗ. Але вони також містять компоненти, що керують зберіганням та накопиченням електроенергії,

генерують електроенергію і виконують рух коліс.

Акумулятор забезпечує потужність, необхідну для роботи компонентів електромобіля. Система керування акумулятором (BMS) регулює вихідний струм, а також заряджання і розряджання акумулятора, зберігаючи його в безпечній робочій зоні. BMS контролює всю батарею в комплекті і вимірює напругу, струм і температуру кожної комірки батареї. Вона має можливість для обмеження напруги для кожної з комірок, у разі, якщо значення перевищують пороги. BMS також вимірює стан заряду і працездатність акумулятора.

Зарядна система перетворює вхідну напругу на постійний струм і передає її на акумулятор для зберігання.

Крім того, вона запобігає можливим пошкодженням батареї або системи живлення, обмежуючи потік електроенергії.

Контролер (CAN) регулює потік струму від батареї до систем електромобіля, отримуючи вхідні дані від водія для керування прискоренням, гальмуванням, режимом водіння і перетворює енергію батареї з постійного струму на змінний.

Всі згадані компоненти повинні обмінюватися повідомленнями між собою, щоб гарантувати правильну роботу електромобіля, що потенційно розширює можливості небезпечного підключення ззовні [2].

Зарядна інфраструктура для електромобіля використовує подібні мережі для заряджання акумулятора, зокрема бездротовим способом. Основними вимогами щодо кібербезпеки зарядної станції є:

- зарядна станція повинна підтримувати дистанційну зміну всіх паролів і ключів, щоб захистити їхню конфіденційність і цілісність;
- використовуючи сертифікати для автентифікації або безпеки зв'язку, зарядна станція повинна мати можливість застосовувати сертифікати, видані інфраструктурою відкритих ключів (PKI) (англ. public key infrastructure);
- зарядна станція повинна мати спеціальну кришку для захисту від фізичного втручання, щоб зломисники без спеціальних інструментів не змогли дістатися до її електронних компонентів, не залишивши видимих слідів;
- зарядна станція повинна мати достатню кількість пам'яті (RAM та флеш-пам'ять), а також обчислювальну потужність, щоб

забезпечити встановлення оновлень безпеки, необхідних протягом усього терміну служби [3].

У процесі дротового заряджання зарядний пристрій обмінюється із зарядною станцією контрольними сигналами, які містять інформацію щодо ємності акумулятора і потужності електромережі.

Зарядні пристрої зі змінним струмом мають низьку потужність і не потребують мереж зв'язку, оскільки не використовують керування напругою. У зарядних пристроях із постійним струмом використовуються розширені можливості управління напругою, що забезпечують мережі CAN або Power Line Communication (PLC). Ці мережі також дозволяють автоматизувати процес виставлення рахунків і завантаження оновлень програмного забезпечення пристрою.

Однофазні зарядні пристрої застосовують п'ятипровідний роз'єм, що має вигляд зарядного пристрою типу SAE J1772 або IEC 62196. Цей роз'єм використовує два дроти для передачі зарядного струму, два – для передачі сигналів і один – для заземлення [4].

Два дроти для сигналів призначені для обміну інформацією з електромобілем під час сеансу заряджання. Сигнали контролюють величину струму, що подається до електромобіля, або використовуються для перевірки стану під'єднання і припинення живлення в разі неналежного фізичного з'єднання із зарядним пристроєм.

Зарядні пристрої, що дозволяють швидке заряджання електромобіля, мають кілька видів. Перший – це модифікація Combined Charging System (CCS) для зарядного пристрою типу SAE J1772 або IEC 62196, який дозволяє заряджатися постійним струмом. Цей вид зарядного пристрою використовує мережу PLC для обміну додатковою інформацією з електромобілем. Другий вид – зарядний пристрій CHAdeMO, який також забезпечує швидке заряджання. Окрім живлення, він дає змогу обмінюватися додатковою інформацією через мережу CAN. Крім того, зарядний пристрій CHAdeMO забезпечує зв'язок Vehicle to Grid, який передбачає використання акумулятора електромобіля як накопичувача енергії для передачі до електромережі під час стоянки. У США для електромобілів Tesla використовують власний, несумісний з іншими видами зарядний пристрій. У КНР використовується

пристрій Chaoji, який є сумісним із видами CCS і CHAdeMO.

Структура надання послуг зарядних станцій передбачає створення окремих операторів галузі. Оператор енергомережі передає напругу до зарядної станції. Оператор зарядної станції – це компанія, яка відповідає за встановлення, управління та обслуговування зарядних станцій. Постачальник послуг у сфері мобільності – це організація, яка надає кінцевому споживачу послуги для пошуку зарядних станцій, ідентифікації споживача та оплати сеансу заряджання, укладаючи договір із водієм електромобіля.

Протокол Open Smart Charging Protocol (OSCP) забезпечує обмін даними між оператором енергомережі та оператором зарядних станцій.

Відповідно, протокол Open Charge Point Interface (OCPI) використовується для обміну даними між оператором зарядної станції та постачальником послуг у сфері мобільності, а також з іншими операторами ринку, яким потрібна інформація про електромобіль. Також протокол OCPI призначений для обміну даними про локації, тарифи, дозволи та операції з оплати заряджання.

Водночас зв'язок електромобіля та зарядної станції передбачає застосування протоколів Open Charge Point Protocol (OSCP) або ISO 15118, які використовують відповідні сертифікати. Для з'єднання користувач електромобіля застосовує кабель, і електромобіль надсилає сертифікати, яким він довіряє. Зарядна станція вибирає один зі своїх сертифікатів і використовує його для початку з'єднання Transport Layer Security (TLS), тобто для криптографічного шифрування. TLS охоплює три основні фази: діалог між сторонами, метою якого є вибір алгоритму шифрування; обмін ключами на основі криптосистем із відкритим ключем; передача даних. Далі електромобіль запитує доказ, що сертифікат зарядної станції все ще дійсний. На перший погляд всі ці операції з алгоритмом шифрування та ключами надійно захищають зв'язок електромобіля та зарядної станції, але, з іншого боку, кожна з них потенційно збільшує ризик несанкціонованого підключення під час заряджання.

Будь-який зарядний пристрій має зв'язок із постачальником послуг задля відстеження сеансів заряджання і збору даних. Найбільш поширеними для використання в галузі є

протоколи OSCP та IEEE 2030.5, але існують й інші види протоколів. Вони застосовують сертифікати для налаштування з'єднання TLS, яке дозволяє захистити клієнт-серверні додатки від перехоплення, редагування або створення підроблених повідомлень. Для взаємної автентифікації кожна зі сторін мусить підтримувати інфраструктуру відкритих ключів PKI.

Технологія PKI полягає у використанні двох математично пов'язаних цифрових ключів, що мають таку властивість: один ключ може бути використаний для шифрування з'єднання, яке може бути розшифровано тільки за допомогою другого ключа. Навіть якщо відомий один ключ, за допомогою обчислень практично неможливо визначити другий. Тут діє принцип банківської комірочки – один із ключів відкритий для всіх, а інший має приватний характер і зберігається в захищеному місці. Інфраструктура відкритих ключів передбачає, що сторони в обміні даними покладаються на центри сертифікації. Поки що не створено єдиного органу зі зберігання ключів, але над проблемою працюють такі автомобільні концерни, як BMW AG, Groupe Renault, Porsche AG, Stellantis, Volkswagen AG.

Основний варіант для побудови структури PKI полягає в тому, щоб мати лише один довірений сертифікат, яким керує учасник ринку, галузева асоціація або нейтральна організація державного рівня. Зараз уже існує кілька незалежних PKI. Технічно найпростіший спосіб досягнення сумісності різних структур PKI передбачає розпізнавання електромобілем усіх довірених сертифікатів як надійних. Це означає, що всі електромобілі мають зберігати всі сертифікати у своєму сховищі, як і всі зарядні станції.

Головною перевагою, яка й забезпечила нинішню популярність протоколу OSCP серед інших протоколів зв'язку, є те, що це відкритий для розробників і користувачів, а також безкоштовний протокол. Проте він має низку недоліків, серед яких:

- перевірка великої кількості сертифікатів займає багато часу, оскільки пам'ять пристрою, потужність обробки та пропускна здатність зв'язку обмежені;

- інформація, що передається за допомогою OSCP, може бути атакована способом перехоплення електромагнітного випромінювання під час використання мережі PLC зарядним пристроєм;

- сьогодні все ще використовують попередні версії протоколу OCPP, а багато наявних зарядних пристроїв покладаються на старіші версії протоколу, ніж версія 2.0.

Окрім цього, навіть для OCPP 2.0 зв'язок TLS не є обов'язковим, оскільки передбачено два види авторизації: в першому випадку оператор послуг і зарядна станція з'єднуються за допомогою мережевого протоколу HTTP з використанням пароля; у другому з'єднання відбувається за допомогою TLS і довіреного сертифіката. Навіть якщо зарядний пристрій застосовує останню версію протоколу OCPP, необхідно віддавати перевагу найновішим версіям TLS, оскільки за умови використання версій нижче за 1.2 рівень кібербезпеки є надто низьким.

З метою покращення взаємодії з клієнтом у разі заряджання через зарядний пристрій CCS була розроблена функція «plug-and-charge» (англ. «підключай і заряджай»). Вона дозволяє автоматизувати процеси зв'язку та виставлення рахунків між електромобілем і зарядною станцією без використання карток RFID або додатків для заряджання, водночас забезпечуючи високу кібербезпеку.

Широкому впровадженню «plug-and-charge» заважає відсутність не лише консенсусу серед виробників автомобільної галузі, а й стандартизації зарядних пристроїв та комунікаційних протоколів. Технологія «plug-and-charge», яка доступна за стандартом ISO 15118-2 (за умови оновлення програмного забезпечення електромобіля) або ISO 15118-20 («Інтерфейс зв'язку транспортного засобу з мережею», опубліковано 2022 року) дозволяє автоматично авторизуватись електромобілю за допомогою технології відкритих ключів (PKI) та унікально ідентифікує кожен електромобіль [5].

Уряд Німеччини вже зробив стандарт ISO 15118-20 невід'ємною частиною запланованої програми субсидій для громадської звичайної та швидкої зарядної інфраструктури, щоб побудувати зарядні станції, обладнані для майбутнього використання. Штат Каліфорнія (США) зазначив, що вимоги цього стандарту мають застосовуватись до всіх зарядних станцій [6].

Уряд Британії вживає заходів для стимулювання цього переходу, щоб усі зарядні точки, які продаються чи встановлюються в країні, мали розумні функції. Тому Велика Британія

розробила свій власний стандарт PAS 1899:2022 на основі вже чинних стандартів [7]:

- OCPP, який передбачає зв'язок між зарядними станціями та оператором послуг;
- ISO 15118-20, який визначає спосіб зв'язку між електромобілем і зарядною інфраструктурою;
- EE Bus IoT, що є стандартом сумісності;
- IEC 63110, який визначає протокол для керування інфраструктурою зарядки транспортних засобів;
- Open ADR, що є стандартом управління енергією;
- ISO/IEC 27001:2022 – «Інформаційна безпека, кібербезпека та захист конфіденційності. Системи керування інформаційною безпекою. Вимоги».

Автори дослідження [8] провели комплексний аналіз за допомогою тестування на проникнення в систему зарядного пристрою і пов'язані з ним системи для оцінки вразливості безпеки. За допомогою різних методів, таких як перехоплення мережевого трафіку, імітація атак і спуфінг, було виявлено кілька потенційних недоліків безпеки, якими можуть скористатися зловмисники. Тому застосування стандарту ISO 15118-20 дозволяє зберігати та передавати дані користувачів без ризику їхнього витоку у компонентах зарядної інфраструктури.

Такі вимоги безпеки є обов'язковими для комунікації електромобіля та зарядного пристрою, коли автомобіль ідентифікує себе й авторизує передачу електроенергії. Це пов'язано з тим, що зарядний пристрій передає повідомлення між електромобілем і постачальником послуг зарядної станції. Втім, безпека даних може перебувати на низькому рівні, коли використовуються альтернативні засоби авторизації, такі як радіочастотна ідентифікація (RFID) і комунікації близького радіусу дії смартфона (NFC), що пов'язують власника електромобіля із зарядною станцією. При цьому корпуси зарядних пристроїв не забезпечують належного фізичного захисту від несанкціонованого доступу.

Як показує досвід, зловмисники все частіше використовують програмне забезпечення, щоб отримати доступ до смартфона (наприклад, вдалий обхід захисту операційної системи iOS), а в електромобілі, щоб обійти електронний замок на дверях і систему

дистанційного запуску (як приклад, Hyundai і KIA випуску 2022 року).

Маніпуляції з бортовими електронними блоками управління електромобіля, що здійснюються, зокрема, за допомогою смартфона, дають можливість втручатися в системи керування і гальмування, управління двигуном і акумулятором. На будь-якому етапі передачі сигнали можуть дистанційно перехоплюватися, що дає фізичний доступ до електромобіля або конфіденційної інформації власника.

Навіть за умови застосування нових стандартів кібербезпеки зв'язку вразливими точками доступу до електромобіля залишаються бездротовий зв'язок для обміну інформацією з додатками для смартфонів, порт USB та система OBD [9].

Завдяки широкому спектру кіберсистем електромобіля з'являється можливість проникнути в мережу зарядних станцій, оскільки оператор зарядної станції пов'язаний з оператором розподільчої мережі через протокол Open Smart Charging Protocol (OSCP). Цей протокол забезпечує інтерактивний обмін даними між операторами з метою оптимального узгодження споживання електроенергії. Оператор послуг має доступ до інших зарядних пристроїв міста через зв'язок OSCP, що дає можливість зловмиснику отримати доступ до інфраструктури та вплинути навіть на енергетичну безпеку міста [10].

У майбутньому виробники електромобілів та оператори зарядних станцій мають визначитися, чи зможуть електромобілі заряджатися, використовуючи вразливі протоколи зв'язку згідно зі стандартом ISO 15118-2, для раніше випущених електро-мобілів, якщо автомобіль або зарядна станція не відповідають вимогам ISO 15118-20.

Отже, на цей час протоколи для зв'язку в галузі заряджання електромобілів не стандартизовані, але тривають спроби розробити відповідний стандарт.

Висновки

Основними точками доступу хакерів до електронних систем електромобіля є бездротовий зв'язок для обміну інформацією, порт USB та система бортової діагностики, а короткі ключі шифрування даних та занадто тривалі терміни їхньої дії сприяють несанкціонованому доступу до системи.

Зі свого боку виробники електромобілів та оператори зарядних станцій мають

визначитися, чи зможуть раніше випущені електромобілі заряджатися, використовуючи небезпечні протоколи зв'язку згідно зі старим стандартом, якщо автомобіль або зарядна станція не відповідають вимогам стандарту ISO 15118-20, який передбачає використання алгоритмів цифрового підпису.

Також швидкому впровадженню технології «plug-and-charge» за стандартом ISO 15118-20 заважає відсутність консенсусу серед виробників автомобільної галузі і відсутність стандартизації зарядних пристроїв і комунікаційних протоколів. Тому є нагальна потреба зробити стандарт ISO 15118-20 частиною програми субсидій для громадської звичайної та швидкої зарядної інфраструктури.

References

- 1.UN. (2021). UN Regulation No. 155 – Cyber security and cyber security management system. Retrieved from: <https://unece.org/transport/documents/2021/03/standards/un-regulation-no-155-cyber-security-and-cyber-security>
- 2.Alessandro Brighente, Mauro Conti, Denis Donadel, Radha Poovendran, Federico Turrin, & Jianying Zhou (2023). Electric Vehicles Security and Privacy: Challenges, Solutions, and Future Needs. Retrieved from: <https://readpaper.com/paper/4711095084272074753>
- 3.ENCs. (2019). Security requirements for procuring EV charging stations. Retrieved from: <https://encs.eu/resource/ev-301-2019-security-requirements-for-procuring-ev-charging-stations/springeropen.com/articles/10.1186/s42162-022-00190-y#citeas>
- 4.Zhang, H.; Meng, X.; Zhang, X.; Liu, Z. (2020). CANsec: A Practical in-Vehicle Controller Area Network Security Evaluation Tool. *Sensors* 2020, 20, 4900. Retrieved from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4900>
- 5.ISO. (2022). ISO 15118-20:2022(en) Road vehicles – Vehicle to grid communication interface – Part 20: 2nd generation network layer and application layer requirements. Retrieved from: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:15118:-20:ed-1:v1:en>
- 6.Garofalaki, D. Kosmanos, S. Moschyiannis, D. Kallergis and C. Douligeris, (2022). "Electric Vehicle Charging: A Survey on the Security Issues and Challenges of the Open Charge Point Protocol (OCPP)," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, 3, 1504-1533, thirdquarter. Retrieved from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9800931>
- 7.DfT. (2021). Electric vehicle smart charging consultation: summary of responses. Retrieved from: <https://www.gov.uk/government/consultations/electric-vehicle-smart-charging/public-feedback/electric-vehicle-smart-charging-consultation-summary-of-responses>
- 8.Johnson, J.; Berg, T.; Anderson, B.; Wright, B. (2022). Review of Electric Vehicle Charger Cybersecurity Vulnerabilities, Potential Impacts, and Defenses. *Energies* 2022, 15, 3931. Retrieved from: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/11/3931>
- 9.Unterweger, A., Knirsch, F., Engel, D. et al. (2022). An analysis of privacy preservation in electric vehicle charging. *Energy Inform* 5, 3.
- 10.Acharya, S., Dvorkin, Y., Pandžić, H. and Karri, R. (2020). "Cybersecurity of Smart Electric Vehicle Charging: A Power Grid Perspective," in *IEEE Access*, vol. 8, 214434-214453. Retrieved from: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9272723&isnumber=8948>

© М. С. Галактионов, аспірант,
ORCID: 0009-0006-7949-5713,
e-mail: nikolay@galaktionov.com;
© В. І. Бредун, кандидат технічних наук,
доцент,
ORCID: 0000-0002-8214-3878
(Національний університет «Полтавська
політехніка імені Юрія Кондратюка»)

© Mykola Halaktionov, Postgraduate,
ORCID: 0009-0006-7949-5713,
e-mail: nikolay@galaktionov.com;
© Viktor Bredun, Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor,
ORCID: 0000-0002-8214-3878
(National University «Yuri Kondratyuk
Poltava Polytechnic»)

ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ КРИВОГО РОГУ

CHARACTERISTICS OF THE KRYVYI RIH TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Анотація. Кривий Ріг є одним із найбільших промислових центрів України, що обумовлює високе техногенне навантаження на довкілля, зокрема через значну кількість автотранспорту. Інтенсивний рух, затори та висока частка вантажного транспорту спричиняють забруднення повітря, підвищений шумовий фон і загрозу безпеці дорожнього руху. У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні комплексної системи управління транспортною інфраструктурою, що дасть змогу оптимізувати рух, зменшити негативний вплив автотранспорту на довкілля та покращити якість життя мешканців міста.

Запропонована система управління транспортною інфраструктурою передбачає реалізацію низки заходів, спрямованих на модернізацію дорожньої мережі, оптимізацію транспортних потоків, розвиток громадського транспорту та стимулювання використання екологічно чистих видів транспорту. Одним із основних аспектів є впровадження інтелектуальних транспортних систем, що включає автоматизовані системи управління світлофорами, моніторинг дорожнього руху в реальному часі. Такі заходи сприятимуть зменшенню заторів, підвищенню пропускної здатності доріг та загальному покращенню мобільності населення.

Стимулювання використання електромобілів через розширення мережі зарядних станцій, надання фінансових пільг для їхніх власників, а також введення зон з обмеженим рухом для автомобілів із високим рівнем викидів дасть змогу зменшити рівень забруднення повітря. Додатково варто впроваджувати сучасні системи паркування з диференційованими тарифами та автоматизованим контролем, що сприятиме розвантаженню центральних районів міста від надмірного скупчення транспорту.

Комплексне впровадження зазначених заходів сприятиме створенню більш безпечної, екологічно чистої та ефективної транспортної системи у Кривому Розі.

Ключові слова: автотранспорт, екологія, забруднення повітря, транспортна інфраструктура, оптимізація руху, інтелектуальні транспортні системи, екологічний транспорт.

Abstract. Kryvyi Rih is one of the largest industrial centers in Ukraine, which results in a high level of technogenic environmental impact, particularly due to a significant number of motor vehicles. Intensive traffic, congestion, and a high share of freight transport contribute to air pollution, increased noise levels, and road safety risks. Consequently, there is a growing need to implement a comprehensive transport infrastructure management system to optimize traffic flow, reduce the negative environmental impact of motor vehicles, and improve the quality of life for city residents.

The proposed transport infrastructure management system includes a set of measures aimed at modernizing the road network, optimizing traffic flows, developing public transport, and promoting the use of environmentally friendly modes of transport. One of the key aspects is the introduction of intelligent transport systems (ITS), including automated traffic light control systems and real-time traffic monitoring. These measures will help reduce congestion, increase road capacity, and improve overall mobility.

Encouraging the use of electric vehicles by expanding the charging station network, providing financial incentives for owners, and introducing low-emission zones will help reduce air pollution. Additionally, the implementation of modern parking systems with differentiated tariffs and automated control will contribute to easing congestion in the central areas of the city. The comprehensive implementation of these measures will contribute to the creation of a safer, more environmentally friendly, and efficient transport system in Kryvyi Rih. This will significantly reduce pollutant emissions, improve air quality, optimize traffic flows, and enhance the comfort of urban residents. The sustainable development of the city's transport infrastructure will align with modern environmental and technological requirements, promote improved mobility, and ensure comfortable movement within the city.

Keywords: motor vehicles, ecology, air pollution, transport infrastructure, traffic optimization, intelligent transport systems, environmentally friendly transport.

Вступ

Кривий Ріг відіграє значну роль у розвитку промисловості України, особливо в Дніпропетровській області. Тут зосереджено близько 100 великих підприємств, що спеціалізуються на різних галузях, таких як чорна металургія, машинобудування, виробництво будівельних матеріалів, хімічна, поліграфічна, легка та харчова промисловість.

Місто потребує комплексної модернізації транспортної інфраструктури, яка б відповідала сучасним вимогам екологічної безпеки та якості обслуговування. Транспортна система має забезпечити швидке, безпечне та комфортне пересування містом, мінімізувавши при цьому вплив на довкілля та здоров'я населення.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. У численних наукових працях досліджуються особливості функціонування транспортних систем у великих містах [1-3]. Особлива увага приділяється проблемі забруднення навколишнього середовища автотранспортом, зокрема викидам шкідливих речовин в атмосферу, що негативно впливають на здоров'я населення та екосистеми [4-6]. Для вирішення цих проблем пропонуються різноманітні інструменти, серед яких розвиток інфраструктури для екологічно чистого транспорту, впровадження інноваційних технологій управління рухом і формування сприятливих умов для пішоходів та велосипедистів [7, 8].

Аналіз проблеми. Застаріла транспортна інфраструктура, що характеризується зношеністю доріг та мостів, недостатньою пропускною здатністю та відсутністю адаптації до сучасних вимог, є наслідком недостатнього фінансування, відсутності довгострокових планів розвитку та зміни транспортних потреб населення. Це призводить до низки проблем, таких як затори, підвищений рівень шуму та забруднення повітря, що негативно впливає на якість життя мешканців.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає в комплексному аналізі існуючих проблем транспортної інфраструктури міста Кривий Ріг задля розробки ефективних стратегій та заходів їх вирішення. Особлива увага буде приділена виявленню вузьких місць у транспортній системі, оцінці їхнього впливу на якість життя мешканців та розробці рекомендацій щодо оптимізації транспортних потоків,

підвищення безпеки руху та зменшення негативного впливу транспорту на довкілля.

Основна частина

Кривий Ріг – це велике індустріальне місто обласного підпорядкування Дніпропетровської області, територія міста складає понад 431,4 км² (протяжність з півночі на південь – 126 км, ширина до 20 км), населення становить 646 000 мешканців [9].

У Кривому Розі функціонує розгалужена мережа доріг загальною протяжністю 2787,8 км, яка займає площу понад 27 000 м². Більша частина цієї мережі, а саме 2070 км доріг, перебуває в комунальній власності міста. Окрім доріг, місто утримує ще 94 мости та шляхопроводи [10].

Як потужний промисловий центр, Кривий Ріг має розвинену транспортну інфраструктуру. Місто з'єднане з іншими регіонами країни за допомогою чотирьох основних автошляхів Н-11, Н-23, Р 74, Т-0434 та залізничної мережі з центральною станцією Кривий Ріг-Головний.

Транспортна система Кривого Рогу пропонує широкий спектр послуг включає 99 міських маршрутів, 17 приміських сполучень та 46 залізничних маршрутів. Місто має розвинену мережу громадського транспорту, представлену автобусами 12 маршрутів, маршрутними таксі 46 маршрутів, тролейбусами 23 маршрути, трамваями 17 маршрутів і швидкісним трамваєм 4 маршрути [11]. Таке різноманіття транспортних засобів дає змогу мешканцям дістатися до роботи, навчальних закладів та інших місць призначення. Крім того, розвинена мережа залізничних сполучень забезпечує зв'язок міста з іншими регіонами. Однак, незважаючи на значну протяжність маршрутної мережі, існують проблеми, пов'язані з координацією роботи різних видів транспорту, застарілістю рухомого складу та недостатньою кількістю паркувальних місць.

Постійне зростання кількості автомобілів у місті створює значне навантаження на дорожню інфраструктуру, що призводить до необхідності постійних ремонтів і реконструкції доріг. Недостатність інвестицій у модернізацію доріг, відсутність ефективних систем управління рухом, зростання кількості приватних транспортних засобів у Кривому Розі призводить до низки проблем, таких як затори на дорогах, особливо в години пік, збільшення

викидів шкідливих речовин в атмосферу, що негативно впливає на екологію міста, та дефіцит паркувальних місць, що ускладнює рух громадського транспорту та створює незручності для мешканців.

Для вирішення цих проблем необхідно впроваджувати комплекс заходів, спрямованих на розвиток громадського транспорту, стимулювання використання велосипедів та електромобілів, а також оптимізацію дорожньої мережі.

Для створення ефективної та екологічно чистої транспортної системи необхідний комплексний підхід, що включає оптимізацію руху транспорту за допомогою інтелектуальних систем, розвиток громадського транспорту та альтернативних видів пересування, а також впровадження заходів зі стимулювання екологічно чистого транспорту. Такий підхід дозволить не лише зменшити затори та забруднення повітря, але й підвищити якість життя

мешканців міста, сприяти його економічному розвитку та збереженню довкілля.

З метою оцінки впливу різних типів автотранспорту на стан дорожнього руху та екологічну ситуацію в місті проведено порівняльні спостереження за інтенсивністю транспортних потоків та їхньою структурою у 2021 і 2024 роках. На основі отриманих даних щодо кількості легкових, вантажних, пасажирських транспортних засобів і мототранспорту в різних районах Кривого Рогу побудовано графіки, які відображають динаміку змін транспортного навантаження та дають змогу проаналізувати внесок кожної категорії транспорту в загальну транспортну ситуацію.

Візуалізація результатів представлена у вигляді порівняльних графіків, що дає змогу виявити ключові тенденції розвитку транспортної системи міста (**рис. 1**).



Рис. 1. Динаміка змін транспортного навантаження

Аналіз побудованих графіків свідчить про відмінні тенденції у динаміці різних видів автотранспорту. Загальна кількість легкових автомобілів зростає майже на всіх спостережуваних ділянках, що вказує на зростання рівня автомобілізації. Водночас спостерігається скорочення обсягів пасажирського транспорту, що, ймовірно, пов'язано з переорієнтацією мешканців на використання приватних авто. Ванта-

жний транспорт демонструє загальну тенденцію до зростання, хоча в окремих точках зафіксовано незначне зменшення. Кількість мототранспорту також збільшується, особливо в районах з інтенсивним рухом на ключових перехрестях.

Окремі ділянки, зокрема перехрестя проспекту Миру та вулиці Лермонтова, характеризуються високою концентрацією усіх типів

транспортних засобів, що свідчить про їхнє важливе значення в загальній транспортній структурі міста.

Зростання кількості вантажного транспорту може бути зумовлене підвищенням економічної активності, а збільшення мототранспорту – прагненням населення до більш мобільних та швидких засобів пересування. Різноманітна динаміка за окремими видами транспорту підкреслює необхідність системного

підходу до вирішення транспортних та екологічних проблем. Збільшення легкового, вантажного та мототранспорту безпосередньо впливає на підвищення обсягів викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря, що потребує впровадження ефективних організаційно-технічних заходів.

За результатами досліджень розроблено систему управління зі зменшення впливу автотранспорту на навколишнє середовище та складено схему заходів (рис. 2).

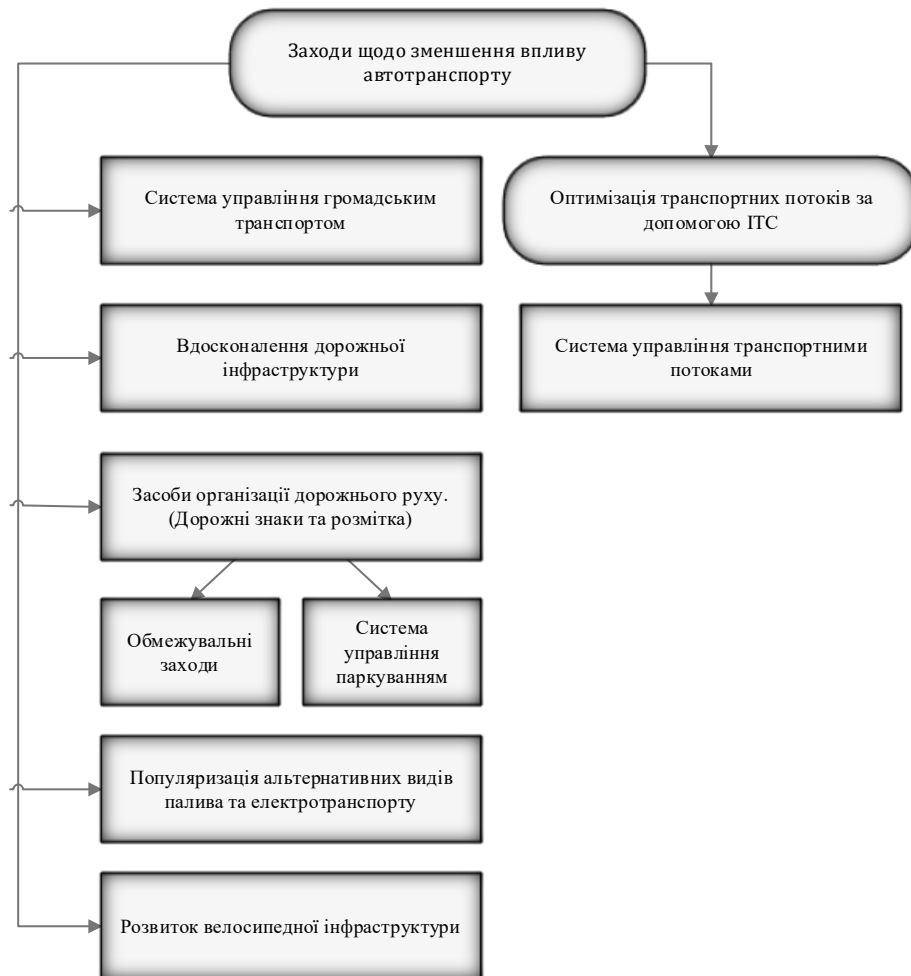


Рис. 2. Заходи щодо зменшення впливу автотранспорту

Схема представляє заходи щодо зменшення впливу автотранспорту на довкілля. Заходи можна поділити на два напрямки, система управління транспортно інфраструктурою та оптимізація транспортних потоків за допомогою інтелектуальних транспортних систем (ІТС).

Система управління транспортною інфраструктурою охоплює комплекс заходів, спрямованих на підвищення ефективності транс-

портної системи, зменшення заторів, покращення екологічної ситуації та підвищення безпеки дорожнього руху. Вона включає покращення дорожньої інфраструктури, що передбачає реконструкцію та розширення існуючих доріг, створення нових магістралей і об'їзних шляхів для розвантаження центральних районів, будівництво багаторівневих розв'язок, а

також застосування сучасних матеріалів і технологій для підвищення якості дорожнього покриття.

Організація дорожнього руху є ще одним важливим аспектом, який включає чітке та зрозуміле маркування доріг, використання світловідбивних матеріалів, встановлення сучасних дорожніх знаків, інформаційних табло та адаптивних світлофорів, що змінюють режими роботи залежно від інтенсивності руху. Важливим заходом є також виділення смуг для громадського транспорту та створення велосипедних доріжок, що сприяє розвитку альтернативних способів пересування.

Важливим напрямом є розвиток екологічного громадського транспорту, зокрема розширення маршрутів електротранспорту (тролейбусів і трамваїв), впровадження сучасних автобусів на альтернативних видах палива, створення виділених смуг для громадського транспорту, що дасть змогу зменшити залежність міста від приватних автомобілів.

Одночасно необхідно розвивати інфраструктуру для велосипедного транспорту, передбачаючи будівництво нових велодоріжок, створення велопарковок та інтеграцію велосипедного транспорту в загальну транспортну систему міста.

Значну роль у зниженні негативного впливу транспорту відіграють такі заходи: створення зон обмеженого руху для автомобілів із високими рівнями викидів, впровадження ефективної системи паркування з розумними парковками та динамічним ціноутворенням, обмеження швидкісного режиму в житлових районах та поблизу об'єктів соціальної інфраструктури тощо.

Популяризація альтернативного палива та електротранспорту включає розвиток мережі зарядних станцій для електромобілів, запровадження фінансових стимулів для придбання екологічно чистого транспорту та підтримку громадського електротранспорту, такого як тролейбуси та трамваї.

Окремим напрямом є розвиток велосипедної інфраструктури, що передбачає будівництво нових та модернізацію існуючих велосипедних доріжок, створення безпечних маршрутів у міських районах, встановлення станцій велопрокату та інтеграцію велосипедного транспорту з громадським. Інформаційні кампанії сприятимуть популяризації велосипедів як екологічного та зручного засобу пересування.

Створення розгалуженої мережі велодоріжок і велопарковок, стимулювання використання велосипедів та самокатів для коротких міських поїздок допоможе зменшити рівень автомобілізації та покращити екологічну ситуацію.

Оптимізація транспортних потоків за допомогою ІТС дозволить оптимізувати світлофорні фази, адаптувати їх до реального часу, використовувати системи динамічної інформації для водіїв та впроваджувати системи моніторингу транспортних потоків.

Висновки

Для Кривого Рогу, як міста з високою концентрацією промислових підприємств та значним обсягом автомобільного трафіку, ефектвне управління транспортною інфраструктурою є ключовим фактором у зниженні рівня забруднення повітря та покращенні мобільності населення. Велика протяжність міста, особливості його планування та висока концентрація вантажного транспорту створюють суттєві виклики для транспортної системи, що впливає як на якість повітря, так і на загальний рівень комфорту та безпеки дорожнього руху.

У межах дослідження транспортної інфраструктури Кривого Рогу було здійснено комплексну оцінку інтенсивності руху автотранспорту, структури транспортних потоків та швидкісних режимів на 27 ключових ділянках міста. Спостереження проводились у різні роки (2021, 2024), що дало змогу простежити динаміку змін.

За результатами спостережень найбільшу інтенсивність транспортного потоку зафіксовано на кільці 95 кварталу (86 478 авт./добу), вул. Вільної Ічкерії (81 852 авт./добу) та перехресті проспекту Металургів і Нікопольського шосе (68 723 авт./добу).

Визначено збільшення кількості легкового, вантажного та мототранспорту у 2024 році порівняно з 2021 роком, що свідчить про зростання рівня автомобілізації.

Впровадження комплексної системи управління транспортною інфраструктурою є необхідною умовою для мінімізації негативного впливу автомобільного транспорту на довкілля. Основними напрямками такої системи є модернізація дорожньої інфраструктури, оптимізація транспортних потоків, інтеграція інтелектуальних транспортних систем (ІТС), ро-

звиток громадського транспорту, популяризація електротранспорту та велосипедної мобільності.

Покращення дорожньої інфраструктури, зокрема реконструкція основних магістралей, впровадження сучасних дорожніх розв'язок, чітка організація руху із застосуванням розумних світлофорів і розмітки, сприятимуть зменшенню заторів та підвищенню пропускної здатності доріг. Важливим кроком є впровадження системи моніторингу транспортних потоків, що дасть змогу в реальному часі оцінювати ситуацію на дорогах та оперативно коригувати режими руху.

Розвиток громадського транспорту, включаючи розширення маршрутів електротранспорту, створення виділених смуг для автобусів і трамваїв, а також впровадження екологічно чистих транспортних засобів (електробусів, гібридних автобусів), дасть змогу зменшити кількість приватного транспорту на дорогах. Крім того, створення сучасної системи управління паркуванням, зокрема введення зон із диференційованими тарифами та обмеженням руху приватного транспорту в центральних районах, знизить навантаження на дорожню мережу.

Особливу увагу варто приділити розвитку альтернативних видів транспорту. Водночас розвиток зарядної інфраструктури для електромобілів, впровадження пілг та стимулюючих заходів для власників екологічно чистого транспорту сприятимуть зниженню рівня шкідливих викидів.

Загалом, реалізація комплексної стратегії управління транспортною інфраструктурою дозволить значно зменшити рівень викидів забруднювальних речовин у повітря, підвищити безпеку дорожнього руху, зменшити затори та покращити мобільність населення. Комплексний підхід до розвитку транспортної системи Кривого Рогу сприятиме створенню комфортного, екологічно безпечного та сучасного міського простору, що відповідатиме вимогам сталого розвитку.

References

1. Kashkanov, A., & Palchevskyi, O. (2022). Problems of transport systems functioning of Ukraine large cities in modern conditions. *Advances In Mechanical Engineering And Transport*, 1, 18, 87-97. Retrieved from <https://doi.org/10.36910/automash.v1i18.764>
2. Borsuk, Y. (2019). Human-geographical problems of transport connection in the zone of large and medium cities (on the example of the Lviv region). *XXth All-Ukrainian Student Scientific Conference "Realities, problems and prospects of the development of geography in Ukraine"*.
3. Kuropiatnyk, O. & Krasnoshchok, O. (2022). Prospects for the introduction of cable car transport. *Transportation systems and technologies*, 1, 237–246. DOI:10.32703/2617-9040-2022-40-21
4. Hu, Q., Bian, L., & Lin, J. (2021). Temporal and spatial diagnostic model of vehicle gas pollutants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 6. DOI:10.1007/s10661-021-09111-0
5. Union of Concerned Scientist. (2008). Cars, Trucks, Buses and Air Pollution. (n.d.). Retrieved from <https://www.ucsusa.org/resources/cars-trucks-buses-and-air-pollution>
6. Wang, J., Wu, Q., Liu, J., Yang, H., Yin, M., Chen, S., ... Huang, Q. (2019). Vehicle emission and atmospheric pollution in China: problems, progress, and prospects. *PeerJ*, 7, Statya e6932. DOI: 10.7717/peerj.6932
7. Venzhega, V., & Pasov, H. (2019). Decreasing of the motor vehicle effect on the environment. *Technical sciences and technologies*, 4, 18, 28–35. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-4(18)-28-35.
8. Alanazi, F. (2023). Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation. *Applied Sciences*, 13, 10, 6016. DOI: 10.3390/app13106016
9. Executive Committee of Kryvyi Rih City Council. (2021). Kryvyi Rih in figures and facts 2021 (n. d.). Retrieved from https://ig.krmisto.gov.ua/dwn/citycard/kriviy_rih_facts_2021.pdf
10. Executive Committee of the Kryvyi Rih City Council. (2011). A new bypass road is being built in Kryvyi Rih, the traffic on which will allow to “unload” the city center | Official website of the Kryvyi Rih City Council and its Executive Committee. (n.d.). Retrieved from https://kr.gov.ua/ua/news/pg/120811718893318_n/
11. Easyway. (2024). Kryvyi Rih. Retrieved from <https://www.eway.in.ua/ua/cities/kryvyirih/routes>

© Я. І. Пиріг, канд. техн. наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник кафедри ТДБМ, ORCID: 0000-0003-0957-2251, e-mail: pirig2000@gmail.com;
© С. В. Оксак, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри ТДБМ, ORCID: 0000-0002-3084-3469, e-mail: sv.oksak@gmail.com;
© Я. В. Ільїн, канд. техн. наук, доцент кафедри ТДБМ, ORCID: 0000-0003-2998-3955, e-mail: yailin12011993@gmail.com;
© С. О. Місніченко, аспірант кафедри ТДБМ, ORCID: 0009-0004-1697-9249, e-mail: smisnichienko2@ukr.net (Харківський національний автомобільно-дорожній університету)

© Yan Pyrig, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Senior Research Fellow of the Department, ORCID: 0000-0003-0957-2251, e-mail: pirig2000@gmail.com;
© Serhii Oksak, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department, ORCID: 0000-0002-3084-3469, e-mail: sv.oksak@gmail.com;
© Iaroslav Ilin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department, ORCID: 0000-0003-2998-3955, e-mail: yailin12011993@gmail.com;
© Serhii Misnichenko, Postgraduate, ORCID: 0009-0004-1697-9249, e-mail: smisnichienko2@ukr.net (Kharkiv National Automobile and Highway University)

ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЛАСТИЧНОСТІ ЛИТИХ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ, ВИЗНАЧЕНОЇ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ

EVALUATION OF TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF MASTIC ASPHALT MIXTURES, DETERMINED BY DIFFERENT METHODS

Анотація. Розглянуто особливості литих асфальтобетонних сумішей і литих асфальтобетонів та методів, що застосовують для оцінювання їхньої якості. Наведено класифікацію методів оцінювання технологічної пластичності литих асфальтобетонних сумішей. Представлені результати лабораторного оцінювання технологічної пластичності литих асфальтобетонних сумішей за допомогою: методу Люєра; методу, що ґрунтується на встановленні глибини занурювання випробувального стрижня; методу, що ґрунтується на визначенні розтікання суміші під власною вагою та методу, що ґрунтується на встановленні крутного моменту під час перемішування суміші. Розглянуто особливості прийнятих у роботі методів, оцінено їхні переваги та недоліки та співставленні значення технологічної пластичності, визначеної різними методами.

Ключові слова: литий асфальтобетон, лита асфальтобетонна суміш, пластичність, методи, метод Люєра.

Abstract. Mastic asphalt concrete is a type of traditional hot asphalt concrete, which, due to the peculiarities of its composition, is characterised by increased technological plasticity and the possibility of laying in the road surface without compaction. The paper considers the features of quality indicators used to assess the properties of mastic asphalt mixtures and asphalt concrete. A classification of methods for assessing the technological plasticity of mastic asphalt mixtures is given. The results of laboratory assessment of the technological plasticity of mastic asphalt mixtures are presented using: the Luer method; the method based on determining the depth of immersion of the test rod; the method based on determining the spreading of the mixture under its own weight and the method based on determining the torque during mixing of the mixture. The features of the methods used in the work are considered, their advantages and disadvantages are evaluated. Based on the analysis of data from literature and regulatory sources, criteria for assessing the plasticity of mastic mixtures determined by the methods used in this work were adopted. Based on the experimentally obtained results of assessing the technological plasticity determined by different methods, the closeness of the obtained plasticity values was established, which may indicate the interchangeability of the considered methods for assessing the quality of mastic asphalt mixtures. Taking into account the peculiarities of the methods used in the work and their advantages, in order to select an acceptable method for assessing the technological plasticity of mastic mixtures and its further standardisation in the domestic road industry, it is proposed to use the Luer method for operational control of the quality of mastic mixtures at the plant and the method based on the determination of torque for selecting the composition of mixtures and establishing the optimal temperature conditions for the preparation of mastic mixtures.

Keywords: mastic asphalt concrete, mastic asphalt mix, plasticity, methods, Luer method.

Вступ

Литий асфальтобетон є найдавнішим матеріалом, який застосовують у дорожньому, промисловому та цивільному будівництві. До переваг цього різновиду гарячих асфальтобетонів можна віднести: низьку пористість та високу щільність; водонепроникність; підвищену корозійну стійкість, а також морозо- та зносостійкість; міцність, порівняну з традиційними гарячими асфальтобетонами; довговічність. Основною перевагою є висока пластичність та відсутність необхідності ущільнення литої асфальтобетонної суміші під час її укладання в дорожнє покриття.

Переваги литого асфальтобетону великою мірою обумовлені його складом: значною кількістю мінерального порошку (20–30 %), відносно високим вмістом високов'язкого бітумного в'язучого (7–10 %), підвищеною кількістю природного піску або відсіву (25–35 %) та відносно низькою кількістю щебню (30–45 %) [1, 2]. Через такі особливості складу для оцінювання властивостей литих сумішей та асфальтобетонів необхідно застосовувати спеціальні показники якості, оскільки стандартні показники, що використовують для оцінювання традиційних гарячих асфальтобетонів, є не придатними або малоінформативними: водонасичення майже відсутнє; залишкова пористість не перевищує 1 ... 2 %; завдяки підвищеній пластичності часто неможливо встановити значення міцності на стиск, особливо за підвищених експлуатаційних температур, оскільки відсутній чітко виражений максимум руйнувального навантаження.

Спеціальним показником, що повною мірою характеризує якість як литої асфальтобетонної суміші, так і литого асфальтобетону, є пластичність (технологічна та експлуатаційна) [2, 3]. Технологічна пластичність литих сумішей характеризує їхню рухомість під час укладання в покриття (зручноукладальність). Експлуатаційна пластичність литого асфальтобетону – опір дорожнього покриття деформаціям від руху автомобільного транспорту.

На сьогодні єдиним стандартизованим показником експлуатаційної пластичності литих асфальтобетонів, що широко використовують в усіх країнах (де застосовують цей тип асфальтобетону), є глибина вдавлювання штампу (додатково визначають показник збільшення глибини вдавлювання штампу після 30 хв дії

навантаги) [1–3]. Як правило, оцінювання експлуатаційної пластичності литого асфальтобетону визначають за + 40 °С, а її нормовані значення, зазвичай, не перевищують 3,5 мм для крупнозернистих асфальтобетонів (найбільший розмір зерен кам'яного матеріалу – 8 (10) мм – 16 (15) мм) та 5,0 мм для дрібнозернистих асфальтобетонів (найбільший розмір зерен – 5 мм).

Технологічна пластичність – це один із основних показників, значення якого необхідно враховувати під час підбору складу литих сумішей, та основний показник для вибору температури їх приготування і укладання в покриття, оскільки даний показник відображає здатність матеріалу розтікатися під власною вагою у певному діапазоні температур, що є важливим для якісного укладання та досягнення міцності покриття.

Експлуатаційна пластичність литих асфальтобетонів та технологічна пластичність литих асфальтобетонних сумішей є взаємопов'язаними показниками, що характеризуються антагоністичним типом зв'язку – підвищена технологічна пластичність литих сумішей, як правило, призводить до погіршення експлуатаційної пластичності та навпаки. Ці два показники повинні бути нормованими та їх необхідно враховувати під час проектування складу литих асфальтобетонних сумішей, зокрема для встановлення оптимальної кількості бітумного в'язучого, та призначення оптимальної технологічної температури укладання сумішей в дорожнє покриття.

На відміну від експлуатаційної пластичності литих асфальтобетонів, єдиного загальноприйнятого методу оцінювання технологічної пластичності литих сумішей на даний час не існує та в багатьох країнах (в тому числі і в Україні) цей показник не визначають і, відповідно, не нормують. Незважаючи на це, на даний час є відомими певна кількість методів визначення технологічної пластичності литих сумішей, які можуть бути умовно розподілені на три групи:

- методи, що ґрунтуються на визначенні часу занурення випробувального пристрою в нагріту до технологічної температури суміш;
- методи, що ґрунтуються на визначенні діаметра розтікання під власною вагою нагрітої до технологічної температури литої суміші;
- методи, що ґрунтуються на встановленні

крутного моменту мішалки під час перемішування литої асфальтобетонної суміші, нагрітої до технологічної температури.

Методи першої групи є найпростішими в методологічному плані і не потребують складного лабораторного обладнання, що є їхньою значною перевагою. Загальний принцип цих методів, який полягає у встановленні глибини занурення випробувального штоку за нормований час або часу занурення штоку на нормовану глибину, було запропоновано на початку минулого століття. До цієї групи можна віднести метод Риб'єва А. І., консистометр Хетчинсона, метод Люєра та інші.

На сьогодні в країнах Східної Азії широке застосування отримав метод Люєра (Lueer fluidity test), методика випробування якого полягає у визначенні часу занурення в литу суміш латунного штоку ($\varnothing$ 10 мм, l = 27 см) з молотком краплеподібної форми, загальною вагою 995 г. За показник плинності Люєра приймають час, за який шток зануриться в суміш на глибину від нижньої до верхньої риски, розташовані на штоку на відстані 50 мм одна від одної.

Залежно від мети визначення технічної пластичності методика визначення показника плинності Люєра може різнитися:

- у разі операційного контролю якості пластичності випробування здійснюють лише за 240 °С (прийнятною є пластичність, за якої значення показника плинності Люєра не перевищує 20 с);

- якщо ж визначають оптимальну кількість бітумного в'язучого у складі литої суміші чи призначають оптимальні температурні межі виготовлення та укладання сумішей у дорожнє покриття випробування здійснюють у температурному діапазоні від 200 °С до 260 °С (в цьому випадку орієнтуються на значення показника плинності Люєра в межах від 10 с до 20 с) [3, 4].

До переваг цього методу можна віднести: простоту обладнання; малий час випробування; існування експериментально доведених залежностей між показником плинності та іншими стандартними показниками якості литих сумішей [3–5]. Недоліками методу є значний обсяг суміші, потрібний для проведення випробування (понад 10 кг) та швидке її охолодження, що впливає на точність отримуваних результатів.

Методи другої групи ґрунтуються на принципі розтікання литої асфальтобетонної суміші під власною вагою, запозичений із методу осідання конусу цементобетонної суміші (slump test) – його запропонував Д. Абрамс іще на початку минулого століття [6].

На відміну від інших цей метод – єдиний стандартизований у вітчизняній дорожній галузі (МР В.2.7-37641918-897 [7]). Як показник пластичності використовують діаметр або висоту шару литої суміші після її розтікання впродовж певного часу (60 с, 90 с або інше). Критерієм, прийнятим у вітчизняних нормативних документах [7], була висота шару суміші після її розтікання впродовж 60 с, яка повинна бути меншою за 25 мм.

Випробування зазвичай здійснюють у широкому температурному діапазоні, межі якого залежать від складу суміші, кількості бітумного в'язучого та відсутності налипання суміші на стінки обладнання, що здебільшого можна спостерігати за відносно низьких технологічних температур.

Значними перевагами методів цієї групи є: простота конструкції обладнання; малий час випробування; відносно малий обсяг суміші, необхідний для випробування. Основним недоліком, через які методи цієї групи мають обмежене використання, є значне налипання суміші на стінки приладу або розрив суцільності суміші впродовж процесу витікання, що призводить до суттєвих похибок у визначенні пластичності або до неможливості її визначення взагалі.

Найбільш сучасними, інформативними і точними є методи третьої групи, принцип яких полягає у встановленні крутного моменту лопатей мішалки під час її обертання в обсязі асфальтобетонної суміші. Їх запропонували у 1978 р. дослідники J. Marvillet та R. Bougault [8]. Нині існує значна кількість різноманітних методів оцінювання пластичності (workability) асфальтобетонних сумішей різних видів та типів, що відрізняються конструкцією та розмірами лопатей мішалок, швидкістю обертання мішалки, використанням датчиків, які під час випробування визначають швидкість остигання суміші на поверхні та в обсязі тощо [9–12]. На відміну від методів, що можна віднести до першої та другої груп, особливістю методів визначення пластичності шляхом встановлення крутного моменту мішалки є те, що ви-

пробування розпочинають на суміші з максимально можливою температурою, яка в ході випробування поступово знижується. А тому є можливим оцінити не тільки пластичність суміші, а й динаміку зниження температури асфальтобетонної суміші.

Усім методам цієї групи притаманні такі переваги: висока точність отримуваних результатів; автоматизація та комп'ютеризація процесу оцінювання пластичності; висока чутливість до гранулометричного складу суміші, кількості та реологічного типу бітумного в'язучого, технологічної температури та інше. Деякі сучасні модифікації приладів цієї групи дозволяють оцінювати пластичність суміші, починаючи з моменту її виготовлення безпосередньо у випробувальному пристрої. До недоліків методів цієї групи можна віднести: високу вартість та складність випробувального обладнання; обмеженість сфери застосування максимальною крупністю зерен кам'яного матеріалу 10 мм.

На кафедрі технології дорожньо-будівельних матеріалів (ТДБМ) Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) на замовлення Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України здійснено розробку національного стандарту «Суміші асфальтобетонні та асфальтобетон. Технічні умови. Литі суміші», який перебуває на редагуванні в Національному органі стандартизації. Під час розробки цього нормативного документу постало питання щодо нормування показника технологічної пластичності. Однак через відсутність стандартизованого методу, який би забезпечував об'єктивне визначення цього показника з високою точністю, його нормування було відкладено.

Враховуючи існування певної кількості різноманітних за принципом дії методів визначення технологічної пластичності литих асфальтобетонних сумішей, актуальним є питання вибору найбільш прийнятних для вітчизняної дорожньої галузі та встановлення взаємозв'язку між значеннями технологічної пластичності, визначеної різними методами.

Методи встановлення технологічної пластичності, прийняті в дослідженні

На основі аналізу даних з літературних джерел щодо відомих на сьогодні методів визначення пластичності литих асфальтобетонних

сумішей було обрано чотири методи: метод плинності Люєра, як один із найбільш поширених методів (метод А); чеський метод, що є аналогом методу плинності Люєра (стандартизовано в Чехії [13]), але позбавлений низки його недоліків (метод Б); метод, що ґрунтується на визначенні показника розтікання суміші під власною вагою, як такий, що використовували у вітчизняній практиці (метод В); метод, що ґрунтується на встановленні крутного моменту мішалки (метод Г).

На кафедрі ТБДМ ХНАДУ було виготовлено відповідні прилади, зовнішній вигляд яких представлено на **рис. 1**.

Для оцінювання технологічної пластичності було прийнято литу асфальтобетонну суміш типу ЛАБС-10, гранулометричний склад якої підібрано згідно з вимогами проєкту ДСТУ «Суміші асфальтобетонні та асфальтобетон. Технічні умови. Частина 6. Литі суміші». Вихідні матеріали для приготування суміші:

- дорожній бітум БНД 35/50 (пенетрація за 25 °C – $41 \times 0,1$ мм, температура розм'якшеності – 52,2 °C),

- гранітні кам'яні матеріали зі Шматковського кар'єру.

Кількість бітуму приймалась 9%, 10% та 11%. Стандартні показники якості прийнятого в дослідженні литого асфальтобетону представлені в **табл. 1**.

Методики визначення пластичності литої суміші охоплювали такі етапи:

- 1) підготовка суміші згідно вимог ДСТУ Б В.2.7-319 [14];

- 2) нагрів до технологічної температури (за початкову прийнято температуру 200 °C) литої суміші та випробувального обладнання (металеві ємності з сумішшю; випробувальні штоки тощо);

- 3) завантаження суміші в ємність випробувального обладнання;

- 4) проведення випробування:

- у методі А – визначення часу занурення випробувального штоку на глибину 50 мм (від нижньої до верхньої мітки, що нанесені на шток);

- у методі Б – визначення глибини занурення випробувального штоку за 30 с (кожні 5 с фіксують глибину);

- у методі В – встановлення висоти розпливу конусу з суміші, що витікала з ємності впродовж 60 с;

- у методі Г – визначення крутного моменту

під час обертання валу з лопатями;

5) вивантаження суміші та очищення металевих ємностей;

6) нагрів до іншої технологічної температури, яка залежно від результатів випробування може бути збільшена або зменшена на 10°C та випробування за цієї температури.

Винятком із цього порядку є випробування

за методом Г, відповідно до якого суміш нагрівали до максимальної технологічної температури та здійснювали визначення крутного моменту. Форму з сумішшю витримували за температури навколишнього повітря з постійної періодичністю перемішуючи суміш та перевіряючи її температуру. За зниження температури на $\approx 10^{\circ}\text{C}$ повторювали визначення крутного моменту.

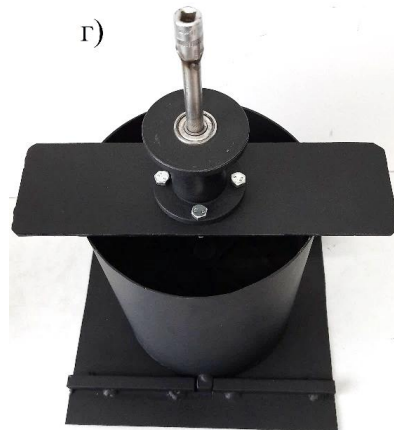


Рис. 1. Зовнішній вигляд обладнання: а – прилад для визначення плинності Люєра (метод А), б – прилад для визначення пластичності, що ґрунтується на глибині занурення випробувального стрижня (метод Б), в – прилад для визначення пластичності, що ґрунтується на встановленні показника розтікання (метод В), г – прилад для визначення пластичності, що ґрунтується на визначенні крутного моменту (метод Г)

Таблиця 1

Стандартні показники якості литих асфальтобетонів, прийнятих в дослідженні

Кількість бітуму, %	Температура виготовлення, °C	Середня густина асфальтобетону, г/см ³	Дійсна густина асфальтобетону, г/см ³	Залишкова пористість, %	Глибина вдавлення штампу за 40 °C, мм	Збільшення глибини вдавлення штампу, мм
9	210	2,341	2,399	2,45	2,57	0,28
	220	2,351		2,01	2,56	0,32
	230	2,357		1,74	2,41	0,29
	240	2,365		1,43	2,16	0,27
10	190	2,332	2,371	1,65	5,49	0,98
	200	2,337		1,54	4,57	0,88
	210	2,349		0,96	3,9	0,69
	220	2,355		0,88	3,23	0,66
	230	2,366		0,24	-	-
11	160	2,307	2,345	1,6	9,57	2,94
	180	2,306		1,65	7,75	2,0
	200	2,330		0,55	5,36	1,26
	220	2,336		0,38	5,2	1,15

Приклади експериментально отриманих температурних залежностей показників пластичності, визначених прийнятими в роботі методами, представлені на **рис. 2**.

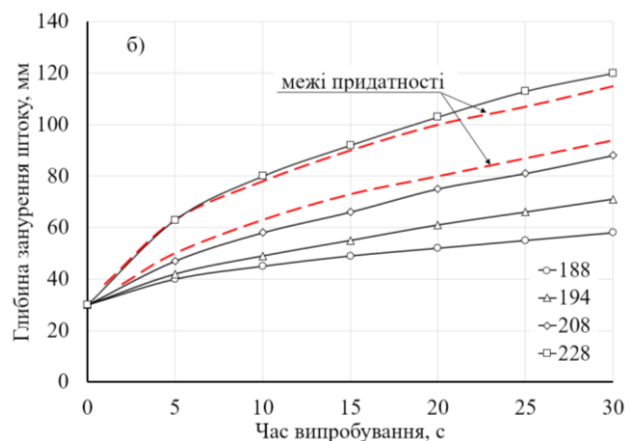
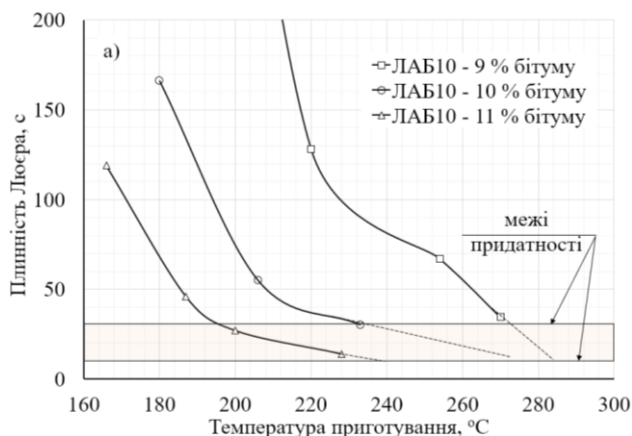
За критерії оптимальної пластичності приймали температури за яких:

- для методу А – значення показника плинності перебуває в межах 10 ... 30 с (використані норми, представлені в [3], згідно з якими зі зниженням середньорічних температур повітря (в Китаї +22 °C, в Японії +16 °C, в Україні +9 °C) інтервал оптимальних показників плинності необхідно розширювати та зсувати в область більш високих значень);

- для методу Б – глибина занурювання випробувального стрижня перебуває в межах границь придатності із часом занурення штоку 10 с та 20 с (відповідає вимогам, прийнятим в [13]);

- для методу В – висота шару суміші після розтікання впродовж 60 с є меншою за 30 мм, (відповідає вимогам, наведеним у [15], водночас для ЛАБС-5 висота повинна бути меншою за 15 мм, а для ЛАБС-15 – меншою за 35 мм);

- для методу Г – крутний момент не перевищує 2,5 Н·м (відповідно [8]).



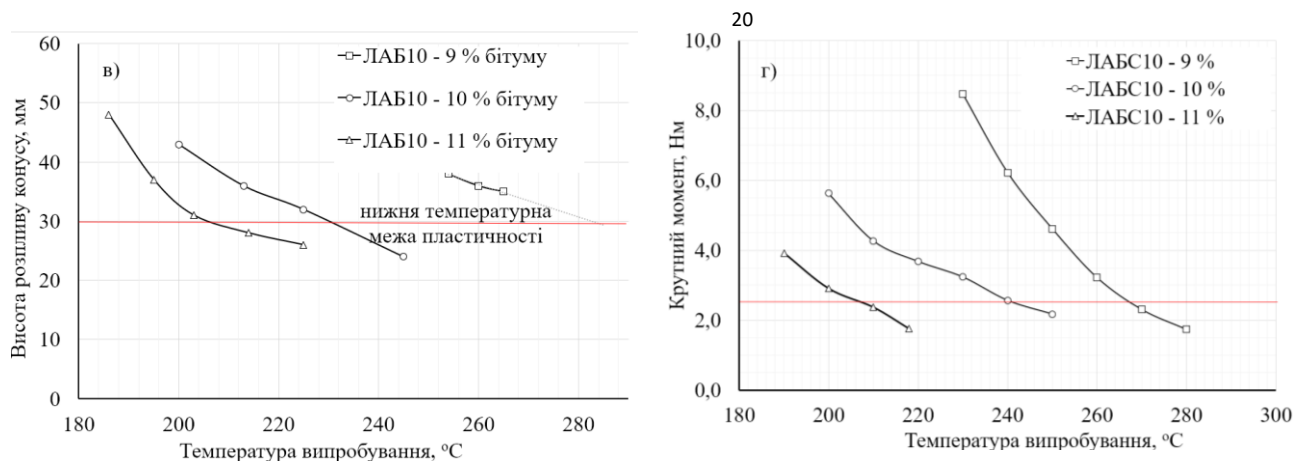


Рис. 2. Приклади встановлення технологічної пластичності, визначених прийнятими в роботі методами: а – температурна залежність плинності Люєра, визначеної методом А, б – часова та температурна залежність глибини вдавлювання штоку, визначеної методом Б, в – температурна залежність висоти розпливу конусу суміші, визначеної методом В, г – температурна залежність крутного моменту при перемішуванні суміші, визначеного методом Г

Зіставлення методів визначення технологічної пластичності

Згідно з даними, представленими на рис. 2, встановлення раціонального складу литої асфальтобетонної суміші з оптимальним вмістом бітумного в'язучого є складною задачею, оскільки підвищення технологічної пластичності може спостерігатися у разі збільшення кількості в'язучого та підвищення температури виготовлення суміші. Водночас це може призводити до невідповідності вимог литого асфальтобетону нормам, представленим в національних стандартах та суттєвому підвищенню вартості приготування литої асфальтобетонної суміші. Виходячи з цього, є доцільним оцінювати технологічну пластичність литих асфальтобетонних сумішей, враховуючи значення експлуатаційної пластичності литого асфальтобетону, визначеної методом вдавлювання штамп (згідно з вітчизняними нормами значення вдавлювання штамп має бути в межах від 1,0 мм до 3,5 мм).

Так, наприклад, згідно з даними, представленими на рис. 2, а, температурні діапазони технологічної пластичності, визначені за показником плинності Люєра складають:

- для ЛАБС-10 з 9 % бітуму 273 ... 284 °С,
- для ЛАБС-10 з 10 % бітуму 234 ... 269 °С,
- для ЛАБС-10 з 11 % бітуму 196 ... 240 °С.

Виходячи з цих даних, найбільш прийнятними є кількість бітуму 11 % та технологічна температура приготування суміші від 196 °С. Виготовляти литу асфальтобетонну суміш із 9 % бітуму марки БНД 35/50 є недоцільним,

оскільки температури, що відповідають значенням пластичності Люєра, є надто високими (273 ... 284 °С). Це є неприйнятним для виробництва, виходячи з умов забезпечення такої високої температури та підвищеною схильністю до старіння бітуму.

У разі врахування експлуатаційної пластичності литих асфальтобетонів (рис. 3) оптимальною стає кількість бітуму в 10%, а прийнятною температурою приготування литої суміші та укладання її в покриття є діапазон від 234 °С до 269 °С. Водночас у литої асфальтобетонної суміші з 11 % бітуму можна спостерігати невідповідність температурних діапазонів задовільної пластичності, визначеної методом Люєра, та діапазону технологічної температури приготування суміші, за якої показник експлуатаційної пластичності (глибина вдавлювання штамп за температури 40 °С) буде відповідати встановленим нормам. Отже, показники технологічної та експлуатаційної пластичності необхідно нормувати, а їхні значення спільно враховувати під час визначення складу суміші та встановлення технологічних режимів виготовлення і укладання в дорожнє покриття.

На основі отриманих у роботі експериментальних даних встановлено, що оптимальні температури приготування розглянутої литої асфальтобетонної суміші ЛАБС-10 із різною кількістю бітуму, визначені за значеннями технологічної пластичності, отриманими різними методами, є близькими (рис. 4). Водночас значення технологічної пластичності, встановлені методами Люєра (метод А) та методом, що

ґрунтується на встановленні крутного моменту під час перемішування литої суміші (метод Г) є практично рівними. Це може свідчити про взаємозамінність цих методів для оцінювання якості литих асфальтобетонних сумішей.

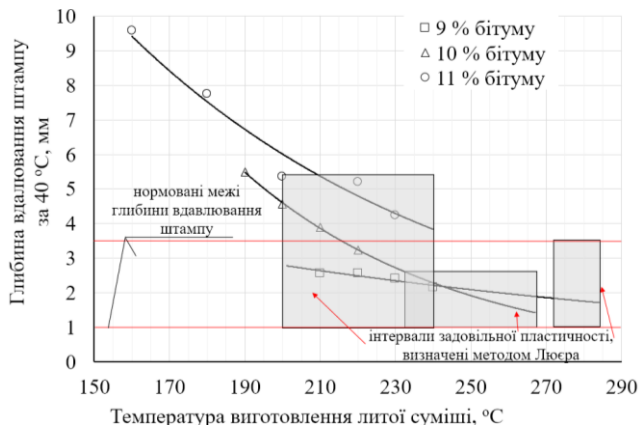


Рис. 3. Вибір оптимальної температури приготування литої суміші та оптимальної кількості бітуму за критеріями технологічної та експлуатаційної пластичності

Виходячи з практичного досвіду використання розглянутих методів визначення технологічної пластичності (додатково розглянуті литі асфальтобетонні суміші різного гранулометричного складу, виготовлених за різних технологічних температур на різноманітних бітумних в'язучих, прийнятих у різній кількості) встановлено, що найбільш прийнятним є метод Г, що ґрунтується на визначенні крутного моменту.

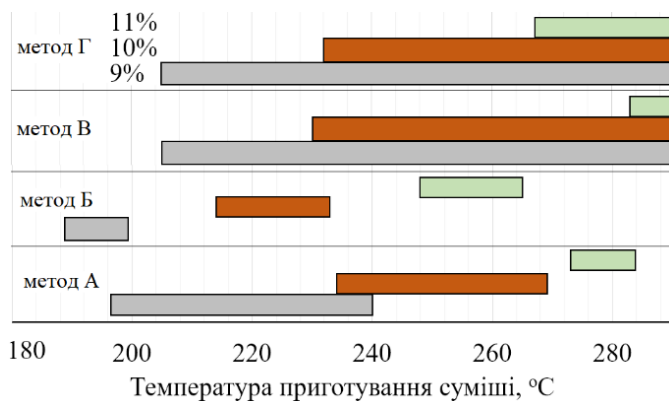


Рис. 4. Порівняння оптимальних температур виготовлення литої асфальтобетонної суміші ЛАБС-10 із різною кількістю бітуму, визначених за значеннями технологічної пластичності, що визначена різними методами

Значною перевагою цього методу є те, що на відміну від інших методів у ньому є можливим здійснювати випробування за всіх прийнятих температур, не виймаючи литу суміш із випробувальної форми, що значно скорочує загальний час проведення дослідження до 60–90 хв. Крім того, завдяки відсутності необхідності декілька раз нагрівати суміш до температури випробування та витримувати її за цієї температури щонайменше 30 хв, суміш суттєво менше зістарюється, що підвищує точність отримуваних результатів.

Інші прийняті в дослідженні методи також можуть бути використаними для оцінювання технологічної пластичності литих асфальтобетонних сумішей з урахуванням таких положень (табл. 2):

- метод А (метод Люєра), завдяки простоті конструкції обладнання та можливості його використання в будь-якому місці, а також беручи до уваги значну кількість суміші, потрібної для проведення випробування, доцільно використовувати на асфальтобетонному заводі під час контролю якості суміші або безпосередньо на місці влаштування дорожнього покриття з метою встановлення прийнятності температури суміші для її задовільного розтікання;

- методи Б та В доцільно використовувати лише в лабораторних умовах, при цьому є необхідним внесення змін у конструкції приладів, скерованих на зменшення швидкості охолодження литої суміші під час проведення випробування.

Порівняння прийнятих у роботі методів визначення технологічної пластичності

Показники оцінювання	Характеристики методів			
	метод А	метод Б	метод В	метод Г
Можливий температурний діапазон випробування, °C	160 – 270 °C			
Час проведення випробування за однієї температури, який охоплює завантаження суміші в прилад, безпосередньо випробування та очищення форми	до 1 хв	до 5 хв	до 2 – 5 хв	до 1 хв
Вага суміші, кг	11	4	1	6
Швидкість зниження температури під час випробування, °C	середня	середня	найвища	найнижча
Основні недоліки, що впливають на зручність використання методу та точність отримуваних результатів	значна вага литої суміші	тривалий час випробування; нерівномірне остигання суміші	налипання суміші на внутрішню частину форми; розрив суцільності суміші	вплив швидкості обертання на отримуваний результат

Висновки

У роботі представлені експериментальні дані визначення технологічної пластичності литих асфальтобетонних сумішей за допомогою: методу Люера; вдосконаленого методу Люера; методу, що ґрунтується на визначенні показника розтікання суміші під власною вагою; методу, що ґрунтується на оцінюванні пластичності за крутним моментом мішалки. Встановлені переваги та недоліки прийнятих методів. Визначено, що прийнятні температури технологічної пластичності, визначеної розглянутими в роботі методами, є близькими, що може свідчити про взаємозамінність цих методів для оцінювання якості литих асфальтобетонних сумішей. Під час встановлення оптимального складу литих сумішей та технологічних параметрів їхнього приготування необхідно одночасно враховувати значення технологічної пластичності литої суміші та експлуатаційної пластичності литого асфальтобетону, визначеної методом вдавлювання штампу.

References

1. Nikolaidis, A. (2014). Highway engineering: Pavements, materials and control of quality. CRC Press.
2. Staritzky, M. (1934). Gussasphalt. OGIZ.
3. Wang, C.H., Chen, Q., Gao, Z., Jiang, T., & Chen, J. (2017). Review on status and development of gussasphalt concrete. *Materials Review*, 31(9), 135-145.
3. Liu S. et al. (2018). Application of mastic asphalt waterproofing layer in high-speed railway track in cold regions. *Applied Sciences*, 8, 1-16.

4. Jang, Y.D., Park, T.S., & Lee, J.S. (2019). A study on the performance improvement of guss asphalt mixture. *Journal of the Korean Asphalt Institute*, 9, 2, 176-193.
5. Luo, S., Qian, Z., Yang, X., & Wang, H. (2017). Design of gussasphalt mixtures based on performance of gussasphalt binders, mastics and mixtures. *Construction and Building Materials*, 156, 131-141.
6. Tattersall, G. H. (1991). Workability and quality control of concrete. CRC Press.
7. MR V.2.7-37641918-897:2018 (2018). Metodichni rekomendatsiyi shchodo pryhotuvannya ta zastosuvannya vibrolytoho asfal'tobetonu. Kyiv: Ukravtdor.
8. Ali, A., Abbas, A., Nazzal, M., Alhasan, A., Roy, A., & Powers, D. (2014). Workability evaluation of foamed warm-mix asphalt. *Journal of materials in civil engineering*, 26, 6.
9. Bennert, T., Reinke, G., Mogawer, W., & Mooney, K. (2010). Assessment of workability and compactability of warm-mix asphalt. *Transportation research record*, 2180, 1, 36-47.
10. Poeran, N., & Sluer, B. (2016). Workability of asphalt mixtures. In 6th Eurasphalt & Eurbitume congress, Prague, Czech Republic.
11. Abdelgalil, S. M. K., Abdul Rahman, M., & Arshad, A. K. (2011). Development of workability measuring device for asphalt mixture using electronic transducer and temperature regulator. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 1, 7, 721-726.
12. Radenberg, M., & Gehrke, M. (2020). Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 Grad Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Straßenbau*, 146.
13. ČSN 73 6160 (2008). Zkoušení asfaltových směsí. 24.
14. State Standard of Ukraine. (2016). DSTU B V.2.7-319:2016 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhnyi ta aerodromnyi. Metody vyprobuвання [State Standard of Ukraine B V.2.7-319:2016 Asphaltic concrete mixtures, road and aerodromes asphaltic concrete. Test methods]. Kyiv, 75.
15. Oksak, S. V. (2021). Vyznachennya temperaturnykh rezhymiv pryhotuvannya lytykh asfal'tobetonnykh sumishey na bitumnykh v'yazhuchykh riznoyi konsystentsiyi. *Visnyk KhNADU*, 92, 2.

УДК 629.29.00

DOI: 10.33868/0365-8392-2025-1-282-23-28

© М. Г. Михалевич, докт. техн. наук, професор
кафедри автомобілів ім. А. Б. Гредескула,
ORCID: 0000-0001-9890-3838,
e-mail: mkolyag@gmail.com;
© В. О. Шаповаленко, асистент кафедри
автомобілів ім. А. Б. Гредескула,
ORCID: 0000-0002-5770-0740,
e-mail: vladislav-shapovalenko@ukr.net
(Харківський національний
автомобільно-дорожний університет)

© Mykola Mykhalevych, Doctor of Technical Sciences
A. B. Gredeskul Department of Automobiles,
ORCID: 0000-0001-9890-3838,
e-mail: mkolyag@gmail.com;
© Vladyslav Shapovalenko, assistant A. B. Gredeskul
Department of Automobiles,
ORCID: 0000-0002-5770-0740,
e-mail: vladislav-shapovalenko@ukr.net.
(Kharkiv National Automobile and Highway University)

ПОРІВНЯННЯ ВАГОВИХ ТА ГАБАРИТНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛЕГКОВОГО АВТОПАРКУ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ БОКОВОГО УДАРУ

COMPARISON OF WEIGHT AND DIMENSIONAL PARAMETERS OF THE PASSENGER CAR FLEET OF UKRAINE IN THE CONTEXT OF A SIDE IMPACT

Анотація. Сьогодні у світі відсутня єдина класифікація автомобілів. Європейська система розподілу налічує 12 класів автомобілів, у США їх існує 7. Європейський комітет з проведення незалежних краш-тестів EuroNCAP розділяє автомобілі на 9 класів. У кожній класифікації є клас автомобілів SUV (sport utility vehicle) – спортивно-утилітарні транспортні засоби, популярні на ринку нових автомобілів. Український ринок не залишився осторонь від цієї тенденції. Наразі приблизно 40 % ринку нових автомобілів, що реалізуються в Україні, це саме транспортні засоби класу SUV. Під час проведення незалежних краш-тестів, які перевіряють бокову безпеку водія та пасажирів, енергія удару поширюється та поглинається боковими порогами, дверними стійками та брусами безпеки, які розташовані всередині дверей. На жаль, відсутні види краш-тестів між автомобілями різних масово-габаритних параметрів, наприклад, коли в легковий автомобіль відбувається удар збоку транспортним засобом класу SUV. Основна проблема постає в тому, що висота поперечної балки у SUV розташована вище ніж брус безпеки в дверях легкового автомобіля. Таким чином складно спрогнозувати розподіл кінетичної енергії удару та ступінь травмування водія та пасажирів легкового транспортного засобу.

Ключові слова: боковий удар, краш-тест, автомобільний парк, масово-габаритні параметри, пасивна безпека.

Abstract. Currently, there is no single classification of car classes in the world. The European car classification system has 12 classes, in the USA there are 7 classes, the European Committee for Independent Crash Testing EuroNCAP divides cars into 9 classes. In each classification there is a class of cars SUV (sport utility vehicle) - sports utility vehicles, which are in demand in the new car market. The Ukrainian market did not stay away from this trend. Currently, approximately 40% of the new car market sold in Ukraine is SUV class vehicles. Considering the mass and dimensions of these vehicles in comparison with conventional passenger cars, the question arises of the correspondence of the mass and dimensions of the trolley with which the side impact is simulated by organizations conducting independent crash tests. Having analyzed the features of conducting side crash tests, we can see that the cart that simulates a side impact of a car has the mass dimensions of an average passenger car. That is, crash tests simulate a collision between two passenger cars. Experts predict that by 2035 the world's car fleet will reach 2 billion cars. This trend inevitably leads to an increase in road accidents. During independent crash tests that check the side safety of the driver and passengers, the impact energy is distributed and absorbed by the side sills, door pillars and safety bars located inside the doors. Unfortunately, there are no types of crash tests between cars of different mass and dimensions, for example, when a passenger car is hit from the side by an SUV. The main problem is that the height of the crossbar with crash boxes in an SUV is higher than the safety bars in the doors of a passenger car. Thus, it is difficult to predict the distribution of kinetic energy of the impact and the severity of injury to the driver and passengers of a passenger vehicle.

Keywords: side impact, crash test, vehicle fleet, mass and dimensions, passive safety.

Вступ

Популярність сегменту SUV (sport utility vehicle) – спортивно-утилітарних транспортних засобів зростає з початку 90-х років минулого століття. У країнах з розвинутою економікою минулого року продажі SUV досягли близько 20 мільйонів, вперше перевищивши частку ринку в 50 %. Ця перевага більшим транспортним засобам також поширюється і на країни, що розвиваються, де частка SUV у загальному обсязі продажів відображає таку тенденцію. Більшість SUV є транспортними засобами зі звичайним двигуном внутрішнього згоряння [1].

Основна частина

Транспортні засоби класу SUV з роками стали досить популярними на території України. Враховуючи світову тенденцію та маркетингову політику, потенційні покупці стали надавати перевагу транспортним засобам, які за своїми масово-габаритними параметрами схожі на класичні позашляховики. Адже це дає змогу активно використовувати їх за межами міста. Аналіз кількості реалізованих транспортних засобів класу SUV [1] показує щорічне збільшення. Так, вже у 2022 році цей показник становив 75 % від загальної кількості реалізованих транспортних засобів (рис. 1).

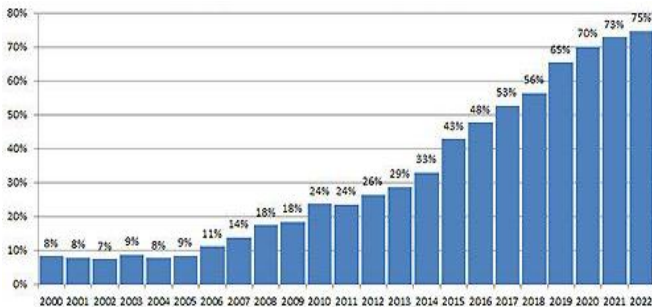


Рис. 1. Частка транспортних засобів класу SUV в Україні за період 2000–2022 роки [1]

Аналітика продажів транспортних засобів сегменту SUV у 2023 році в Україні показала, що було реалізовано 82 % SUV від загальної частки усіх проданих нових автомобілів. Експерти прогнозують стабільний показник на наступні роки на рівні 80 % [2].

Для того, щоб зрозуміти чому в наш час таку популярність набули транспортні засоби класу SUV потрібно розглянути висновки аналітичного дослідження, яке проводилось у країнах

Європейського Союзу. За опитуванням [3] 52 % респондентів вважають SUV безпечнішим, ніж інші види автомобілів.

Ситуація, що склалась на ринку бувших у використанні автомобілів протилежна, лідером українського ринку протягом 2022 року стали саме легкові автомобілі. Досі ця тенденція залишається незмінна. Аналіз, який проводився за допомогою інформації щодо кількості укладених договорів купівлі-продажу показав, найпопулярнішими на вторинному ринку є легкові автомобілі (рис. 2) на відміну від ринку нових автомобілів, де найпопулярнішими є автомобілі класу SUV.

№	Бренд/Модель	Кількість договорів купівлі-продажу
1	Volkswagen Passat	26830
2	ZAZ Sens	24663
3	Skoda Octavia	22030
4	Volkswagen Golf	20759
5	Renault Megane	12669
6	Ford Focus	11567
7	BA3 2109/99	10715
8	Skoda Fabia	10140
9	Opel Astra	10076
10	BMW 5 Series	9431
11	BMW 3 Series	8930
12	Chevrolet Aveo	8779
13	Audi A6	8746
14	Toyota Camry	8618
15	Audi A4	7754
16	Mercedes-Benz E-Class	7708
17	Renault Scenic	7211
18	BMW X5	7012
19	Volkswagen Jetta	6555
20	Hyundai Sonata	6133
21	Volkswagen Transporter	6083
22	Mitsubishi Lancer	6069
23	Opel Zafira	5871
24	Mazda 6	5862
25	Renault Logan	5842

Рис. 2. Статистика кількості укладених договорів купівлі-продажу бувших у використанні автомобілів в Україні за 2022 рік

Така ситуація неминуче призводить до виникнення питання про якість безпеки для водія та пасажирів легкових автомобілів під час ДТП за участю легкового автомобіля та SUV.

Європейська програма оцінки безпеки автомобілів EuroNCAP публікує звіти з рейтингом безпеки, який базується на тому, як повів себе новий автомобіль у низці краш-тестів. Зокрема моделювання бокового удару візком з вантажем, параметрами схожим на середньостатистичний легковий автомобіль.

Перевірка безпеки під час бокового удару виконується на швидкості 50 км/год. У машину вдаряється платформа з деформованим блоком, удар припадає на сторону водія (рис. 3, 4) [4].

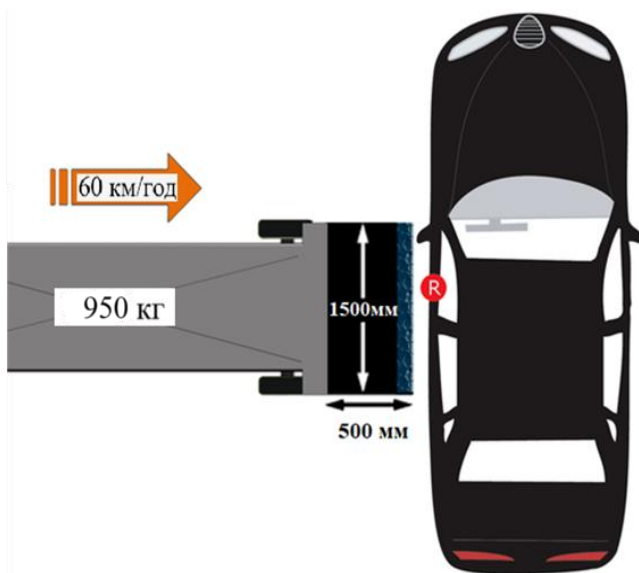


Рис. 3. Умови проведення бокового краш-тесту за методикою EuroNCAP

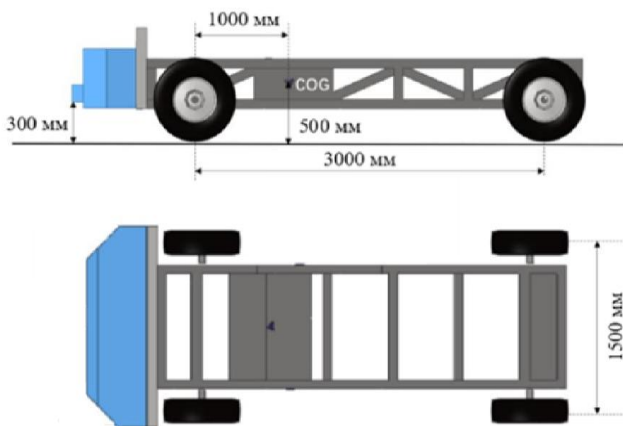


Рис. 4. Умови проведення бокового краш-тесту за методикою EuroNCAP

Європейська програма оцінки нових автомобілів використовує такі параметри для дослідження бокового удару. Випробувальний транспортний засіб розташовується на рівній поверхні статично, зі сторони водійського місця запускається рухомий візок зі швидкістю 50 км/год ± 1 км/год. Власне візок має колісну базу 3000 ± 10 мм і колію спереду та ззаду 1500 ± 10 мм. Попереду кріпиться деформований бар'єр так, щоб його нижній край був на висоті 300 мм ± 5 мм від землі. Загальна вага візка має бути 950 ± 20 кг [4].

Схожі параметри використовують й інші організації, щоб перевірити безпеку під час бокового удару.

Проведення саме бокового удару під прямим кутом обумовлено статистичними даними, які показують, що боковий удар під кутом 90° відбувається удвічі частіше ніж боковий удар під кутом 45° (рис. 5) [4].

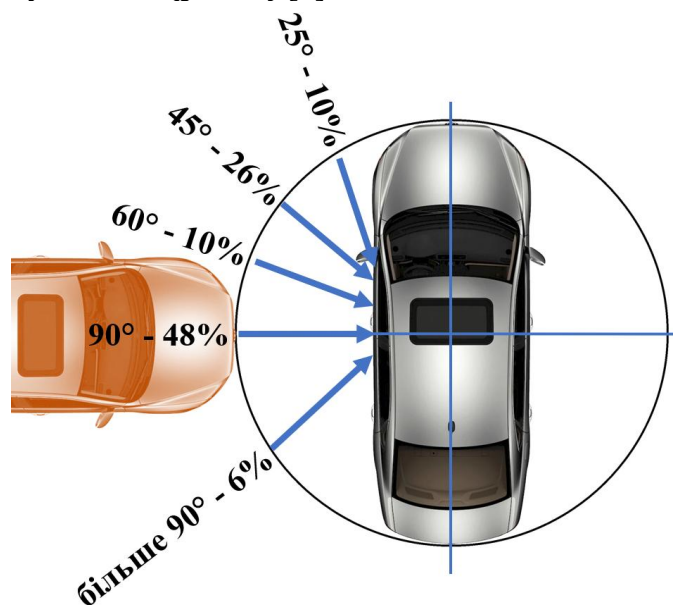


Рис. 5. Залежність кількості бокових ударів у ДТП від кута напрямку зіткнення

Опираючись на дослідження, які провели JATO Dynamics в Європі, транспортні засоби класу SUV на 54 % важчі за середньостатистичні міські автомобілі. Схожа ситуація склалась і у США, де SUV на 22 % важчі за середньостатистичні седани. Середня споряджена маса легкового транспортного засобу класу С становить 1,2 т, тоді як SUV – 1,6 т. Така ж тенденція

простежується якщо порівнювати транспортні засоби інших класів [6].

Досліджуючи масові параметри автомобілів різних класів (рис. 6), було сформовано середні значення маси автомобілів, які були розподілені на 5 класів: малий; субкомпактний; компактний; середній; великий. Аналогічно було поділено і автомобілі класу SUV. Це дало змогу зрозуміти, яка кількість кінетичної енергії удару виділяється під час бокового удару автомобілями різних класів на різних швидкостях [5].

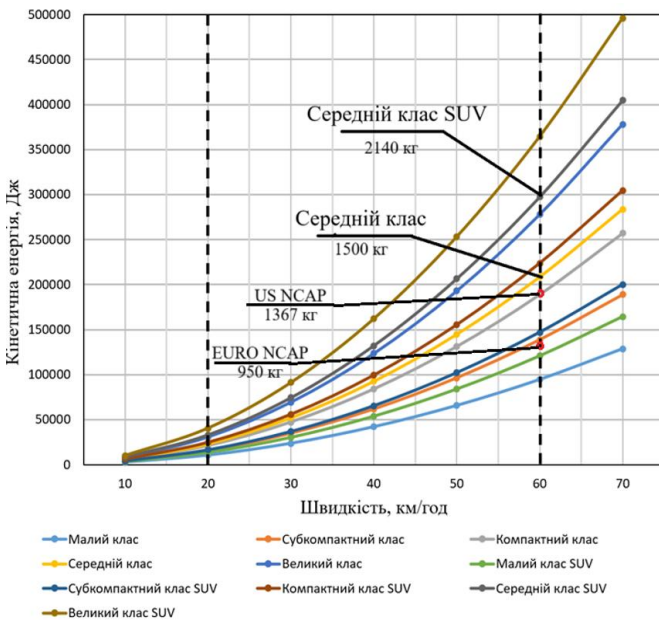


Рис. 6. Середня кількість кінетичної енергії, яка виділяється під час удару автомобілів різних класів

В нашому дослідженні приділимо увагу саме автомобілям середнього (С) класу. Це продиктовано популярністю їх на ринку нових автомобілів України. Середня маса такого автомобіля становить 1,5 т, коли маса SUV класу С становить 2,14 т. Тобто різниця мас цих автомобілів буде становити майже 650 кг, а отже, маса SUV більша за легковий автомобіль на 35 %. Кінетична енергія під час бокового удару автомобілем класу SUV становитиме 206500 Дж, а легковим автомобілем 144600 Дж. Враховуючи, що тести на боковий удар Euro NCAP проводить за допомогою рухомого деформованого бар'єру масою 950 кг, тобто моделюється боковий удар двох автомобілів зі схожими масово-габаритними параметрами. Та, на жаль, не проводиться такий

тест із транспортними засобами різних масово-габаритних-параметрів, наприклад, моделювання бокового удару автомобілем класу SUV в бокову частину легкового автомобіля під кутом 90°.

У конструкції передніх і задніх дверей для додаткової пасивної безпеки під час фронтального та бокового удару використовують сталеві елементи безпеки. Конструкція компонента відповідає нормам, передбаченим стандартами FMVSS 214 для випробувань на боковий удар [7, 8].

Вони бувають круглого профілю (рис. 7 а). Балка дверей складається зі сталеві труби та кронштейнів, приварених з обох кінців до труби. Сталева труба виготовляється шляхом прокатки боровмісного сталевих гарячекатаного листа з межею міцності 500-600 МПа товщиною 2,0 мм, а потім піддається контактному зварюванню з кронштейнами і термообробці для підвищення міцності до межі міцності 1400 МПа. Кронштейн виготовлений із холоднокатаної сталі з межею міцності 300-700 МПа.

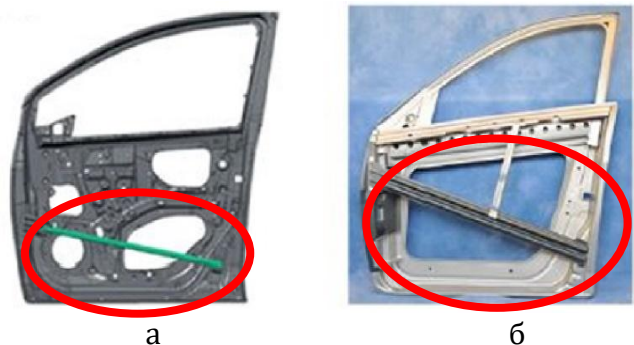


Рис. 7. Види балок безпеки, що розташовані у дверях автомобіля [9]: а – балка круглого профілю; б – формована балка з листового металу

Своє чергою формована балка з листового металу (рис. 7 б) виготовляється шляхом штамповки холоднокатаних сталевих листів як цільна деталь, тому вона має гарні характеристики та низькі витрати у виробництві. Серед її недоліків – слабкий супротив згинанню на відміну від труби. Формовану балку з листового металу рекомендовано використовувати для посилення дверей у автомобілів із високими порогами, тобто SUV та класичні позашляховики.

Розташування балки дверей дає змогу зменшити проникнення кузовних елементів у

середину транспортного засобу, де перебувають водій та пасажир, таким чином підвищити якість пасивної безпеки (рис. 8).

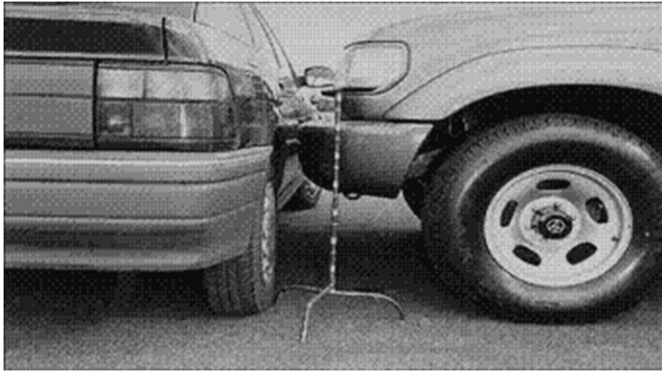


Рис. 8. Візуальне зіставлення транспортних засобів різних класів [10]

Балка виконує свої функції під час бокового удару двох легкових автомобілів зі схожими габаритними параметрами. Однак, якщо відбудеться боковий удар двох автомобілів із різними габаритними параметрами, балка безпеки не зможе повною мірою виконати свою функцію. В такому разі удар буде відбуватись в зону вище місця розташування елементу пасивної безпеки (рис. 9), що призведе до травмувань або летального випадку для водія та пасажирів автомобіля.

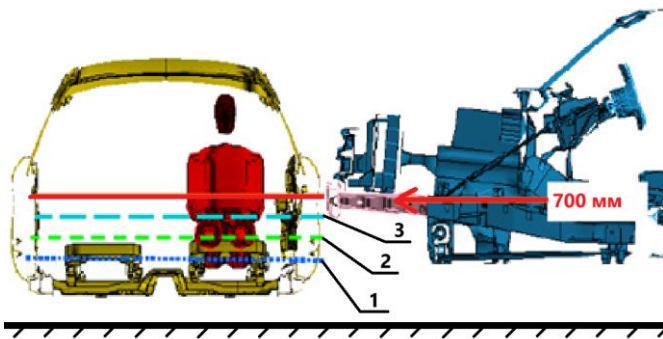


Рис. 8. Висота розташування зон безпеки, які розташовані в дверях автомобіля [11]: 1 – 400 мм, висота від опорної поверхні до нижньої зони кріплення балки безпеки; 2 – 500 мм, висота від опорної поверхні до середньої зони балки безпеки; 3 – 600 мм, висота від опорної поверхні до верхньої зони кріплення балки безпеки

Автомобільні виробники, досліджуючи це питання, представили декілька концепцій систем екстреного підняття кузова. Вони дають

змогу підняти весь автомобіль або його сторону на 85 мм, що допомагає знизити наслідки травмування водія чи пасажирів на 50 %. Недоліком таких концепцій – є моделювання бокового удару легковим автомобілем, що звужує можливості ефективної роботи системи екстреного підняття кузова з іншими автомобілями категорії М1, які мають більші масово-габаритні параметри.

Висновки

Провідні виробники автомобілів преміум класу активно просувають превентивні системи безпеки [12, 13, 14], які за допомогою систем моніторингу визначають небезпеку бокового зіткнення та екстрено підіймають кузов автомобіля на висоту близько 85 мм, підставляючи під удар більш жорсткі елементи днища. Це дає змогу знизити травматизм водія та пасажирів удвічі [12]. Такі системи є актуальними і потребують дослідження.

Водночас ми спостерігаємо зріст популярності транспортних засобів сегменту SUV. Це призводить до зростання ймовірності потрапляння в ДТП нового автомобіля SUV з легковим автомобілем класу А, В, С, D, Е. У такому разі логічним є оснащення нових автомобілів SUV подібною до згаданих [12, 13, 14] превентивних систем пасивної безпеки, що можуть містити функцію екстреного зниження кузова.

References

1. Laura Cozzi. (2024). SUVs are setting new sales records each year – and so are their emissions. Retrieved November 8, 2024 from <https://www.iea.org/commentaries/suvs-are-setting-new-sales-records-each-year-and-so-are-their-emissions>.
2. Autoconsulting.ua. (2023). Trendy avtorynku Ukrayiny [Trendy car market of Ukraine]. Retrieved November 10, 2024 from <https://autoconsulting.ua/article.php?sid=54858>.
3. Ford Media Center. (2015). New survey shows accelerating suv boom. Retrieved November 11, 2024 from <https://media.ford.com/content/fordmedia/feu/gb/en/news/2015/09/07/new-survey-shows-accelerating-suv-boom-as-millennials-join-new-c.html>.

4. Eurocap.com. (2012). Side impact testing protocol. Retrieved November 12, 2024 from <https://cdn.euroncap.com/media/1478/euro-cap-side-protocol-version-60.pdf>
5. Juan Felipe Munoz. (2022). Obesity of cars, the new challenge of the industry. Retrieved November 15, 2024 from <https://uk.motor1.com/news/622233/obesity-of-cars-new-industry-challenge>.
6. R. E. Hawley. (2024). Average car weight. Retrieved November 15, 2024 from <https://www.bankrate.com/insurance/car/average-car-weight>.
7. UNECE. (2010). FMVSS no. 214 Amending side impact dynamic test adding oblique pole test. Retrieved November 15, 2024 from <https://unece.org/DAM/trans/doc/2010/wp29grsp/RD-2e.pdf>.
8. UNECE. (2015). Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a lateral collision. Retrieved November 16, 2024 from <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R095r2e.pdf>.
9. Kyeongrae Jo, Sungjong Kang. (2016). The Section Design of Press Door Impact Beam for Improving Bending Strength. Retrieved November 16, 2024 from <http://journal.ksae.org/common/do.php?a=full&bidx=707&aidx=9460>.
10. PuntoSicuro. (2024). Sicurezza stradale: la sicurezza delle autovetture. Retrieved November 16, 2024 from <https://www.puntosicuro.it/view-pdf/sicurezza-stradale-la-sicurezza-delle-autovetture-AR-24757/>.
11. Vehicle-to-vehicle front-to-side crash analysis using a CAE based methodology. Retrieved November 17, 2024 from <https://www.semanticscholar.org/paper/Vehicle-to-vehicle-front-to-side-crash-analysis-a-Barbat-Li/9a8a4e22e772ca6eb805c685964d32cce57debaf/figure/6>.
12. Audi MediaCentre. (2019). Multifaceted personality: predictive active suspension in the A8 flagship model. Retrieved April 4, 2024 from <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/multifaceted-personality-predictive-active-suspension-in-the-a8-flagship-model-11905>
13. Mercedes-Benz. (2020). Meet the S-Class DIGITAL: Innovation by Intelligence. Retrieved April 4, 2024 from <https://www.youtube.com/watch?v=rxMnpK2GoGg>.
14. Vehicledynamicsinternational.com. (2019). Vehicle dynamics international 2019. Retrieved April 4, 2024 from <http://www.rapa.com/automotive/wp-content/uploads/sites/2/2024/01/eABC-VehicleDynamics.pdf>.

© Б. С. Завертанний, докт. філософії,
інженер-конструктор,
ORCID: 0009-0001-7492-3663,
e-mail: zavertannyi@stu.cn.ua
(ТОВ «ПЕТ ТЕХНОЛОДЖИЗ»);
© Г. В. Пасов, канд. техн. наук, доцент кафедри,
ORCID: 0000-0001-7248-9085,
e-mail: genapasov@gmail.com
(Національний університет
«Чернігівська політехніка»);
© М. С. Завертанний, канд. техн. наук,
науковий співробітник,
ORCID: 0000-0002-8415-8555,
e-mail: zavertannyi@gmail.com
(Інститут електрозварювання
імені Є. О. Патона НАН України)

© Bohdan Zaveretannyi,
Doctor of Philosophy, Design Engineer,
ORCID: 0009-0001-7492-3663,
e-mail: zavertannyi@stu.cn.ua
(LTD PET TECHNOLOGIES);
© Hennadii Pasov, Candidate of Technical
Science, Associate Professor,
ORCID: 0000-0001-7248-9085,
e-mail: genapasov@gmail.com
(Chernihiv Polytechnic National University)
© Myroslav Zaveretannyi,
Candidate of Technical Science, Researcher,
ORCID: 0000-0002-8415-8555,
e-mail: zavertannyi@gmail.com
(E.O. Paton Electric Welding Institute)

ГЕОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОКОВЗУВАННЯ ШИН АВТОМОБІЛЯ ПО ДОРОЖНЬОМУ ПОЛОТНУ ПРИ НЕОПТИМАЛЬНОМУ РОЗВАЛІ (КУТІ УСТАНОВКИ КОЛІС)

GEOMETRIC ANALYSIS OF CAR TIRE SLIPPAGE ON THE ROAD SURFACE WITH NON-OPTIMAL CAMBER (WHEEL MOUNTING ANGLE)

Анотація. Тертя поверхні шин авто по дорожньому покриттю є одним із найбільших чинників дисипації енергії під час руху авто та нагріву автомобільної шини. Насамперед від тертя залежать втрата потужності, термін експлуатації та ресурс самої шини. Зрозуміло, чим більше кут установки коліс, тим більш нерівномірно та інтенсивно буде стиратися шина. Також від кута установки колеса може залежати пляма контакту шини авто з дорожнім покриттям, що зі свого боку впливає на параметри гальмування автомобіля, такі як уповільнення та пройдений шлях після початку гальмування. Особливо важливими є оцінка експлуатації шини в усталених режимах та на великих пробігах. У роботі проведено аналіз впливу кута розвалу автомобільного колеса на швидкість тертя по лінії контакту шини колеса з дорожнім покриттям. Описано принцип проковзування поверхні шини колеса відносно дорожнього покриття. Наведено причини виникнення відносного проковзування шини колеса по дорожньому покриттю. Приведено схеми розподілення швидкостей, проковзування і сил тертя по довжині лінії взаємодії шини колеса з дорожнім покриттям.

Ключові слова: розвал, сходження, кут установки колеса, шина, проковзування, тертя.

Abstract. Today, it is hard to imagine modern society without automobile transport. Automobile transport is actively used in everyday life, in industry and in other areas, its number is also actively increasing. There is mass motorization of the population. During the movement of the car, there is a dynamic change in the angle of convergence of the wheels, which is caused by the structural features of the suspension system and the car control system. Due to the fact that reducing the energy consumption of equipment and road transport as a separate component of technological processes is a very relevant issue today, there is a need to reduce useful energy losses during the operation of automobile transport. Also, to the above, we can add the effect of losses of useful energy on wear and tear in contact pairs of road transport and road surfaces on which the latter moves. **Goal.** The purpose of the work is to investigate the influence of geometric friction of the wheel tire sliding on the road surface in the presence of a camber angle in line with the rolling friction, to conduct an analysis of wheel tire slippage relative to the rolling pole. **Methodology.** In order to achieve the given task, it is necessary to reveal the essence of the concept of slippage, its effect on the linear speeds of discrete sections of the tire, and to determine the changes in slippage characteristics depending on the wheel camber angle. **Originality.** The effect of the geometrical friction of the wheel tire sliding on the road surface was studied taking into account the camber angle along with the rolling friction, an analysis of the wheel tire sliding on the road surface relative to the rolling pole was carried out. The essence of the concept of skidding, tires on the road surface, its influence on the linear speeds of discrete sections of the tire is revealed. **Conclusions.** A geometric analysis of the influence of tire slippage of a car wheel on the road surface in the presence of a tire camber angle was carried out. The essence of the geometric friction of the wheel tire sliding on the road surface in the presence of a camber angle along with rolling friction is revealed. The principle of sliding of the upper tire of the wheel relative to the road surface is described.

Keywords climb camber, wheel installation angle, tires, slipping, friction.

Вступ

Сучасне суспільство важко уявити без автомобільного транспорту. У повсякденному житті, у промисловості та інших сферах він активно використовується, а також активно зростає його кількість. Відбувається масова автомобілізація населення. З плином часу та збільшенням кількості моделей транспорту відбувається і його технічне вдосконалення, впровадження нових технологій та конструкцій. Велику роль у вдосконаленні транспорту відіграє ціль забезпечення паливної економічності. Важливе значення в енергозатратах має вплив контакту шини та дорожнього полотна, адже саме в результаті контакту коліс і дорожнього полотна відбувається рух автомобіля. Вищевказане приводить до висновку, що процес взаємодії дорожнього полотна та шини автомобіля суттєво впливає на довговічність шин та паливну економічність. На ці показники великий вплив мають кути установки коліс.

У процесі руху автомобіля відбувається динамічна зміна кута сходження коліс, що спричинено конструктивними особливостями системи підвіски та системи керування автомобілем.

Через те, що на сьогодні дуже актуальним питанням є зниження енергозатрат обладнання та автомобільного транспорту як окремої складової технологічних процесів, виникає потреба у зменшенні втрат корисної енергії у процесі експлуатації автомобільного транспорту. Також до вищевказаного можна додати вплив втрат корисної енергії на знос у парах контакту автомобільного транспорту та дорожніх покриттів, по яких пересувається останній.

Аналіз публікацій. Сучасні автомобілі – це не просто засоби пересування окремих людей та перевезення різних груп вантажів. Це складні механічні системи для виконання завдань з підтримки та розвитку економіки країн, з'єднання окремих регіонів та навіть континентів. Але водночас це доволі енергоємні механізми, для приведення в рух яких хімічна або електрична енергія перетворюється в механічну. Та досить часто не вся енергія, надана автомобілю, спрямована на виконання корисної роботи. Дуже часто енергія просто розсіюється під час контакту колеса автомобіля з дорожнім покриттям [1–6].

У роботах [1,3-5] розглянуто вплив кута

установки коліс на витрату палива двигуном автомобіля. Проведене порівняння впливу як відхилення кута установки коліс назовні від кузова автомобіля, так і всередину.

У роботах [2, 6, 7] проаналізований вплив кута установки коліс на керованість автомобіля та вказана можливість зміни кутів установки коліс автомобіля на перехідних режимах руху. Описуються методи підвищення продуктивності колісних машин зміною передавальних відношень від органу управління до коліс. Однак автори не розглядають впливу проковзування шин авто по дорожньому полотну в умовах зміни кута установки коліс на енергозатрати. Також у вищевказаних роботах не розглянуто впливу зміщення полюса кочення на геометричне проковзування шин авто відносно дорожнього полотна.

У циклі робіт [8-10] проведене оцінювання опору коченню шини під час початку руху авто, а також – дослідження нагріву шин та підвищення тиску в шині. Також розглядається опір шини автомобіля коченню під час старту авто. Але проводиться моделювання методом скінчених елементів за допомогою прикладних програм, що потребує математичного описання та проведення моделювання тертя і проковзування шин автомобіля по дорожньому полотну в умовах зміни кута установки коліс та дослідження дисипації енергії.

Мета і постановка завдання. Беручи до уваги вищенаведений аналіз джерел інформації, які пов'язані з питанням кута установки коліс, а також їхнього впливу на експлуатацію автомобільного транспорту, витрати палива та стійкість авто на дорожньому полотні, можна зробити висновок, що на сьогодні вплив кута сходження коліс на проковзування шини по дорожньому полотну вивчено недостатньо. Великої складності цим дослідженням додає відсутність обладнання для проведення випробувань на дорожніх полотнах, яке дало б змогу розглядати вплив кута установки коліс на їхнє проковзування по дорожньому полотну під час руху автомобіля. Динамічна зміна положення коліс відносно дорожнього полотна, що відбувається через перемінну динаміку руху автомобіля та не ідеальність дорожнього полотна можуть призводити до зміни кута сходження коліс при реальній експлуатації транспорту. Але попри динаміку руху можна вважати кут установки

коліс статичним значенням для узагальнення значень отриманого проковзування.

Метою роботи є дослідження впливу геометричного тертя ковзання шини колеса по дорожньому полотну за наявності кута розвалу поряд із тертям кочення, проведення аналізу проковзування шини колеса відносно полюсу кочення.

Для досягнення поставленої задачі необхідно розкрити сутність поняття проковзування, його вплив на лінійні швидкості дискретних ділянок шини та визначити зміни характеристик проковзування від кута розвалу колеса.

Основна частина

Аналіз рівноваги сил тертя між шиною та дорожнім покриттям

Надійний контакт шини з дорожнім покриттям обумовлений кількома факторами, які прямо впливають на характер та величину проковзування шини по поверхні дорожнього покриття, до яких входять:

1. Умова, що забезпечує постійне фрикційне з'єднання шини з дорожнім покриттям, яка визначається рівновагою сили тертя [11]. У розглянутому випадку це чисте тертя кочення, у місці контакту (полюсі кочення), та тертя кочення із проковзуванням (із тертям ковзання) у інших точках взаємодії шини з дорожнім покриттям:

$$F_t = F_p \cdot f = F_o \cdot \beta. \quad (1)$$

де: F_t – сила тертя, Н;

F_p – сила притискання шини до дорожнього полотна, Н;

f – коефіцієнт тертя матеріалів шини та дорожнього полотна;

F_o – обертове зусилля, Н;

β – коефіцієнт запасу зчеплення (вибирається з таким розрахунком, щоб в усіх можливих режимах роботи шина автомобіля не мала можливості проковзувати (пробуксовувати) по дорожньому полотну).

2. Умова збереження стабільної роботи за зміни швидкісних режимів. Для зниження витрат енергії на тертя при різних режимах роботи автомобіля та зменшення напруженості роботи контактної пари шина – дорожнє покриття, необхідно щоб відповідне співвідношення величини сили притискання F_p та F_t були постійними [11]:

$$F_p / F_t = \text{const.} \quad (2)$$

3. Також до факторів, що мають вплив на проковзування, доцільно віднести як геометричні так і масо-інерційні параметри шини та колеса з приводом загалом.

4. Фактор можливості руху на мокрих поверхнях. Процес руху автомобіля може здійснюватися як по мокрому дорожньому полотну, так і по сухому [12]. У першому випадку коефіцієнт тертя менший, ніж у другому ($f_1 < f_2$), тому для збереження фрикційного контакту шини з дорожнім покриттям необхідно збільшити зусилля притискання шини $F_{p1} = F_{p2} \frac{f_2}{f_1}$, що є майже неможливим без зміни ваги автомобіля або ширини шини.

6. Фактор геометричного проковзування шини по дорожньому полотну, який виникає через неоднакову зміну лінійної швидкості по довжині контакту шини автомобіля та дорожнього полотна і залежить від геометричних та конструктивних параметрів шини, тиску в шині та підвіски автомобіля.

Вказані умови роботи пари шина автомобіля – дорожнє покриття повинні враховуватися як у виборі матеріалу шини автомобіля і поверхні дорожнього полотна, так і в процесі розрахунку та конструювання підвіски і рульового керування автомобіля. Особливу увагу необхідно приділяти максимальному зменшенню величини ковзання, що можливо досягти за рахунок визначення раціональних кутів установки коліс.

Аналіз проковзування шин авто по дорожньому полотну

Одним з основних факторів, що має суттєвий вплив на роботу фрикційної пари шина – дорожнє покриття є геометричне ковзання. Геометричне ковзання спонукає до нерівномірного проковзування шини з наявним кутом установки колеса по рівному дорожньому полотну, що призводить до нерівномірного зносу шини по всій довжині. Розглянемо шляхи, що дозволять зменшити величину геометричного проковзування. Для проведення аналізу проковзування, як базову теорію, застосуємо та адаптуємо алгоритм розрахунку проковзування [13]. Роботу кінематичної пари шина – дорожнє покриття з прямолінійними твірними і лінійним контактом можна розглядати в загальному випадку як кочення конуса (шина) по поверхні циліндра (дорожнє

покриття) з незбіжними вершинами, де: O - вершина конуса, O' - вершина циліндра, яка знаходиться на безкінечній відстані від полюса кочення P (рис. 1). Роботу кінематичної пари шина – дорожнє покриття можна представити епюрами розподілу швидкостей ковзання v_k та сил тертя F_f по довжині лінії контакту (рис. 1).

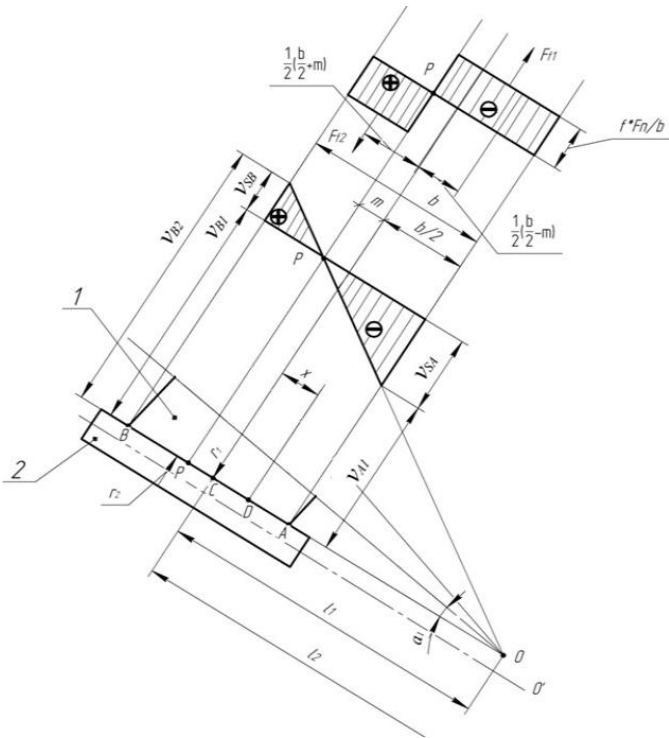


Рис. 1. Схема розподілення лінійних швидкостей, проковзування і сил тертя по довжині лінії контакту шини колеса з дорожнім покриттям: 1 – шина колеса; 2 – дорожнє покриття.

Під час кочення шини по дорожньому полотну швидкість по довжині лінії контакту AB змінюється не рівномірно $v_{A1} < v_{B1}$ відповідно в точках A та B . На дорожньому полотні – швидкість у цих самих точках має однакове значення і дорівнює швидкості в полюсі кочення P – $v_{A2} = v_{B2} = v$. В полюс кочення P лінії контакту AB має місце чисте кочення, у всіх інших точках – кочення відбувається з проковзуванням зі швидкостями відповідно v_{SA} та v_{SB} , на ділянці PA ковзання відбувається з від'ємним знаком, а на ділянці PB з додатнім.

При повній відсутності навантажень полюс кочення P лежить посередині лінії контакту AB , а моменти сил тертя M_{f1} і M_{f2} між поверхнями дорожнього полотна та шини, що виникають відповідно, на ділянках PA і PB зрівноважені.

При навантаженні пари контакту полюс кочення P зміщується. При цьому сила тертя F_{f1} , що виникає на ділянці PA , відіграє негативну роль – гальмує шину відносно дорожнього полотна, а сила тертя F_{f2} , що виникає на ділянці PB , навпаки, розганяє її. Приймавши початок координат в посередині контактної лінії AB в точці C ($AC=CB$). Координату x до вершини шини т. O вважаємо позитивною. Координату m яка визначає положення полюса кочення P вводимо в усі залежності також зі своїм знаком: «мінус» при зміщенні від середини до основи конуса шини і «плюс» при зміщенні полюса кочення P до вершини т. O .

Різницю моментів сил тертя M_{f1} і M_{f2} , які виникають від сил тертя F_{f1} і F_{f2} врівноважує момент опору M_r на дорожньому полотні [14]. Під M_r розуміють повний момент опору на дорожньому полотні, зокрема корисний опір, а також тертя кочення шини по дорожньому полотну.

$$M_r = F_{f1} \cdot \left(r_2 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{b}{2} + m \right) \cdot \sin(\alpha_2) \right) - F_{f2} \cdot \left(r_2 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{b}{2} - m \right) \cdot \sin(\alpha_2) \right). \quad (3)$$

$$F_{f1} = q_n \cdot f \cdot \left(\frac{b}{2} - m \right);$$

$$F_{f2} = q_n \cdot f \cdot \left(\frac{b}{2} + m \right);$$

$$r_2 = l_2 \cdot \sin(\alpha_2) = \text{const};$$

$$l_2 = \infty; \quad q_n = \frac{F_n}{b}.$$

де:

q_n – нормально розподілене навантаження, Н/м;

α_2 – кут нахилу твірної дорожнього полотна ($\alpha_2=0$), рад;

l_2 – відстань від полюса кочення P до вершини дорожнього полотна т. O' ($l_2=\infty$);

b – довжина лінії контакту AB шини з дорожнім покриттям, м.

Після підстановки і перетворень в загальному вигляді:

$$M_r = -q_n \cdot f \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \left(m^2 - 2 \cdot m \cdot l_2 - \frac{b^2}{4} \right). \quad (4)$$

Оскільки дорожнє покриття плоске та нерухоме, то момент опору M_r може бути прийнятий рівним нулю $M_r = 0$.

Аналогічно до попереднього різниця моментів сил тертя M_{f1} і M_{f2} відносно ведучого валу шини дає момент на пакуванні:

$$M = -q_n \cdot f \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \left(m^2 - 2 \cdot m \cdot l_1 - \frac{b^2}{4} \right). \quad (5)$$

де:

l_1 – відстань від полюса кочення т. Р до вершини конуса шини т. О, м;

α_1 – кут нахилу твірної шини, рад.

Координати полюса кочення з урахуванням моменту на шині та потужності тертя при геометричному ковзанні визначаємо з наступного виразу (5):

$$m = l_1 - \sqrt{l_1^2 + \frac{b^2}{4} - \frac{M^2}{q_n \cdot f \cdot \sin(\alpha_1)}}. \quad (6)$$

Далі вважаємо, що обертова сила F_t прикладена в полюсі кочення, тоді момент опору:

$$M = -F_t \cdot (r_1 - m \cdot \sin(\alpha_1)) = -F_t \cdot (l_1 - m) \cdot \sin(\alpha_1). \quad (7)$$

Прирівнюючи (7) до (4) і враховуючи, що:

$$F_t = \frac{F_n \cdot f}{\beta} = \frac{q_n \cdot b \cdot f}{\beta}. \quad (8)$$

Отримаємо:

$$m = \left[1 + \frac{1}{\beta} \cdot \frac{b}{2 \cdot l_1} - \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2 \cdot l_1} \right)^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta^2} \right)} \right] \cdot l_1. \quad (9)$$

З метою зменшення ковзання відношення b/l_1 беруть якомога меншим [15] тому членами з співмножником $(b/2l_1)^2$ у формулі (9) можна знехтувати. Тоді з необхідною точністю можна вказати:

$$m \approx \frac{F_t}{F_n \cdot f}, \quad m \approx \frac{1}{\beta} \cdot \frac{b}{2} \quad (10)$$

Миттєве значення передаточного відношення пари дорожнє покриття – шина визначається виразом [14]:

$$i(m) = \frac{r_1 - m \cdot \sin(\alpha_1)}{r_2} = \frac{\sin(\alpha_1) \cdot (l_1 - m)}{r_2}. \quad (11)$$

У парі контакту шини з дорожнім покриттям при постійній обертовій силі $F_t = \text{const}$, полюс кочення т. Р зміщується залежно від швидкості руху авто та нерівності поверхні дорожнього полотна та сили притискання шини вздовж лінії контакту AB (від дії динамічних складових). Для крайового випадку, коли $F_t = F_p \cdot f$ і $\beta = 1$, координата полюса $m \approx 0,5b$, тобто полюс т. Р кочення співпадає з т. В, швидкість геометричного проковзування v_s досягає максимального значення. За умови подальшого зменшення зусилля притискання $F_t > F_n \cdot f$ та коефіцієнту зчеплення $\beta < 1$ буде відбуватися повне проковзування шини по дорожньому полотну – буксування.

Однією з найбільш важливих характеристик процесу є відносна швидкість проковзування ϵ_x шини по дорожньому полотну.

Швидкість відносного проковзування v_s в довільній точці D з координатою x (Рис.1) визначається різницею швидкостей дорожнього полотна і шини v_1 і v_2 :

$$v_s = v_1 - v_2 = -\frac{(l_2 - l_1) \cdot (x - m)}{(l_2 - m) \cdot (l_1 - m)} v \quad (12)$$

Відносна швидкість геометричного проковзування шини по дорожньому полотну в загальному випадку:

$$n_x = \frac{v_s}{v} = -\frac{(l_2 - l_1) \cdot (x - m)}{(l_2 - m) \cdot (l_1 - m)}. \quad (13)$$

Врахувавши у виразі (13), що $l_2 = \infty$, можна прийняти $l_2 - m \approx l_2 - l_1$, тоді вираз геометричного проковзування набуває вигляду:

$$n_x = -\frac{x-m}{l_1-m}. \quad (14)$$

Повного усунення геометричного проковзування можна досягнути за умови $\alpha_1=0$. Це можливо за умови ідеального дотримання кута встановлення колеса і відсутності податливості підвіски (її абсолютної жорсткості).

За допомогою отриманих залежностей можна визначати епюри зносу шин по дорожньому покриттю та використовувати їх у подальших дослідженнях втрат енергії на тертя проковзування в парі шина – дорожнє покриття, та їхній вплив на паливну ефективність автомобіля.

Висновки

На сьогодні кут установки коліс, тобто кут нахилу коліс відносно площини дорожнього полотна, має суттєве значення для визначення найбільш характерних умов зносу шини колеса та розсіювання енергії під час експлуатації. Також варто вказати, що кут установки коліс впливає на режими та витрати палива під час руху автомобіля. Виходячи з наведеного, дослідження впливу кута установки коліс є важливою та невід'ємною частиною розвитку як сучасного автомобілебудування, так і трибології.

Проведено геометричний аналіз впливу проковзування шин автомобільного колеса по дорожньому полотну у разі наявності кута розвалу шин.

Розкриті сутність геометричного тертя ковзання шини колеса по дорожньому полотну за наявності кута розвалу разом із тертям ковзання.

Доповнено дослідження авторів у суміжних наукових темах теоретичним розрахунком місць найбільшого тертя по поверхні шини. Також доповнено можливість уточнення та аналіз найнапруженіших місць тертя поверхні шини та дорожнього полотна для аналізу дисипації енергії в парі тертя.

Математично описано принцип проковзування поверхні шини колеса відносно дорожнього покриття.

У розрізі отриманих результатів відбувається проведення подальших теоретичних та експериментальних досліджень. Розглядається проведення математичного моделювання втрат енергії від проковзування та тертя, а також вплив проковзування на знос шин авто. Також проводяться лабораторні

дослідження для порівняння результатів математичного моделювання із результатами тестування фізичних зразків.

References

1. Barhe, S. G., and Gawalwad, B. G. (2016). Measurement of wheel alignment using IR sensor, *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, Vol. 4, ISSN 2349-4476, 2016.
2. Verbytskyi V. H. (2016). Doslidzhennia kutiv skhodzhennia kolis pry riznykh shvydkostiakh rukhu avtomobilia [Study of the angles of convergence of the wheels at different speeds of the car]. *Avtomobil i Elektronika. Suchas-ni Tekhnolohii*, 10, 81-85 [in Ukrainian].
3. A. K. Patil and V. L. Kadlag. (2016). Design of wheel alignment measuring system using infrared transmissions, *International Journal of Technical Research and Applications*, e-ISSN: 2320-8163, 4, 5, 4-6.
4. R. Furferi, L. Governi, Y. Volpe, and M. Carfagni. (2013). Design and assessment of a machine vision system for automatic vehicle alignment, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10, 242.
5. Das, R. K., Hossain, A. M., Islam, T., & Banik, S. C. (2022). Effect of front right toe-out angles on fuel consumption for a light vehicle. *South Florida Journal of Development*, 3, 3, 3724-3735.
6. Shcherbina A. V. (2016). Zmina kutiv skhodzhennia kolis na perekhidnykh rezhymakh rukhu avtomobilia [Changing the angles of convergence of the wheels in the transition modes of the car]. *Avtomobil i Elektronika. Suchas-ni Tekhnolohii*, Vol. 10, 97-102 [in Ukrainian].
7. Zhuravel D. P., Bondar A. M. (2020) Perspektyvnyi sposib pidvyshchennia kerovanosti kolisnykh mashyn [A promising method of improving the controllability of wheeled vehicles]. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. Melitopol: TDAU*, Vol.20, t. 4, 279[in Ukrainian].
8. Karpenko, V., Kaps'kyi, D., Rudenko, N., & Neskreb, E. (2021). Determining the starting time of car movement to stabilize the internal pressure and the temperature in the tires. *Automobile Transport*, 48, 38-44. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2021.48.0.38>
9. Karpenko, V., Voropay, O., & Neskreb, E. (2022). Indirect assessment of the rolling resistance of a car tire in the starting mode of motion. *Automobile Transport*, 50, 5-13. <https://doi.org/10.30977/AT.2019-8342.2022.50.0.01>
10. Karpenko, V., Neskreb, E. (2022). Refined assessment of tire rolling resistance in the starting mode. *Automobile Transport*, 51, 5-13. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2022.51.0.01>
11. Popov S. V., Buchynskyi M. Ya., Hnitko S. M., Cherniavskyi A. M. (2019). Teoriia mekhanizmiv tekhnolohichnykh mashyn: pidruchnyk dlia studentiv mekhanichnykh spetsialnostei zkladiv vyshchoi osvity [Theory of mechanisms of technological machines: a textbook for students of mechanical specialties of higher education institutions]. *Navch. posibny'k* [in Ukrainian].
12. Cui, H., Wang, Q., Lian, Z. et al. (2019). Theoretical Model and Experimental Research on Friction and Torque Characteristics of Hydro-viscous Drive in Mixed Friction Stage. *Chin. J. Mech. Eng.* 32, 80.
13. O. P. Manoilenko, B. S. Zavertannyi, O. O. Akymov. (2020). The research of the process of forging a rolling roller through the pack of the final form of rewinding machines. *Vlákna a textil (Fibres and Textiles)*. 27, 2, 69-73.
14. Syvak R. I., Derevenko I. A. (2014). Korotkyi kurs teoretychnoi mekhaniky [A short course in theoretical mechanics]. *Navch. posibny'k* [in Ukrainian].
15. Miniailo A. V., Tishchenko L. M., Mazorenko D. I. (2013). Detali mashyn [Machine details]. *Navch. posibny'k* [in Ukrainian].

УДК 629.113.001 (075.8)

DOI: 10.33868/0365-8392-2025-1-282-35-43

© Т. Л. Крайник, головний конструктор
 ORCID: 0009-0003-7530-6194
 e-mail: taras.kraynyk@gmail.com
 (АТ «Укравтобуспром»);
 © М. О. Манзяк, ад'юнкт
 ORCID: 0000-0002-5634-9231,
 e-mail: mishael1780@ukr.net
 (Національна академія сухопутних
 військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного)

© Taras Kraynyk, Chef-Designer
 ORCID: 0009-0003-7530-6194
 e-mail: taras.kraynyk@gmail.com
 (JSC «Ukratobusprom»);
 © Mykhaylo Manziak, Postgraduate
 ORCID: 0000-0002-5634-9231,
 e-mail: mishael1780@ukr.net
 (Hetman Petro Sahaidachnyi
 National Army Academy)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДВІСКИ АВТОМОБІЛЯ В УМОВАХ БЕЗДОРІЖЖЯ

EXPERIMENTAL EVALUATION OF CAR SUSPENSION EFFICIENCY IN OFF-ROAD CONDITIONS

Анотація. Опрацьовано методику та проведено експериментальні дослідження з оцінки ефективності двох типів підвіски автомобілів підвищеної прохідності для бездоріжжя, насамперед з умов обмеження швидкості руху через вібронавантаження на екіпаж. Враховуючи нестабільність фізико-механічних характеристик реального бездоріжжя та практику нормативних баз армій НАТО обрано випробувальні ділянки з перешкодами руху та твердою опорною поверхнею. Нещодавня поява у військовій автотехніці незалежних підвісок типу Timoney/Oshkosh TAK-4 зі збільшеною у 1,7-2,2 рази амплітудою ходу обумовлює, окрім звичної оцінки вібронавантаженості – комфортності руху, додатково і оцінку ефективності кінематики підвіски у поєднанні з пружно-демпфуючими характеристиками. Проведено експериментальні дослідження двох легких автомобілів, що використовуються Збройними Силами в умовах бездоріжжя, – ударного автомобіля переднього краю – LTV02 „Мамай” (з незалежною підвіскою) та УАЗ 3151 (з підвіскою залежного типу), з фіксацією вібронавантажень як в умовах визначених тестових площадок, так і реального бездоріжжя.

Ключові слова: автомобілі, бездоріжжя, підвіски, кермовий привід, оцінка ефективності.

Abstract. This paper presents a scientifically grounded methodology for evaluating the vibration impact and ride comfort of wheeled military vehicles under off-road operating conditions. The study focuses on the influence of suspension parameters and structural layout on the transmission of vibrations to the vehicle crew, particularly the driver. Two commonly used light tactical vehicles were selected for comparative experimental investigation: the LTV02 “Mamai” with a modern independent suspension system, and the UAZ-3151, equipped with a traditional dependent suspension. Experimental tests were conducted using standardized speed-reducing obstacles, paved surfaces, and sections of deformed terrain resembling real operational environments.

The methodology includes both direct measurement of vibration acceleration levels transmitted to the driver's seat and spectral analysis of the obtained signals in accordance with ISO 2631-1. The experimental setup incorporated accelerometers installed on the seat base and vehicle chassis, with subsequent analysis performed using MATLAB-based algorithms. Particular emphasis was placed on assessing the critical speeds at which suspension bottoming occurs—serving as a practical criterion for determining suspension performance under dynamic impact conditions.

The study highlights the significance of implementing long-travel independent suspensions (with stroke amplitudes increased by a factor of 1.7–2.4), as seen in modern NATO-standard vehicles such as those utilizing Timoney or Oshkosh TAK-4 systems. The “Mamai” vehicle demonstrated substantially reduced levels of vertical vibration and extended permissible travel speeds, while the UAZ-3151 showed high levels of vibration exposure even at moderate speeds. The research underlines the importance of updating national technical regulations for military vehicle suspensions to align with modern combat requirements and to improve crew endurance, vehicle survivability, and mission effectiveness in off-road conditions.

Keywords: military vehicles, suspension effectiveness, vibration exposure, experimental testing, spectral analysis, off-road dynamics, ride quality, tactical mobility.

Вступ

Мережа автомобільних доріг без твердого покриття в Україні є значно більшою у порівнянні з країнами ЄС, що обумовлює і відповідну актуальність ефективності підвісок ав-

томобілів з умов віброколивних навантажень на організм людини. Окрім цього, в умовах війни вкрай важливим є швидкісні режими (тобто мобільність руху у термінології НАТО) військової автомобільної техніки (ВАТ) бездоріжжям, максимальні значення якої знову

ж такі обмежуються досягненням граничних, допустимих для організму людини рівнів віброколивних навантажень.

В Україні фактично відсутня нормативна база, що регламентує вимоги – порогові значення допустимих вібронанавтажень для колісних транспортних засобів (КТЗ) як загального призначення, так і військової автотехніки (ВАТ). А власне рівень вібронанавтажень і є основою комфортності перевезень [1]. Прийняття з 2005 р. міжнародного стандарту ISO 2631-1[2] щодо загальної оцінки вібронанавтажень на організм людини та наявність державно-санітарних норм стосовно їхнього допустимого рівня щодо водія (як оператора на робочому місці впродовж 8 годин) [3] не впливає на систему сертифікації – допуску до експлуатації КТЗ загального призначення. Щодо ВАТ, то тут загалом відсутня нормативна база для приймальних випробувань та оцінки мобільності (що однозначно регламентовано у військових стандартах провідних країн НАТО [4-6]). Відповідно очевидна актуальність формування і практичної апробації методики експериментальної оцінки ефективності підвіски як основи мобільності руху автомобілів бездоріжжям.

Основна частина

У процесі робіт з розробки та виробництва легких ударних автомобілів переднього краю – військових баггі LTV 02 «Мамай» (ТУР KB 02) були проведені випробування цих машин за процедурою, максимально наближеною до відповідних нормативних баз країн НАТО, зокрема Великобританії [7]. Однак, окрім нормативних вимог до підвіски ВАТ високої та підвищеної прохідності – доступний перепад висот нерівностей/хід підвіски 200-150 мм та допустимий період затухання коливань 0,75-0,65 с, програмою випробувань передбачено оцінку вібронанавтаженості на екіпаж в умовах бездоріжжя та динаміки переміщення з умови досягнення граничного ходу стиску, так званою «пробою», критичного по дискомфорту. Якщо оцінка вібронанавтажень на екіпаж є традиційною під час досліджень ефективності підвіски, зокрема для автомобілів загального призначення, то оцінка динаміки ходу підвіски з фіксацією максимальних швидкостей руху, під час яких настає «пробій»,

обумовлена поточним переходом ВАТ НАТО на нове покоління машин переднього краю та його забезпечення, що обладнані незалежними підвісками зі значно збільшеними у 1,7-2,4 рази амплітудами ходу (Timoney/Oshkosh TAK – 4 й інші, зокрема закуплена ще у 2013 р. ліцензія і для КамАЗ [8]).

Нестабільність фізико-механічних характеристик, вмісту вологи та різнотипність бездоріжжя обумовили практику оцінки прохідності та мобільності руху ВАТ у нормативній базі (військових стандартах) на спеціальних ділянках з твердою опорною поверхнею та відповідними перешкодами руху. Експериментальну оцінку вібронанавтажень – плавності руху автомобілів, насамперед загального призначення, найбільш часто проводять на спеціальних випробувальних ділянках з твердими опорними поверхнями типу «бельгійська бруківка». Остання, однак, з огляду на ВАТ і бездоріжжя, має відносно невеликі перепади висот та їхню зміну залежно від ширини колії автомобіля [9]. Сьогодні в Україні відсутня атестована випробувальна ділянка типу «бельгійська бруківка». Тому в межах підготовки та апробації проекту військового стандарту (ВСТ) щодо вимог та оцінки відповідності тактико-технічних характеристик ВАТ, їхньої плавності руху, опрацьовано уже звичні для офіційних, зокрема українських, автодилерів випробувальну ділянку для підвіски кросоверів, **рис. 1**. Ділянка має послідовно розміщені та викладені з бруківки три пагорби, так звані «лежачі поліцейські» та 14 асиметрично викладених (для збурення і поперечних коливань) заокруглених перешкод з поступовим зростанням висоти вершин від 5 до 10 см, ідентичних для реального діапазону зміни ширини колії автотехніки всіх вагових категорій та цільового призначення.

Для порівняльної оцінки, окрім легкого ударного автомобіля «Мамай» (**рис. 1**), до випробувань було залучено і розповсюджений у силових структурах автомобіль підвищеної прохідності близького масо-габаритного класу УАЗ 3151 зі звичною для ВАТ попередніх поколінь залежною підвіскою (**рис. 2**). Окрім відповідно меншого у 1,75 рази ходу підвіски та менших на 200 мм ширини колії та біля 400 мм колісної бази (у порівнянні з «Мамай») УАЗ має більшу (на 600 кг) повну масу при

практично однаковому корисному навантаженні (700 та 750 кг). Відповідна різниця у споряджених масах обумовлена іншою конструкцією відкритого каркасного кузова «Мамай» зі склопластиковим облицюванням та

відсутністю дверей, а також і значно меншою (практично на 120 кг) непідресореною масою, через відсутність балок передньої та задньої осей із залежною ресорною підвіскою.



Рис. 1. Автомобіль «Мамай» під час проїзду ділянки з оцінки плавності руху



Рис. 2. Автомобіль УАЗ під час проїзду підвищеного пішохідного переходу (оцінка граничної швидкості для «пробою» підвіски)

Проведені випробування автомобілів, обладнаних комплексом необхідної вимірювальної апаратури [10], з поетапним збільшенням на 5 км/год швидкості руху, засвідчили значні відмінності у формуванні віброколивних навантажень, зокрема результируючих значень вертикальних прискорень на автомобілях з вищезгаданими типами підвісок. Як приклад, на **рис. 3** представлено порівняння прискорень на сидінні водія УАЗ та «Мамай» під час руху з постійною швидкістю 30 км/год. Значення прискорень у зоні задньої осі (пасажирів другого ряду сидінь) є більшими на 25-30 %. Спроба проїзду ділянки на УАЗ зі швидкістю 40 км/год закінчилась скиданням швидкості водієм через досягнення відчутного дискомфорту зі значним збільшенням віброприскорення – понад $1,7-1,9 \text{ м/с}^2$, що спричинило болісні, неприємні відчуття в людини і визначається у дослідженнях як

гранично допустимі [11-13]. Аналогічна ситуація для автомобіля «Мамай» з незалежною довгоходовою підвіскою відбулася на швидкості 55 км/год. Загалом оцінка віброколивних навантажень – плавності руху, згідно з чинним українським законодавством [2], повинна базуватись на гранично допустимих значеннях – порогових рівнях коливань і вібрацій з розподілом по зоні частот збурення 1.0-63.0 Гц. До цього обов'язковим чинником формування порогових, гранично допустимих значень вібронавантажень є середня тривалість поїздки екіпажу, визначення якої в умовах війни є доволі проблемною. Однак, під час планування руху ВАТ при орієнтовно відомому типі і стані бездоріжжя у практиці армій НАТО формуються максимально допустимі швидкості руху – мобільність ВАТ власне з умов дотримання допустимих, порогових значень віброколивних навантажень [4, 6].



Рис. 3. Типові віброколивні навантаження на робочому місці водія під час проїздки випробувальної ділянки зі швидкістю 30 км/год

Другим аспектом оцінки комфортності – плавності руху в умовах бездоріжжя є значна частка віброколивних поздовжніх і поперечних (до напрямку руху) навантажень, на відміну від автодоріг із твердим покриттям, де однозначно домінують вертикальні віброколювання. Нормативна база ДСТУ – ISO [2] чітко регламентує оцінку тільки за кількісно найбільшим, домінантним напрямком збурень, не беручи до уваги і не підсумовуючи інші, що цілком допустимо для автодоріг з твердим покриттям або залізниці. Як показали проведені випробування, такі критерії можуть занижити оцінку на бездоріжжі на 20-40 % (залежно від конкретних умов руху). На практиці досліджень, пов'язаних насамперед з БАТ армій Великобританії та США, за основу оцінки взято не добровільний стандарт ISO [2], а стандарт Великобританії BS 6841 [14], де враховуються всі три типи збурень та проводиться результуюча оцінка із врахуванням значимості кожного з напрямів та частот збурень.

Поява у БАТ нового покоління довгоходових незалежних підвісок зі збільшеною амплітудою ходу [8] дає змогу охопити понад 96-98 % площ бездоріжжя, як опорної поверхні, з перепадом висоти до 400 мм без вкрай неприйнятної «пробою» підвіски [11]. Це обумовлює необхідність і введення окремих тестів – випробувань БАТ щодо відповідної експериментальної оцінки підвіски. Наведена вище оцінка плавності руху, зрештою як і інші [11-13 тощо], базується на найрозповсюдженіших перепадах висот нерівностей, що вкла-

даються у амплітуди ходів підвіски до 250-300 мм. Звичайні заміри амплітуди переміщення коліс на підвісці є недостатніми – реальні переміщення формуються як пружно-демпфуючими характеристиками підвіски, так і динамікою навантаження на колесо. Максимально дискомфортним для екіпажу є удар напрямних підвіски у верхній обмежувач ходу – так званий «пробій» підвіски, коли виникає жорсткий зв'язок підресорених мас (кузова) та опорної поверхні. Останній пов'язаний не лише з амплітудою ходу підвіски, але і з її пружно-демпфуючими властивостями та динамікою навантажень на колесо, що своєю чергою залежить від швидкості руху. Відповідно, у цьому плані практичний інтерес викликає визначення порогового, критичного значення швидкості руху, за якої виникає пробій під час наїзду на певну, визначену перешкоду. Висота останньої може бути і меншою теоретичного ходу стиску підвіски. На формування пробою впливає динаміка навантаження на підвіску, що формується і кінетичною енергією автомобіля – швидкістю руху. В ролі такої порогової перешкоди було опрацьовано декілька варіантів, зокрема переїзд через стандартний бордюр та підвищений пішохідний перехід – стандартний у ЄС та Україні засіб сповільнення руху, рис. 2 [15]. Найбільш інформативним, за результатами заїздів, визначено власне перехід у виконанні обмеження швидкості автомобілів до 30 км/год, що забезпечує знакозмінні навантаження на підвіску (в'їзд і з'їзд на підвищений пандус) та стабільність характеристик опор-

ної поверхні до і після перешкоди (на відміну від бордюра). На **рис. 4** представлено зафіксовані вертикальні прискорення для обох автомобілів за швидкості руху 30 км/год. Це дало змогу констатувати більш ніж 2,5-3-кратну різницю в амплітудах прискорень на робочому місці водія для різних типів підвіски. Про-

бій підвіски УАЗ був зафіксований уже під час збільшення швидкості до 35 км/год, а для «Мамай» – до 55 км/год, що можна визначати як критичні швидкості руху з умови ударів підвіски на бездоріжжі з перепадом висот нерівностей понад 10 см.

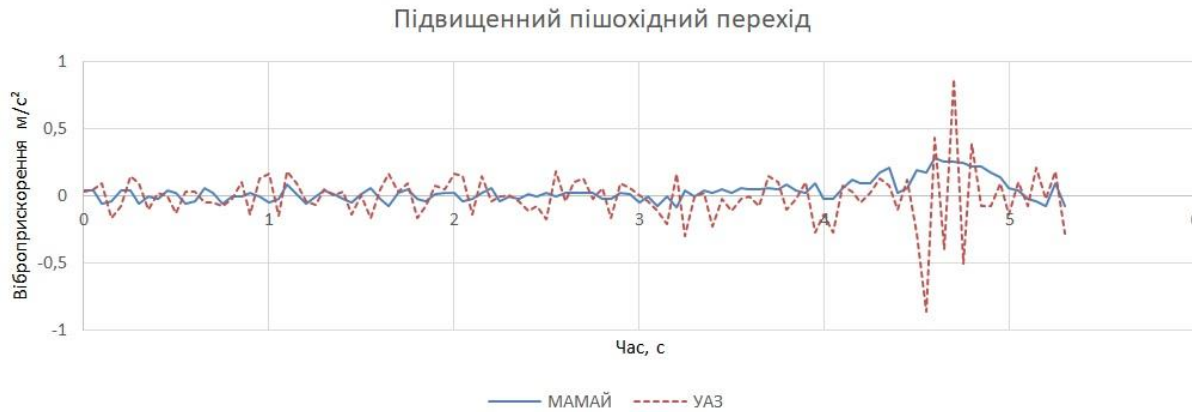


Рис. 4. Типові віброколивні навантаження на місці водія при переїзді підвищеного пішохідного переходу згідно з ДСТУ 4123:2020 за 30 км/год (у виконанні переходу для обмеження швидкості 30 км/год)

Практика використання порогових перешкод руху для оцінки ефективності підвіски розповсюджена як серед досліджень в Україні, так і за кордоном [9, 10, 16 тощо]. Проблема власне у виборі найбільш ефективної і стандартизованої перешкоди, зокрема і з умов відтворюваності оцінок різними випробувальними установами та коректності порівняльних оцінок різних конструкцій. Також звична оцінка ефективності підвісок на прямих випробувальних ділянках практично не відображає впливу підвіски на стійкість та керованість руху на поворотах – крени підвіски та узгодження кінематик кермової трапеції / тяг кермового приводу та напрямних елементів підвіски, розходження яких є максимальним власне під час «пробою» підвіски або відриву колеса від опорної поверхні [17].

Відповідно були проведені випробування в умовах реального бездоріжжя з оцінкою стійкості, керованості та віброколивних навантажень на горбистій місцевості, покритій травою (**рис. 5**), а також в умовах розмоклого болотистого бездоріжжя (**рис. 6**). Зрозуміло, що опорні поверхні, що деформуються під впливом навантажень від коліс автомобіля, дещо зменшують (на 10-25 %) віброколивні навантаження на кузов при співставних висо-

тах нерівностей, насамперед залежно від вмісту води в ґрунті (піщані поверхні не досліджувались). «Пробій» підвіски та відрив коліс від опорної поверхні є абсолютно реальними за умови перепадів висот нерівностей більших на 5-15 см у порівнянні з результатами випробувань на асфальтобетоні зі штучною перешкодою – підвищеним пішохідним переходом (**рис. 2**) при співставних швидкостях руху. Вібронавантаженість на поверхнях, що деформуються, теж дещо зменшується за умови висот нерівностей до 10-15 см, однак, на реальних місцевостях – бездоріжжі достатньо висока частка нерівностей з більшою висотою, що загалом дає змогу ставити рівень вібронавантажень у безпосередню залежність від швидкості руху (частоти збурень). З іншого боку, допустимий рівень дії на організм людини прямо залежить і від частоти збурень (тут швидкість) і тривалості (тут час руху) [2, 9-10, 14 тощо]. Зближення значень коефіцієнтів зчеплення та опору руху на бездоріжжі, особливо зволоженому та мокрому, суттєво зменшує ефект впливу на керованість руху відхилень від рівноважної точки суміщення кінематик переміщення важелів / напрямних підвіски та кермового приводу в порівнянні із



Рис. 5. Випробування на горбистій місцевості з умов оцінки амплітуди ходів підвіски та ймовірності пробоя і зависання коліс з умов стійкості та керованості руху



Рис. 6. Випробування та оцінка вібронавантажень, стійкості та керованості в умовах розмоклого бездоріжжя

сухим асфальтобетоном автодоріг I категорії, на яких і прийнято оцінювати стійкість і керованість руху [18]. Відповідно це обумовлює певні відмінності та введення послідовно-зворотнього процесу проектування і розрахунку підвіски з контролем відповідності заданим вимогам (у нашому випадку у програмних середовищах Matlab Simulink та

Solidworks), узагальнена структура чого представлена на **рис. 7**.

Прийняття в Україні з 2004 р. як національного стандарту норм – загальних вимог щодо оцінки впливу вібрацій (віброколивань) на людину ISO 2631-1 [2] дає змогу сформулювати адекватні до міжнародної практики гранично допустимі значення – порогові рівні коливань і вібрацій у зоні частот 1.0-63.0 Гц для

автомобілів загального призначення. Однак, щодо військової автотехніки переднього краю та його підтримки (автотранспорт тилового забезпечення можна віднести до загального

призначення) очевидно необхідне формування окремої нормативної бази з огляду на практику використання та поточний перехід ВАТ армій НАТО на нове покоління машин.

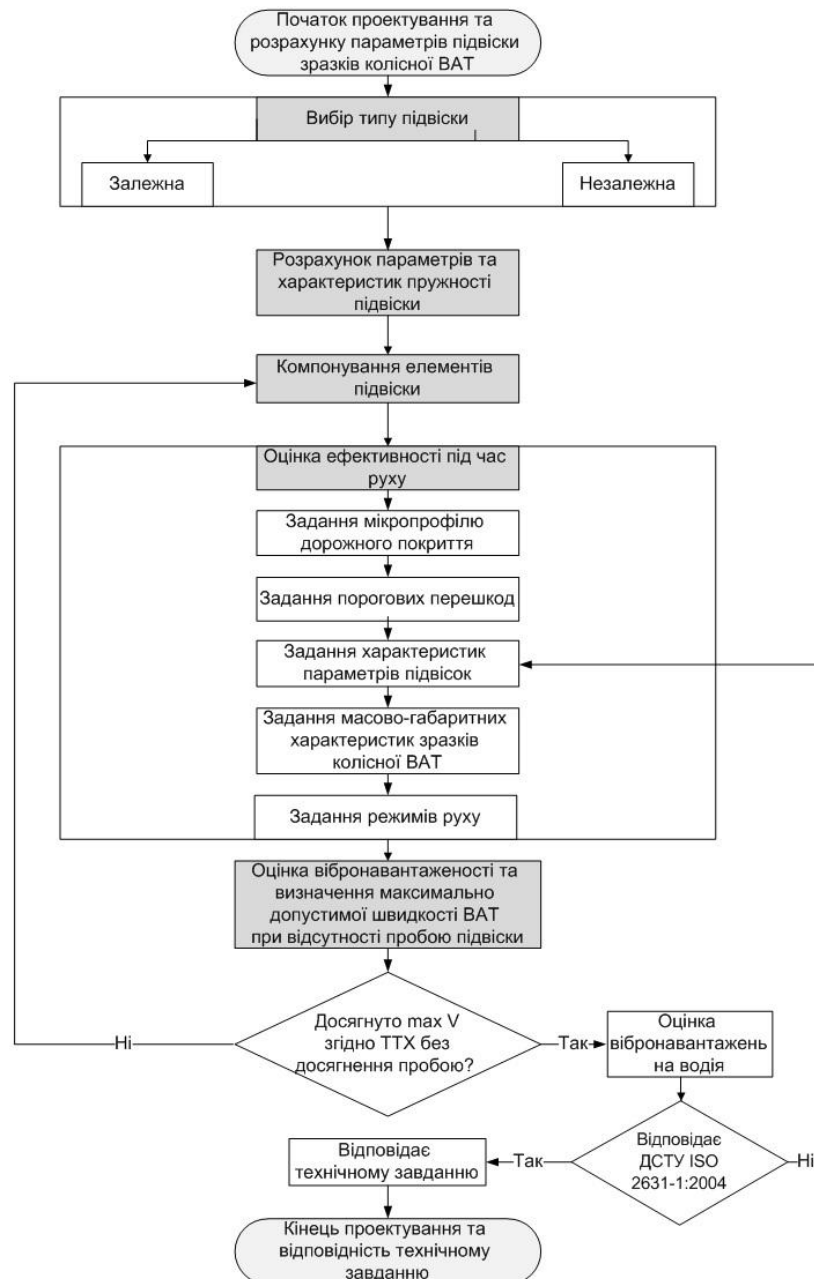


Рис. 7. Схема визначення параметрів підвіски зразків колісної ВАТ (тут: ТТХ – тактико-технічні характеристики, max V – задана максимальна швидкість)

Умови мобільності сучасних військових операцій та необхідність оновлення парку ВАТ ЗС України диктують нагальну потребу у формуванні відповідної нормативної бази, перспективного типу та структури автопарку, зокрема з врахуванням нещодавньої тенденції (при переході на нове, 4-е покоління

ВАТ армій НАТО) уже промислового впровадження довгоходових незалежних механічних підвісок зі збільшеною у 1,5 – 2,2 рази амплітудою повного ходу підвіски (до 400 – 460 мм) та поступового впровадження активних / напівактивних підвісок із автоматикою регулювання пружних / демпфуючих характерис-

тик відповідно до конкретних умов руху – бездоріжжя.

Висновки

Віброколивні навантаження на водія / екіпаж є реальним чинником (а в арміях НАТО і регламентовано нормативним актом – NATO Reference Mobility Model – NRMM), що обмежує максимально можливі швидкості руху (мобільність) військової автотехніки бездоріжжям під час планування операцій і перевезень. Ключову роль у цьому аспекті відіграють пружно-демпфуючі характеристики підвіски та амплітуда її ходів (ймовірність дискомфортних так званих «пробоїв» підвіски), значно менший вплив мають шини та тиск повітря у них. У колишніх ГОСТ в СРСР, на відміну від військових стандартів країн НАТО щодо ВАТ, не регламентовано вимоги щодо оцінки ефективності підвісок у цьому аспекті. Реалії сучасних воєн та актуальність гармонізації нормативної бази ЗС України з аналогами країн НАТО обумовлюють актуальність та практичну значимість такої роботи.

Експериментальна оцінка ефективності підвісок ВАТ (зрештою як і оцифровані вимоги до характеристик) у нормативних базах США, Великобританії та інших країн НАТО, проводиться на твердій опорній поверхні, зокрема зі спеціальними штучними перепадами висот, що обумовлено як нестабільністю фізико-механічних характеристик бездоріжжя (вміст вологи та твердість), так і значною різноманітністю типів і станів бездоріжжя. Останнє використовується тільки як демонстраційні заїзди, здебільшого під час порівняння різних моделей чи типів автомобілів.

Опрацьована методика експериментальної оцінки віброколивних навантажень – плавності руху на спеціальній випробувальній ділянці з твердою опорною поверхнею. У зв'язку з відсутністю в Україні акредитованої випробувальної ділянки типу «бельгійська бруківка» у ролі останньої апробовано розповсюджену в автодилерів кросоверів в Україні та ЄС (насамперед VW) випробувальний майданчик – бруківка з послідовно викладеними трьома

пороговими перешкодами, так званими «лежачими поліцейськими» та 14 асиметрично викладених (для збурення і поперечних коливань) заокруглених перешкод із поступовим зростанням висоти вершин від 5 до 10 см. Більші перепади висот нерівностей та однаковий їхній розподіл для всіх можливих значень колії автомобілів забезпечує наближенішу оцінку плавності руху / віброколивань до реалій бездоріжжя з врахуванням усіх трьох складових напрямків – вертикальних, поперечних і поздовжніх.

Враховуючи появу так званих довгоходових підвісок типу Timoney / Oshkosh TAK-4 на новому поколінні ВАТ НАТО запропоновано окрему експериментальну оцінку амплітуди ходів та пружно-демпфуючих характеристик підвіски шляхом визначення максимальних швидкостей руху, за яких відбувається «пробій підвіски» (оцінка енергомісткості підвіски і амплітуди ходів) шляхом проїзду по стандартизованій перешкоді – підвищеному пішохідному переході для обмеження швидкості руху до 30 км/год (ДСТУ 4123:3020). Проведені випробування автомобілів УАЗ 3151 з залежною ресорною підвіскою та ТУР KB02 «Мамай» із незалежною пружинною і збільшеною у 1,65 рази амплітудою ходів засвідчили практично пропорційну різницю у порогових швидкостях руху щодо появи ефекту пробою підвіски – 35 км/год і 55 км/год відповідно (випробування проводились з кроком наростання швидкості 5 км/год).

В умовах життєво необхідного оновлення автопарку ЗС України (зрештою й інших структур, що експлуатують автотехніку в умовах бездоріжжя) першочерговим є розроблення відповідного стандарту – ДСТУ В «Військова автомобільна техніка. Прохідність і мобільність руху. Технічні вимоги та оцінка відповідності». В останньому, за аналогією з практикою країн НАТО, необхідні наведені вище вимоги щодо підвіски, як визначального елемента комфортності та мобільності руху бездоріжжям.

References

1. Trollius M. (2002). Povedinka transmissiyi kolisnykh pidvisok dlya lehkovykh avtomobiliv u chastotnomu diapazoni, shcho vidpovidaye komfortu. [Transmission

behavior of wheel suspensions for passenger cars in the frequency range corresponding to comfort.]. Stuttgart: Schaber-Verlag. 326. [in Germany].

2. State Standard of Ukraine DSTU ISO 2631-1:2004. Vibration and shock are mechanical. Assessment of the

impact of general vibration on a person. Part 1. General requirements. (ISO 2631-1:1997, IDT) [Valid from 2004-11-30]. Kyiv: *Derzhspozhivstandard of Ukraine*, 2004. 34. [in Ukrainian].

3. State sanitary standards of Ukraine. (2000). 3.3.6.039 – 99. Derzhavni sanitarni normy vyrobnychoyi zahal'noyi ta lokal'noyi vibratsiyi (31680). [3.3.6.039 – 99. State sanitary norms of industrial general and local vibration (31680)]. *Ministry of Health of Ukraine*, Kyiv, 35. [in Ukrainian].

4. Brigantic R. & Mahahn J. (2004), *Oboronnyy transport: alhorytmy, modeli ta zastosuvannya dlya 21-ho stolittya* [Defence Transportation: Algorithms, Models and Applikation for the 21st Century]. 1st Edition. Elsevier Science, 392. ISBN 9780080913858. Retrieved from <https://www.elsevier.com/books/defense-transportation-algorithms-models-and-applications-for-the-21st-century/brigantic/978-0-08-044405-5> (Accessed 5.11.2024) [in USA].

5. Grubel M. G., Kraynyk L. V. & Andrienko A. M. (2020). *Osnovy formuvannya natsional'noyi normatyvnoyi bazy shchodo prokhidnosti kolisnoyi viyskovoyi avtomobilnoyi tekhniky*. [Basics of the formation of the national regulatory framework regarding the passability of wheeled military automobile equipment]. *Armament systems and military equipment*. Kharkiv: KhNUPS named after Iv. Kozheduba. 2, 62, 7-17. Retrieved from <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.62.01> [in Ukrainian].

6. Lessem A., Mason G. & Ahlvin R. (1996). *Stokhastychni prohnozy mobilnosti transportnykh zasobiv z vykorystanniam etalonnnoyi modeli mobilnosti NATO*. [Stochastics vehicle mobility forecasts using the NATO reference mobility model]. *Journal of Terramechanics*, 1, 273 - 280. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(97\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(97)00010-4) [in USA].

7. Defence Standard. (1992). DEF STAN 23-6. *Posibnyk iz zahal'nykh tekhnichnykh vymoh do viys'kovoyi tekhniky ta rushnykovoyi tekhniky*. [DEF STAN 23-6. Guide to the Common Technical Requirements for Military Vehicles and Towel Equipment]. MODUK. Retrieved from <https://www.standards.globalspec.com/std/244958/def-stan-23-6>. [in England].

8. Manzyak M.O., Kraynyk L.V. & Grubel M.G. (2021). *Tendentsiyi rozvytku konstruksiy pidvisky viyskovykh avtomobiliv*. [Trends in the development of military vehicle suspension designs]. *Weapon systems and military equipment*, Kharkiv, KhNUPS, 65, 27 – 34. Retrieved from <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.65.04> [in Ukrainian].

9. Manzyak, M. O., Homa, V. V., Grubel, M. G., Kraynyk, L. V. and Salo, Ya. (2023). *Otsinka efektyvnosti pidvisky povnoprividnoho avtomobilya dlya bezdorizhzhya*. [Evaluation of the effectiveness of the suspension of a four-wheel drive car for off-road use], *Magazine "Bulletin of the Lviv National University of Nature Management. Agricultural engineering research"*. 27, 295–307. Retrieved from <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.096> [in Ukrainian].

10. Kraynyk L. V., Bur'yan M. V., Lanets O. V. and Kokhan V. F. (2022). *Plavnist' rukhu yak osnova komfortnosti avtomobiliv: formuvannya normatyvnoyi bazy "Vehicle road comfort"*. [Smoothness of movement as

the basis of car comfort: formation of the "Vehicle road comfort" regulatory framework.], *Scientific and industrial magazine "Automobile of Ukraine"*, 27, 96-100. Retrieved from <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2022-3-271-2-7>. [in Ukrainian].

11. Dushchenko V.V. (2018). *"Systemy pidresoryuvannya viyskovykh husenychnykh i kolisnykh mashyn: rozrakhunok ta syntezy"* [Suspension systems of military tracked and wheeled vehicles: education manual]. V.V.Dushchenko; end. O. I. Shpilova; National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkiv, FOP A. M. Panov, 336. ISBN: 978-617-7771-07-3 [in Ukrainian].

12. Kalchenko B. I., Kozhushko A. P. and Kiselyov A. R. (2017). *Otsinka plavnosti rukhu samokhidnoyi mashyny pry vplyvi nerivnostey poverkhni*. [Evaluation of the smoothness of the movement of a self-propelled machine under the influence of surface irregularities.]. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 30, 1252, 56-63. [in Ukrainian].

13. Kaidalov R. O., Bashtov V. M., Larin O. O. and Vodka O. O. (2015). *Eksperymental'ne otsynuvannya plavnosti khodu spetsializovanoho transportnoho zasobu z neliniynym pidresoryuvanniam pry rusi po bezdorizhzhyyu*. [Experimental evaluation of the smoothness of a specialized vehicle with a non-linear suspension when driving off-road.]. *Collection of scientific papers of the National Academy of NSU*. 2, 26, 27-31. [in Ukrainian].

14. BS 6841. (1987). *Guide to measurement and evaluation of human exposure to wheel body mechanical vibration and repeated shock*. *The British Standard Institution*. London. 30. [in England].

15. State Standard of Ukraine. (2020). 4123:2020 *Bezpeka dorozhn'oho rukhu. Zasoby zaspokoyennya pukhu. Zahal'ni tekhnichni vymohy*. [4123:2020 Road traffic safety. Means of calming fluff. General technical requirements.]. [Effective from 2020-11-01]. Kyiv. State enterprise "Ukrainian research and training center for problems of standardization, certification and quality", 21. [in Ukrainian].

16. Kalinovskiy A.Ya. and others. (2016). *Eksperymental'ni doslidzhennya vertykal'nykh kolyvan' spetsializovanoho transportnoho zasobu z neliniynym pidresoryuvanniam pry pereyizdi odynychnoyi nerivnosti*. [Experimental studies of vertical oscillations of a specialized vehicle with nonlinear suspension when traveling over a single bump.]. *Bulletin of NTU "KhPI", topic. issue "Dynamics and strength of machines"*, 58, 1100, 31-39. [in Ukrainian].

17. Kraynyk T. L., Hudz G. S. (2008). *Strukturnyy syntezy ta kinematyka sumishchennya kermovoho pryvodu i nezalezhnnoyi pidvisky avtomobilya*. [Structural synthesis and kinematics of the combination of the steering drive and the independent suspension of the car]. *Herald of the Khnadu*. Kharkiv, 41, 62-64 [in Ukrainian].

18. Kraynyk T. L., Hudz G. S. (2016). *Optyimizatsiya sumishchennya kinematyky kermovoho pryvodu ta peredn'oyi pidvisky avtomobilya metodamy komp'yuternoho 3D – syntezy*. [Optimization of the combination of kinematics of the steering drive and the front suspension of the car by the methods of computer 3D - synthesis.]. *Modern technologies in mechanical engineering and transport*. LNTU Luts'k, 2, 6, 101-104. [in Ukrainian].

© К. Ц. Главацький, канд. техн. наук,
доцент кафедри,
ORCID: 0000-0003-0921-9845,
e-mail: kazimir.glavatskij@gmail.com;
© М. М. Біневський, інженер-механік,
e-mail: kolyanbinyevskiy@ukr.net;
© В. Е. Черкудінов, магістр,
старший викладач кафедри,
ORCID: 0000-0003-3164-0329,
e-mail: volodymyrcherkudinov@gmail.com;
© П. Г. Анофрієв, канд. техн. наук,
доцент кафедри,
ORCID: 0000-0001-7997-3523,
e-mail: anofrievp@ukr.net
(Український державний університет
науки і технологій)

© Kazimir Hlavatskyi, Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor of the Department,
ORCID: 0000-0003-0921-9845,
e-mail: kazimir.glavatskij@gmail.com;
© Mykola Binevsky, mechanical engineer,
e-mail: kolyanbinyevskiy@ukr.net;
© Volodymyr Cherkudinov, Master, Senior Lecturer
of the Department,
ORCID: 0000-0003-3164-0329,
e-mail: volodymyrcherkudinov@gmail.com;
© Pavlo Anofriev, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department,
ORCID: 0000-0001-7997-3523,
e-mail: anofrievp@ukr.net
(Ukrainian State University of Science
and Technologies)

ПОШУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУБЧАСТОЇ ПЕРЕДАЧІ З ПЛАВНОЮ ЗМІНОЮ ПЕРЕДАТОЧНОГО ЧИСЛА ДЛЯ АВТОМАТИЧНИХ ТРАНСМІСІЙ

EXPLORATORY RESEARCH ON GEAR TRANSMISSION WITH SMOOTH GEAR RATIO CHANGE FOR AUTOMATIC TRANSMISSIONS

Анотація. З метою вдосконалення конструкції варіаторної трансмісії виконано обґрунтування доцільності розробки нової конструкції безступеневої зубчастої варіаторної передачі з зубцями у вигляді тіла обертання, для чого запропоноване принципове технічне рішення, розроблений і виготовлений прототип наявної моделі зубчастого варіатора, виконані дослідження на комп'ютерній 3D-моделі, проаналізовані їхні результати, розроблений механізм зміни передаточного числа, розроблена початкова конструкція зубчастої варіаторної трансмісії та визначені її основні структурні компоненти, виконано порівняння запропонованої конструкції зубчастого варіатора з відомими прототипами, окреслені перспективи застосування запропонованої схеми трансмісії із зубчастим варіатором.

Ключові слова: зубець, варіатор, модель, схема, модель, обґрунтування, дослідження, конструкція, навантаження, сила, параметри, передача, аналіз.

Abstract. In order to improve the design of the variator transmission, eliminate slippage in friction variators, increase the maximum torque and expand the range of gear ratio adjustment, a justification of the feasibility of developing a new design of a stepless gear variator with teeth in the form of a body of rotation was carried out, for which a principle technical solution of the tooth and tooth placement surfaces was proposed, a prototype-model of the current model of the gear variator was developed, manufactured and tested, which proved the possibility of implementing the proposed variator gear, preliminary prospective and search studies were performed on a computer 3D model of a gear transmission with teeth in the form of bodies of rotation, their results were analyzed, which allow us to confirm the feasibility of further development of the proposed technical solution, variants of the gear ratio change mechanism were developed and the initial version of the gear reducer with teeth in the form of bodies of rotation was developed, a tooth placement scheme on a toroidal gear was proposed wheel, an initial 3D model of the design of a toothed variator transmission was developed and its main structural components were determined, a variant of possible overall dimensions of the transmission with a toroidal toothed variator was presented, a comparison of the proposed design of a toothed variator with known prototypes was made, and the prospects for the application of the proposed transmission scheme with a toothed variator were outlined.

When developing the proposed design of a variator transmission, structural and technological features related to reliability, durability, maintainability, interchangeability, unification, and the possibility of optimal selection of materials for component parts were taken into account.

Keywords: tooth, variator, model, scheme, model, justification, research, design, load, force, parameters, transmission, analysis.

Вступ

Трансмісія є невід'ємною технічною частиною будь-якого колісного транспортного засобу, оскільки вона здійснює передачу крутного моменту від двигуна до ведучих коліс.

Одними з найголовніших показників будь-якої трансмісії є максимальний розрахунковий крутний момент та можливий діапазон регулювання передаточного числа. І в цьому сенсі маємо чітку градацію щодо застосування того чи іншого виду трансмісії. Автоматична трансмісія, зокрема варіаторна, не є винятком.

Застосування варіаторів є доцільним лише у випадку порівняно невеликих крутних моментів і нешироких діапазонів регулювання передаточного числа.

Головна їхня перевага – це можливість плавної зміни передаточного числа без розриву крутного моменту. За своєю природою це пристрої, у яких перетворення крутного моменту відбувається за рахунок сил тертя. І ця обставина суттєво впливає на основні показники, які згадані вище, і тим самим суттєво звужує сферу застосування варіаторів. Натомість цю нішу для енергоємних перетворювачів крутного моменту з нерозривним регулюванням зайняли гідравлічний привод (гідродинамічний та гідростатичний) та електроприводи.

Технології, що застосовуються в сучасному автомобілебудуванні, спрямовані на підвищення літрової потужності двигунів. І часто трапляються випадки, коли компактний та невеликий за розмірами двигун розвиває таку велику потужність, що застосовувати для нього варіатор не є можливим, а разом і з цим втрачається можливість безступеневого регулювання крутного моменту. Застосовувати гідростатику чи електропередачу в такому разі не доцільно, тому зараз ця проблема вирішується за допомогою багатоступеневих механічних автоматів, з великим набором планетарних рядів, гальм та багатодискових муфт, які суттєво ускладнюють конструкцію, збільшують її вагу та вартість.

З огляду на вищезазначене вдосконалення конструкції сучасних варіаторів з метою розширення їхніх експлуатаційних можливостей є перспективним та актуальним напрямом.

Метою даної роботи є вдосконалення конструкції варіаторної трансмісії (варіатора), підвищення максимального крутного моменту та розширення діапазону регулювання для створення деякої «перехідної» трансмісії, для випадків, коли застосовувати звичайний варіатор уже неможливо через обмеження

щодо крутного моменту, а застосовувати гідро- чи електропривод недоцільно через великі габарити і вагу таких приводів.

Мета та постановка задачі. Як уже згадувалося, метою даної роботи є створення деякої «перехідної» трансмісії – для застосування в енергоємних та водночас компактних приводах із можливістю безступеневого та безрозривного регулювання передаточного числа. Тому основна увага повинна бути приділена покращенню таких показників, як: максимальний крутний момент, діапазон регулювання передаточного числа, а також компактність. Ще одним важливим аспектом є спосіб регулювання передаточного числа. З огляду на сучасні технології він повинен передбачати керування від деякого електричного блоку, який буде підв'язаний до блоку керування транспортного засобу.

Основна частина

Запропоноване технічне рішення передбачає, що передусім необхідно змінити сам принцип передачі силового потоку, який у традиційному варіаторі здійснюється за рахунок сил тертя, оскільки для такого принципу характерні негативні ознаки:

- великі значення притискних сил у місці контакту;
- проковзування, яке неминуче виникає внаслідок самої природи такої передачі.

В силу існування цих ознак доводиться застосовувати для конструювання матеріали (зокрема, сталі) високої міцності. Це, з одного боку, не повністю вирішує проблему, а з іншого – технологія виробництва таких конструкцій є досить складною і дорогою. Також ця обставина негативно впливає на компактність конструкцій.

Пропонується замінити принцип передачі силового потоку у варіаторі в такий спосіб, щоб передача крутного моменту відбувалась не за рахунок виникнення сил тертя між ведучою і веденою ланкою (в деяких випадках також проміжною), а завдяки взаємодії поверхонь з обкочуванням одна відносно одної, як у традиційному зубчастому зачепленні. Варто зазначити, що в цьому аспекті відомо багато технічних рішень та патентів на винаходи [1-5], одне з них наведено нижче (**рис. 1**).

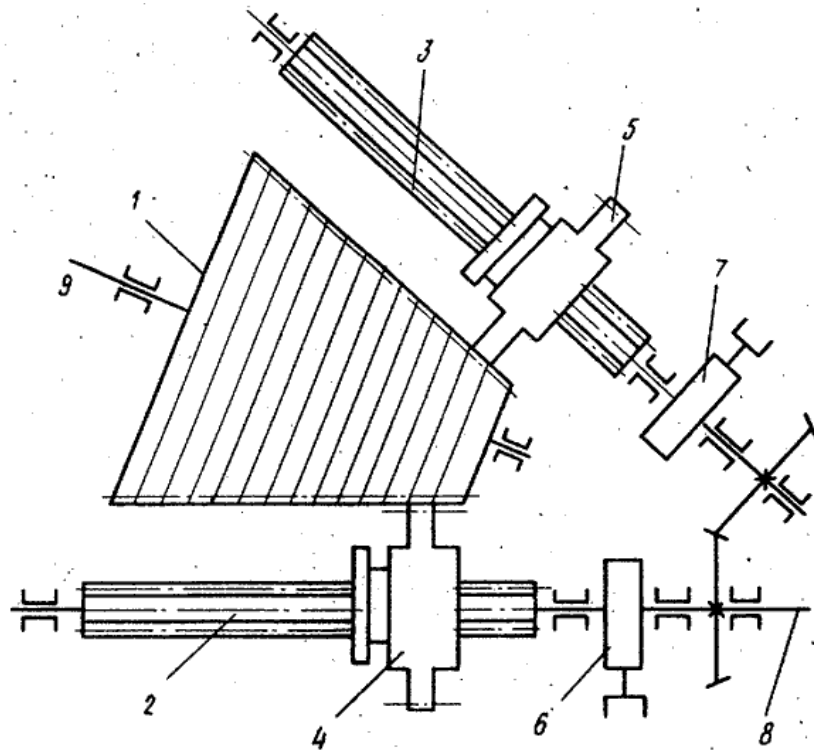


Рис. 1. Зубчатий варіатор: 1 – блок евольвентно-конічних коліс; 2 – основний шліцевий вал; 3 – додатковий шліцевий вал; 4, 5 – зубчасті колеса; 6 – муфта; 7 – додаткова електромагнітна муфта; 8 – вал ведучий

Без аналізу роботи наявних моделей важко оцінити ефективність цих конструкцій, але з рисунків аналогів однозначно можна зробити висновок, що представлені конструктивні рішення мають багато додаткових кінематичних зв'язків, низький рівень технологічності виготовлення (суцільні конусні зубчасті колеса), вузький діапазон регулювання передаточного числа і є досить громіздкими.

Очевидно, що для вирішення проблеми необхідно розробити певну нову зубчасту передачу, яка б працювала за принципом традиційного зубчастого зачеплення (обкочування двох евольвентних поверхонь одна відносно одної), характеризувалася сталим значенням модуля, але, наприклад, мала б подільне коло змінного діаметру.

Така передача дозволила б уникнути використання додаткових деталей та зв'язків між ними. Для цього пропонується конструкція зубчастого зачеплення, в якому використовуються зубці, утворені обертанням деякої кривої (наприклад, евольвентної) навколо вертикальної осі зубця, а також розміщення цих зубців на бічній поверхні зрізаного конуса по спіральній кривій із певним кроком, який визначає модуль зубчастої передачі (**рис. 2**).

Без навантаження площа плями контакту зубців буде мінімальною, а з навантаженням відповідно буде збільшуватися. Такий контакт двох поверхонь зубців дозволяє створити зубчасту передачу зі змінним передаточним числом. Однак такий характер контакту викликає надмірні значення напруження матеріалу зубців. Тому для такої конструкції необхідно розробити заходи для уникнення руйнування зубців від надмірного навантаження, яке зосереджене на мінімальній площі плями контакту.

Для вирішення проблеми проведемо аналогію із вузлами і складальними одиницями, в яких виникає подібне явище, наприклад – кулькові підшипники. Характер контакту тіл кочення у вигляді кульок з біговими доріжками кілець підшипника має дуже схожу ситуацію. Кульки не руйнуються оскільки, по-перше, матеріалом для кульок слугують спеціальні марки сталей, по-друге, навантаження передається через декілька кульок одночасно.

Попередньо скористаємось першим варіантом і призначимо матеріалом для зубців варіатора високоміцні і стійкі до спрацювання марки сталей.

Оскільки зубчасте колесо тепер є складальною одиницею, з'являється можливість

окремого виготовлення конусної маточини колеса і власне зубців. Це дозволить призначати різні марки сталей для деталей

зубчастого колеса, що також значно поліпшить технологічність виготовлення та ремонту.

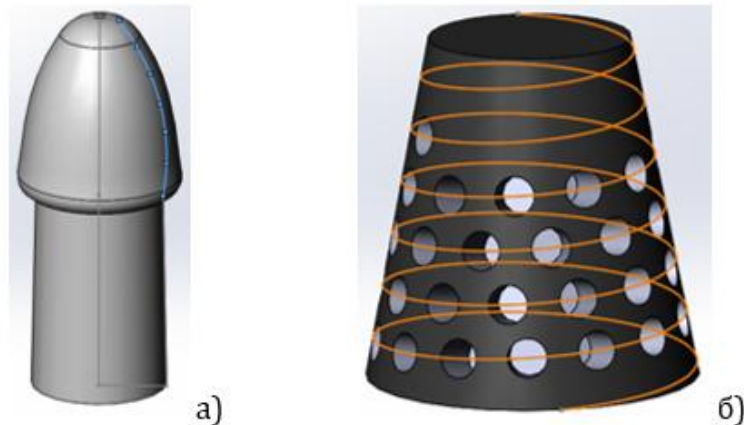


Рис. 2. Особливості конструкції зубчатих конусних коліс: а – утворення робочої поверхні зубця; б – схема розміщення отворів для встановлення зубців

Але для початку треба перевірити сам факт можливості існування зубчастої передачі зі змінним передаточним числом, а також упевнитися у її нормальній роботі, відсутності заїдання зубців унаслідок можливого явища інтерференції тощо. Для цього автори розробили й виготовили макет, який має спрощену конструкцію і виготовлений із матеріалів, які легко обробляються. Така модель дозволить у першому наближенні підтвердити існування концепції варіаторного зубчастого зачеплення, а також допомогти у вивченні кінематичного зв'язку.

Для виготовлення спрощеної робочої моделі (рис. 3) використані такі матеріали, як епоксидна смола (маточини конусного та

циліндричного коліс), алюмінієвий пруток (для виготовлення зубців), кулькові підшипники. Ведучий вал має суцільну різьбу, що дозволяє використовувати його також для регулювання передаточного числа шляхом переміщення вздовж його осі ведучої шестерні.

Очевидно, що модель, виготовлена з описаних матеріалів, не призначена для вивчення роботи варіатора під значними навантаженнями, проте вона гарно наочно демонструє можливість передачі обертання з можливістю регулювання передаточного числа. Також вона дозволяє впевнитися у відсутності таких негативних явищ, як заїдання та інтерференція в даному зубчастому зачепленні.



Рис. 3. Прототип зубчатого варіатора (діюча модель)

Оскільки можливість існування варіаторної зубчастої передачі підтверджена за допомогою діючої моделі, можна рухатися далі.

Наступний етап – визначення зусиль і напружень, які виникають у місці контакту двох зубців. Це врешті дозволить зробити висновок щодо максимального крутного моменту, який може передати (перетворити) варіатор.

Оскільки діюча модель виготовлена з матеріалів, що не дозволяють провести таке

визначення шляхом експерименту, скористаємося засобами комп'ютерного моделювання. Виконаємо попередній статичний аналіз досліджуваного зубчастого зачеплення з модулем 10 та навантаженням 2000 Н·м. Матеріал зубців та маточин – сталь AISI4340, найближчі аналоги якої: 40ХН2МА, 40Х2Н2. Діаметр маточини колеса встановимо 75 мм (рис. 4).

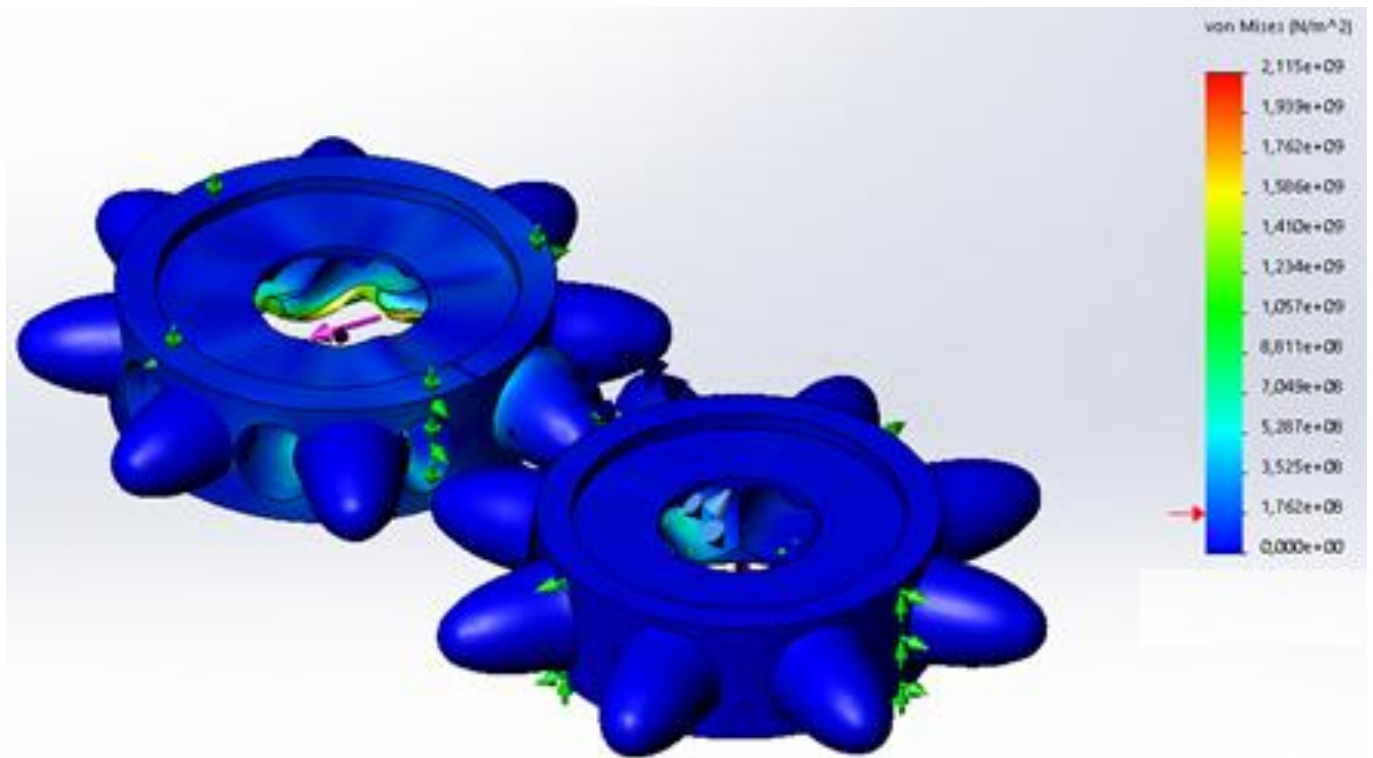


Рис. 4. Попередній статичний аналіз варіаторного зубчастого зачеплення

Такий експеримент демонструє прийнятний результат, оскільки в деталях не виникли граничні напруження. Деяке збільшення напруження спостерігається в корені робочої частини зубця та на ободі в місці кріплення зубця, що легко усувається конструктивними та технологічними засобами. Подальші дослідження та конструктивні розрахунки можуть бути проведені з метою оптимізації розмірів та форми зубчатих коліс, а також розрахунку варіатора під конкретний приводний двигун та навантаження.

Регулювання передаточного числа може здійснюватись одним із можливих видів приводу: електричним, гідравлічним або механічним. У компактній схемі зубчастого варіатора (рис. 5) регулювання передаточного числа відбувається шляхом переміщення ведучої шестерні вздовж шліцьового ведучого вала за

допомогою гвинтового регулювального механізму.

Зубчасте конусне колесо буває як монолітним, так і складальною одиницею. Окремо виготовлені зубці можуть бути певним чином закріплені в отворах конусного колеса. При цьому можливо досягти таких, на наш погляд, позитивних результатів:

1) можливості виготовлення зубців та конусного колеса з різних матеріалів, наприклад, для зубців можна вибрати високоміцні зносостійкі марки сталей, а для конусних коліс – звичайні конструкційні марки сталей;

2) можливості застосування різних видів термообробки для зубців та конусних коліс;

3) відсутності необхідності у вартісних операціях з утворення (нарізання) зубців, натомість можуть бути використані дешевші та

продуктивніші способи виготовлення, наприклад, штампування;

4) високої ремонтпридатності виробу;

5) можливості розміщення в одному корпусі з іншими деталями та вузлами, які працюють у масляній ванні;

6) використання недорогого мастильного матеріалу для варіатора.

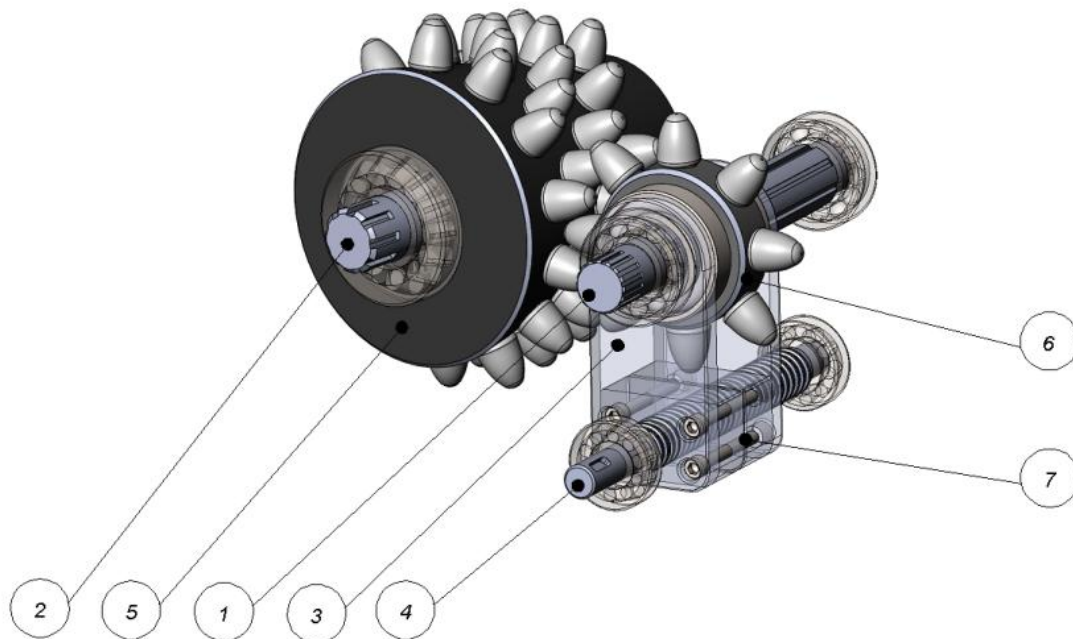


Рис. 5. Зубчастий варіатор: 1 – вал ведучий; 2 – вал ведений; 3 – кронштейн механізму регулювання передавального числа; 4 – гвинт механізму регулювання передавального числа; 5 – конусне зубчасте колесо; 6 – шестерня з ковзаючою муфтою; 7 – стяжний гвинт

Попередній висновок: зубчастий варіатор із варіаторним зубчастим зачепленням:

- по-перше, існує (всупереч традиційній теорії механізмів і машин);
- по-друге, має дуже багато сильних сторін порівняно з варіаторами тертя, а також наявними рішеннями зубчастих варіаторів.

Однак для практичного застосування в сучасній техніці розглянута компоновальна схема з конусним зубчастим колесом є не дуже прийнятною, оскільки таке колесо – досить металомістке та габаритне. Осі ведучого та веденого зубчастих коліс лежать в одній площині, але не паралельні. Також діапазон регулювання передаточного числа є недостатнім для використання в трансмісіях транспортних засобів і в кращому разі становить 1:1...1:2. Тому подальшу роботу щодо зубчастого варіатора спрямовуємо на пошук вирішення зазначених недоліків.

Одним із можливих варіантів вирішення проблеми є пошук оптимальної компоновальної схеми варіатора. Для цього проведемо порівняння схем варіаторів тертя (**рис. 6**). Розглянувши відомі наявні схеми варіаторів,

робимо висновок, що найбільш прийнятною для вирішення поставлених задач (розширення діапазону регулювання передаточного числа, зменшення ваги, габаритних розмірів, паралельність ведучого та веденого валів) є схема сферично-конічного (**в**) або торового (**д**) варіатора. Ведуче та ведене колесо такого варіатора мають певну схожість із конусними зубчастими колесами, проте твірною такого колеса вже є не пряма лінія, а деяка крива, радіус якої обумовлений радіусом повороту сателітних коліс. Потік потужності в такому варіаторі розподіляється на два потоки, що дає змогу вдвічі зменшити навантаження на зубчасту передачу, порівняно із конусним варіатором, або вдвічі збільшити навантажувальну здатність варіатора по крутному моменту. Механізм регулювання передаточного числа в такому варіаторі можна розмістити в центрі варіатора, між його робочими колесами, що дозволить додатково досягнути компактності конструкції.

Для початку необхідно впевнитися в тому, що принцип розміщення зубців на тороїдному зубчастому колесі по спіральній кривій з

однаковим кроком так само можливий, як на конусному. Для цього побудуємо 3D модель та проведемо порівняння (рис. 7).

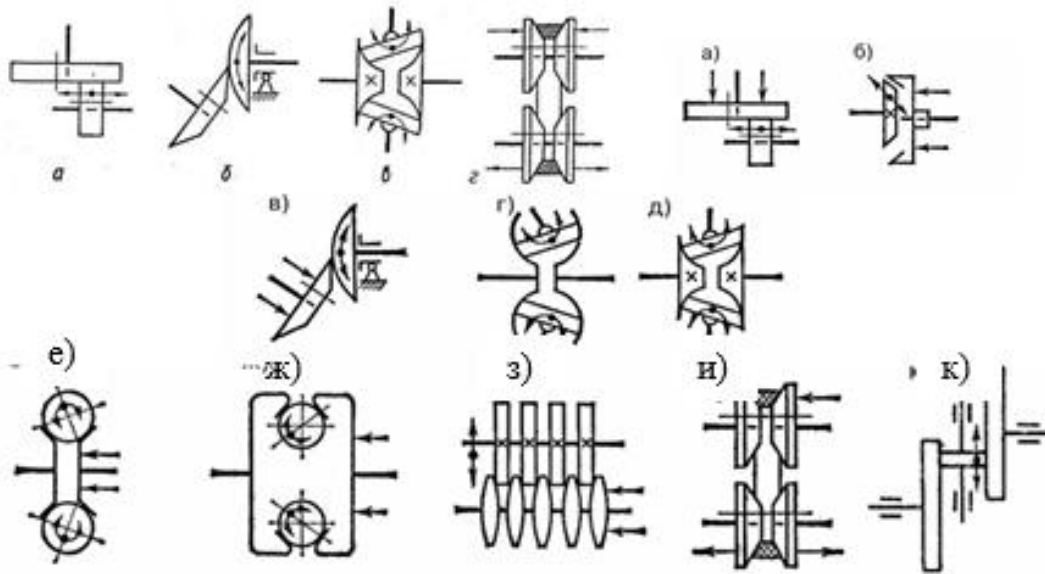


Рис. 6. Основні схеми фрикційних варіаторів: а) – лобовий; б) – конусний; в) – сферично-конічний; г), д) – торові; е), ж) – кульові; з) – дисковий (багатодисковий); и) – клинопасовий; к) – лобовий дводисковий

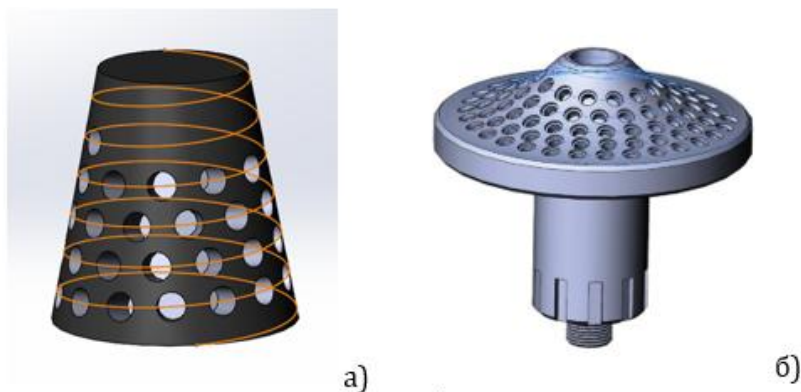


Рис. 7. Схеми розміщення зубців на конусному (а) та тороїдному (б) зубчастих колесах

Співставляючи отримані результати робимо **висновок:** на тороїдному зубчастому колесі розміщення зубців по спіральній кривій з деяким сталим кроком так само можливе, як на конусному. Це дозволяє рухатися далі у створенні тороїдного зубчастого варіатора.

У запропонованій схемі торового варіатора (рис. 8) для нежорсткого з'єднання ведучого вала із приводним двигуном у конструкції використовується гідродинамічний трансформатор крутного моменту 1. Він також дозволяє додатково змінювати передаточне число трансмісії відповідно до режиму роботи. Варіатор

складається власне з корпусу 3, передньої 2 та задньої 6 кришок. У кришках 2 і 6 розміщені підшипникові вузли ведучого та веденого торових коліс варіатора, а також ущільнення. У верхній та нижній частинах корпусу 3 – механізми коливання сателітів 4.

У центрі конструкції між тороїдними колесами та колесами сателітів міститься механізм зміни передаточного числа 7. У даній конструкції цей механізм виконаний як пара «гвинт – гайка». Привод механізму здійснюється від крокового двигуна 9 через черв'ячний редуктор 10 та конусну зубчасту передачу.

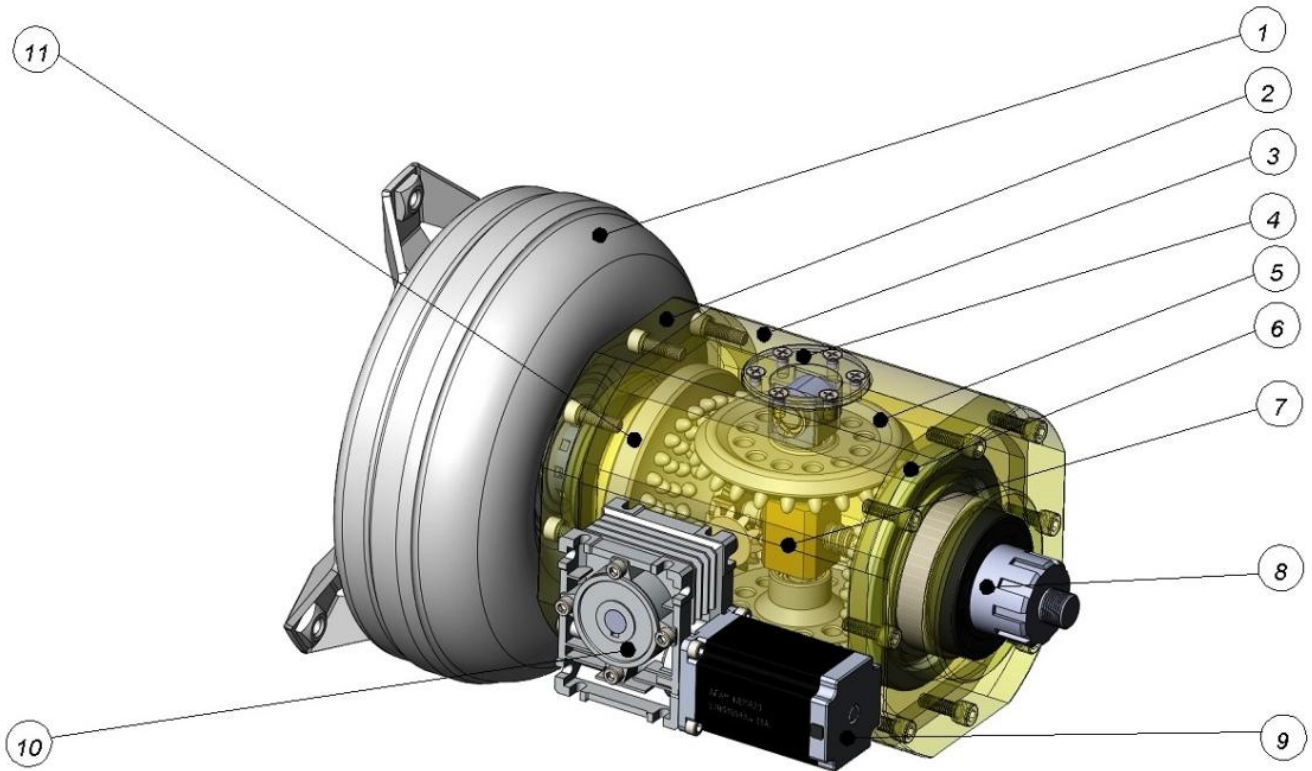


Рис. 8. Загальна будова зубчастої варіаторної трансмісії: 1 – гідротрансформатор; 2 – передня кришка; 3 – корпус; 4 – механізм коливання сателіту; 5 – сателіт; 6 – задня кришка; 7 – механізм зміни передаточного числа; 8 – ведений вал; 9 – кроковий двигун; 10 – черв'ячний редуктор; 11 – тороїдне зубчасте колесо із ведучим валом

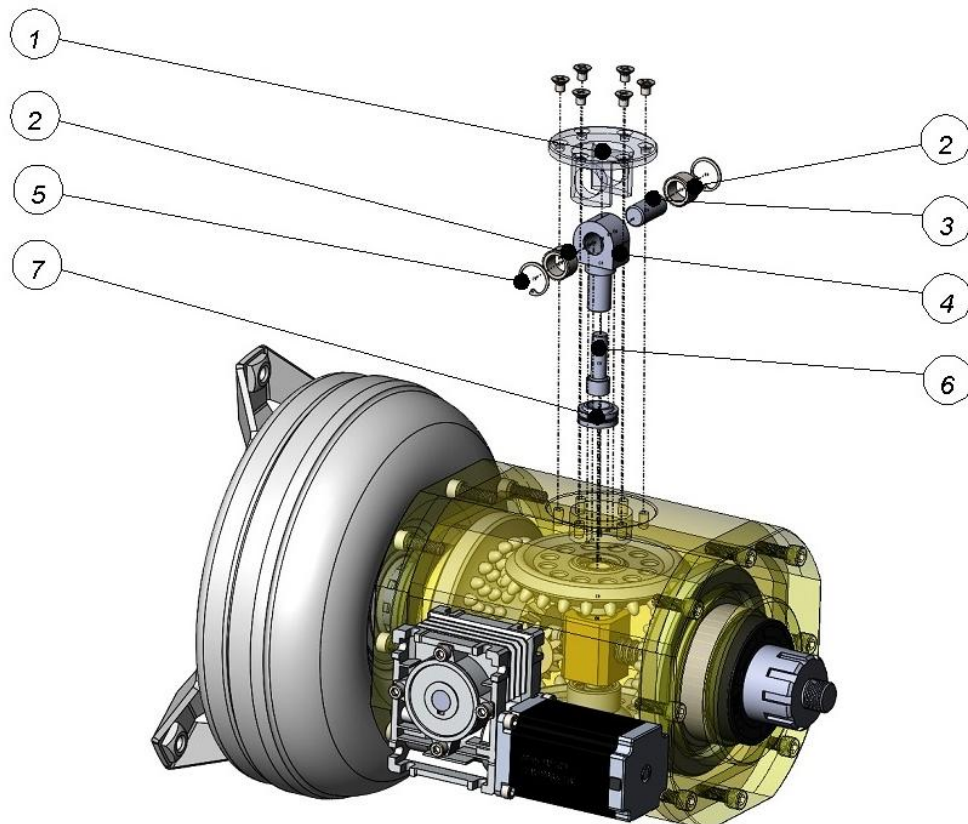


Рис. 9. Будова механізму коливання сателітів: 1 – кронштейн; 2 – голкові підшипники; 3 – вісь коливання; 4 – кривошип; 5 – стопорні кільця; 6 – шток; 7 – підшипник типу ШС

Таке конструктивне рішення має низку переваг:

- керування варіатором можливе від електричного блоку керування через драйвер;
- дуже проста, надійна та комерційно доступна схема.

Гайка механізму 7 містить підшипники типу ШС (GE), завдяки яким можна змінювати кут нахилу телескопічних осей сателітних коліс. Зміна передаточного числа варіатора можлива завдяки повороту сателітів 5 відносно осей механізму коливання сателітів 4.

У механізмі коливання сателітів (рис. 9) у корпус кронштейна 1 встановлені голкові підшипники 2. Кривошип 4 має можливість обертатися навколо вісі 3. Шток 6 та кривошип 4 в зборі утворюють вісь сателіта. Характерною особливістю такої конструкції є можливість зміни довжини осі, тобто телескопування. Це необхідно, оскільки зі зміною кута нахилу осі сателіту змінюється її довжина.

Зі ввімкненням механізму зміни передаточного числа обертальний рух від крокового електродвигуна через черв'ячний редуктор та конічну зубчасту передачу передається парі «гвинт-гайка», в результаті чого остання починає здійснювати поступальний рух. Оскільки підшипники 7 запресовані в гайку, поступальний рух передається на шток 6, що спричинює обертальний рух кривошипа 4 навколо осі 3. Завдяки цьому вісь сателіта змінює кут свого нахилу, що спричинює зміну передаточного числа варіатора.

З метою попередньої критичної оцінки отриманої трансмісії із зубчастим торовим варіатором виконаємо пошук новітніх конструкцій варіаторних трансмісій та спробуємо провести порівняння їхніх конструктивних особливостей. Для прикладу розглянемо одну з останніх розробок – Double Roller Full Toroidal Variator based IVT (DFTV-IVT) (рис. 10).

Тип представленого варіатора – тороїдний. З метою вдосконалення конструкції обертання від ведучого шківів до веденого передається не через одне тіло кочення (в даному випадку ролик), а через два. Таке конструктивне рішення дає низку переваг:

- ведучий і ведений шків мають однаковий напрям обертання;
- збільшення плями контакту тіл кочення, а отже – збільшення інтенсивності потужності та навантажувальної здатності конструкції;

- суттєве зменшення осьових сил у підшипникових вузлах роликів;

- відсутнє осьове навантаження у підшипникових вузлах ведучого та веденого шківів, очевидно через те, що в якості підшипників вибраний з лівого боку – кульковий радіальний, з правого – голковий або роликівий.

Також у цій конструкції передбачена можливість реверсу руху та можливість довготривалого від'єднання від приводного двигуна. Для цього використовується додаткова механічна коробка швидкостей із багатодисковими муфтами зчеплення та планетарна передача.

Порівнюючи варіаторну трансмісію (рис. 10) із трансмісією із зубчастим торовим варіатором, можна зробити такі висновки:

- конструктивна схема сучасного варіатора тертя значно поліпшена та відповідає дуже високому технологічному рівню. Проте вона не дозволяє повністю уникнути проковзування у місці контакту тіл кочення, на відміну від схеми, в якій використовується зубчасте зачеплення;

- відсутність осьових навантажень у підшипникових вузлах варіатора із подвійним роликом дає можливість суттєво зменшити навантаження на корпус агрегату, що дозволяє застосовувати для його конструювання менш міцні матеріали (наприклад, алюмінієві сплави замість сталі та чавуну) або меншу їхню кількість;

- сучасний торовий варіатор тертя та зубчастий торовий варіатор мають приблизно співставні розміри, однак у випадку першого маємо повноцінну автомобільну трансмісію з можливістю реверсу та тривалого від'єднання двигуна, тоді як зубчастий варіатор з тими ж розмірами не має таких можливостей.

Також, порівнюючи сучасні варіатори тертя (які б вони не були досконалі) із запропонованим варіантом зубчастого варіатора слід також враховувати один дуже важливий момент: *абсолютно всі варіатори тертя не стійкі до різкої зміни навантаження.*

Це означає, що навіть якщо варіатор тертя розрахований на великий крутний момент шляхом впровадження найновітніших технологій, він усе одно в силу своєї природи та принципу передачі енергії не буде стійким до ривків, крутильних коливань тощо – а вони завжди мають місце у важкій енергоємній техніці.

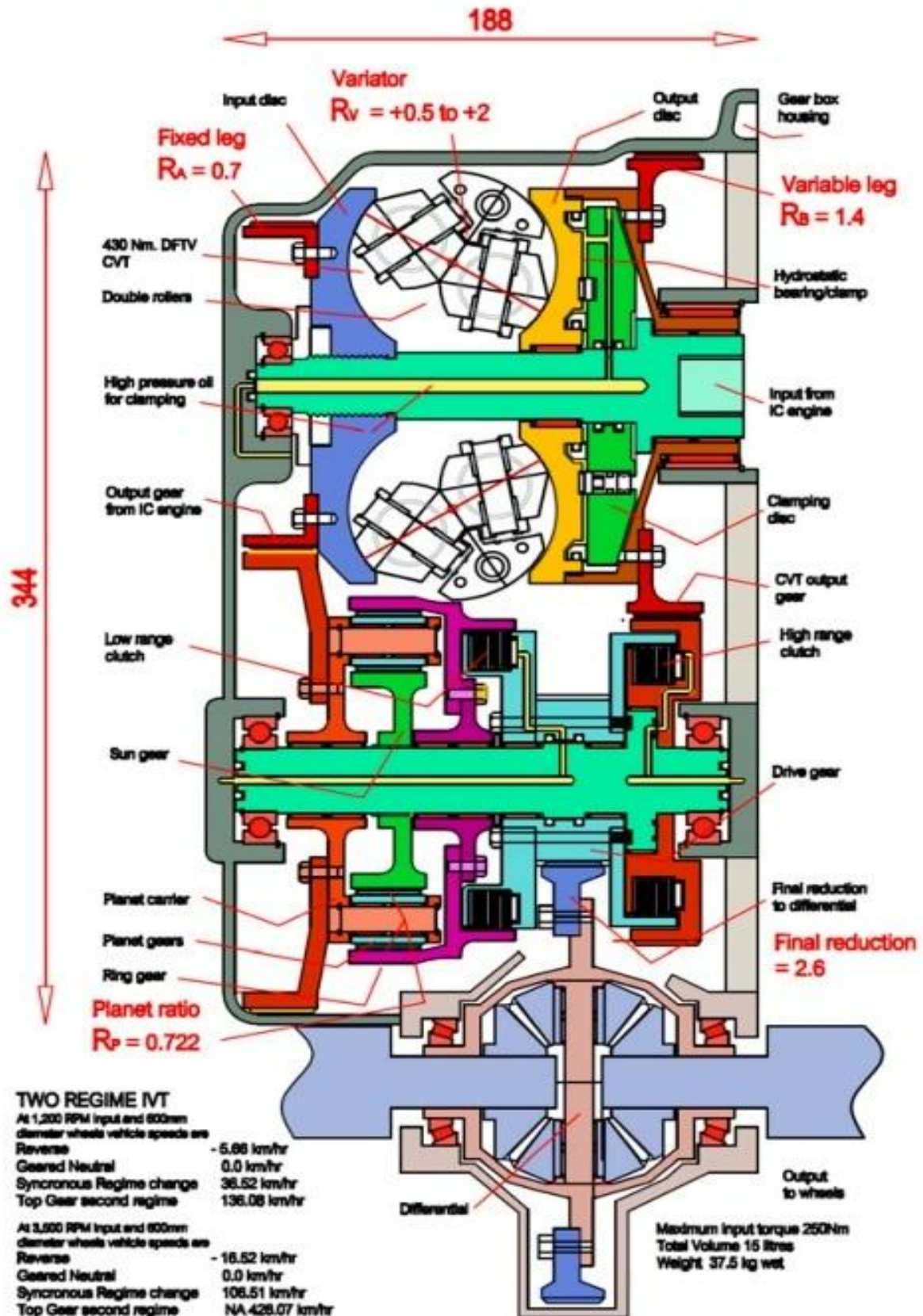


Рис. 10. Трансмісія Double Roller Full Toroidal Variator based IVT (DFTV-IVT)

А тому в такій техніці поки що використовують агрегати, які зазвичай є конструктивними поєднаннями автоматичної багатоступеневої трансмісії з одним із видів гідроприводу (гідродинамічний або гідростатичний). Для

візуального порівняння наведена схема варіаторної трансмісії сучасної тракторної техніки із гідростатичним модулем (рис. 11).

Перспективи застосування запропонованої схеми трансмісії із зубчастим варіатором.

В енергетичній галузі

З'єднуючи дизельний двигун з генератором через зубчастий варіатор, можна досягти кращої паливної економічності завдяки роботі двигуна на найбільш оптимальних обертах за умови сталого значення обертів генератора та відповідно до навантаження.

В архітектурі побудови мостів електричної мобільності

На відміну від легкового електротранспорту, великоваговий та енергоємний електротранспорт потребує трансмісії зі змінним передаточним числом.

Застосування трансмісії із зубчастим варіатором значно розширить експлуатаційні показники таких застосувань.

Сучасні електричні рішення в царині тракторної техніки

Трансмісія електричного трактора New Holland T4 має у своєму складі механічну 12-швидкісну коробку зміни передач із електричним керуванням.

Заміна такої трансмісії на трансмісію із зубчастим варіатором дасть змогу суттєво покращити експлуатаційні показники трактора.

У гібридних силових установках

Гібридні силові установки знайшли широке розповсюдження здебільшого в конструюванні автобусів як компромісне рішення для забезпечення балансу між жорсткими екологічними нормами та експлуатаційними показниками.

Застосування варіаторної трансмісії в таких приводах дасть змогу спростити конструкцію та покращити експлуатаційні показники.



Рис. 11. Варіаторна трансмісія для тракторів фірми ZF із гідростатичним варіатором

Висновки

У результаті виконаної роботи ми отримали варіант моделі конструкції трансмісії із торовим зубчастим варіатором, який має можливість змінювати передаточне число в діапазоні від 1:2 до 2:1, що вже є достатнім для використання його у складі трансмісій енергоємних машин. При цьому він має досить компактні розміри (**рис. 12**).

Оскільки кінцевою метою даної роботи є обґрунтування конструкції деякого «перехідного» типу трансмісії, яка б могла бути використана у тих випадках, коли застосування трансмісії з варіатором тертя було б неможливим через обмеження крутного моменту, будемо вважати поставлену мету досягнутою. Для досягнення цієї мети було виконано такі дії:

- заміна принципу передачі енергії у варіаторі шляхом впровадження нового типу варіаторного зубчатого зачеплення;
- перевірка кінематичної концепції варіаторного зубчатого зачеплення шляхом побудови діючої моделі;
- виконання попереднього статичного розрахунку варіаторного зубчатого зачеплення засобами CAD Solid Works Simulation;
- пошук найбільш оптимальної схеми для зубчастого варіатора;
- перевірка можливості розміщення зубців на поверхні тороїдного колеса по спіральній кривій із сталим кроком, який визначає модуль передач;
- розробка загальної конструктивної схеми трансмісії з торовим зубчастим варіатором;
- детальне опрацювання схеми конструкції, окремих вузлів та деталей.

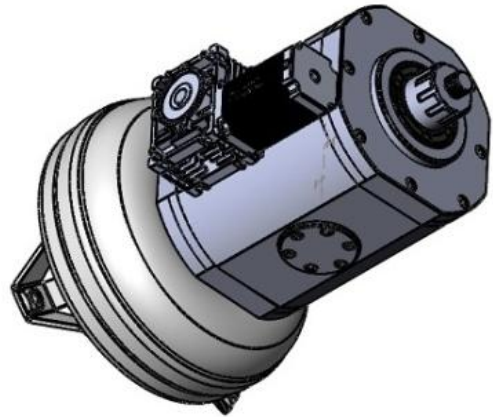
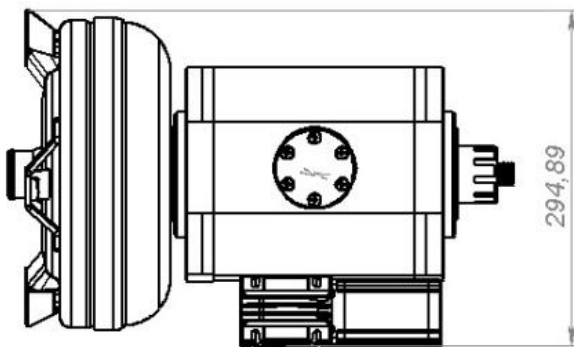
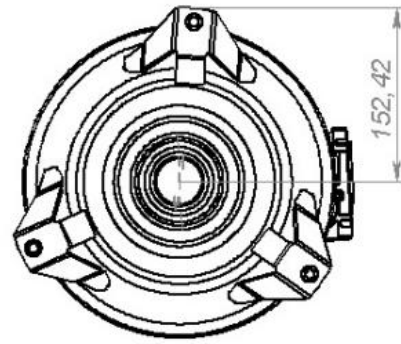
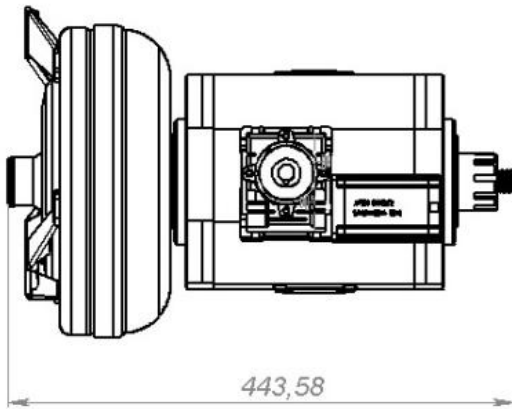


Рис. 12. Габаритні розміри трансмісії із торовим зубчатим варіатором

References

1. Shakhnazarov K. A. (1980). Author's certificate 771385. Planetary gear variator. Shakhnazarov K. A. №2399913/25-28; filed on 08/16/1976; published on 10/15/80. Bulletin, 38.
2. Labkovsky B. A. (1983). Author's certificate 1048201 A. Toothed variator. Labkovsky B. A. Izhevsk Agricultural Institute. №2745030/25-28; statement 04.09.79; published 15.10.83. Bulletin, 38.

3. Kuklin A. N. (1992). Author's certificate 1746099 A1. Gear speed variator. Kuklin A. N. № 4655550/28; statement 27.02.89; published 07.07.92. Bulletin, 25.

4. Belostotsky Yu. G. (1974). Author's certificate 426090. Gear variator. Belostotsky Yu. G. № 1747856/25-28; filed 01/25/72; published 04/30/74. Bulletin, 16.

5. Gashaw, Anteneh. (2023). DFD Equipment from Anteneh. Electronic resource.

Retrieved from
<https://hackaday.io/project/191683-antenehs-dfd-gear>

© А. А. Кашканов, докт. техн. наук,
професор, професор кафедри,
ORCID: 0000-0003-3294-6135,
e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua;
© В. В. Буряк, аспірант кафедри,
ORCID: 0009-0009-6030-4173,
e-mail: btr.vl@i.ua
(Вінницький національний технічний
університет)

© Andriy Kashkanov, Doctor of Technical Science,
Professor, Professor of the Department,
ORCID: 0000-0003-3294-6135,
e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua;
© Valerii Buriak, Postgraduate,
ORCID: 0009-0009-6030-4173,
e-mail: btr.vl@i.ua
(Vinnytsia National Technical University)

УПРАВЛІННЯ ЕФЕКТИВНІСТЮ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ НА ОСНОВІ КРИТЕРІАЛЬНОГО ПІДХОДУ

MANAGEMENT OF GRAIN TRANSPORTATION EFFICIENCY BY ROAD TRANSPORT BASED ON THE CRITERION APPROACH

Анотація. Ефективність збирання врожаю значною мірою залежить від якості транспортного обслуговування, яке відрізняється великим обсягом перевезень за короткий проміжок часу. Висока сезонність, обмежені терміни збирання та незадовільний технічний стан автотранспортних засобів створюють значні труднощі в транспортуванні зерна від комбайна до зернохосвища. Для забезпечення ефективного управління транспортними процесами під час перевезення зерна необхідно використовувати наукові підходи до оптимізації транспортних потоків і визначення резервів для зменшення витрат у системі «поле–транспорт–зернохосвище», враховуючи динаміку процесів і вихідні дані. Саме такий підхід до управління ефективністю перевезення зернових культур автомобільним транспортом розглянуто в цій роботі. В ході дослідження проведено короткий огляд сучасних аспектів проблематики перевезення зернових в Україні, технологічні, технічні та організаційні особливості забезпечення ефективності процесів їхнього виробництва. З метою удосконалення виробничих процесів запропоновано використовувати двоетапну схему перевезення зерна з поля до споживача, яка дозволяє знизити негативну антропогенну дію автотранспорту та підвищити його якість і збереженість. Розглянуто та оцінено складові витрат часу в роботі зернозбиральних комплексів. На основі критеріального підходу запропоновано варіант підвищення ефективності транспортування зернових культур автомобільним транспортом, який дозволяє отримати об'єми збирання, перевезення з кожного поля на пункти зберігання, маршрути перевезень із мінімальними витратами з урахуванням втрат зерна за кожним варіантом збирання та вийти на загальний позитивний результат оптимізації, що буде предметом подальших досліджень.

Ключові слова: автомобільний транспорт, логістика, критеріальний підхід, ефективність перевезень, виробництво та збут зернових культур.

Abstract. The efficiency of harvesting largely depends on the quality of transportation services, which is characterized by a large volume of transportation in a short period of time. The high seasonality, limited harvesting time and poor technical condition of vehicles create significant difficulties in transporting grain from the combine to the granary. To ensure effective management of transport processes during grain transportation, it is necessary to use scientific approaches to optimize traffic flows and identify reserves to reduce costs in the field-transport-granary system, taking into account the dynamics of processes and initial data. It is this approach to managing the efficiency of grain transportation by road that was considered in this paper. The study provides a brief overview of the current aspects of grain transportation in Ukraine, technological, technical and organizational features of ensuring the efficiency of grain production processes. In order to improve production processes, it is proposed to use a two-stage scheme of grain transportation from the field to the consumer, which allows reducing the negative anthropogenic impact of motor vehicles and improving its quality and safety. The components of time costs in the operation of grain harvesting complexes are considered and evaluated. Based on the criterion approach, a solution to the problem of increasing the efficiency of grain transportation by road is proposed, which allows obtaining the volume of harvesting, transportation from each field to storage points, transportation routes with minimal costs, taking into account grain losses for each harvesting option, and reaching an overall positive optimization result, which will be the subject of further research.

Keywords: road transport, logistics, criterion approach, transportation efficiency, production and marketing of grain crops.

Вступ

Україна є одним із основних світових виробників зернових культур. За даними

Всеукраїнської аграрної ради [1], аграрна частка внутрішнього валового продукту (ВВП) України за підсумками 2023 року становить 17

%. Одним із найважливіших етапів виробництва та збуту зернових культур є процес перевезення. Значні обсяги виробництва зерна потребують забезпечення ефективності його транспортування до споживачів.

На сьогодні основними аспектами проблематики перевезення зернових в Україні є такі [2, 3, 4]:

- ускладнення умов ведення аграрного бізнесу;
- скорочення експорту внаслідок зменшення площ засіву;
- підвищення частки експорту зерна в Європу шляхом використання комбінованих вантажоперевезень залізничним та автомобільним транспортом (АТ);
- зростання перевезень зернових культур АТ на території України.

Наявність цих аспектів спонукає аграріїв, трейдерів і транспортні компанії адаптуватися до нових умов шляхом пошуку інноваційних підходів для забезпечення стійкості аграрного виробництва та підвищення ефективності перевізних процесів. Для забезпечення ефективності управління процесами транспортування зерна слід на основі наукового підходу оптимізувати транспортні потоки шляхом встановлення резервів скорочення витрат у системі «поле-автомобіль-зерносховище».

Упродовж останніх років дослідники з різних країн світу вивчали аспекти вирішення цієї проблеми. Зокрема в роботі [5] автори проводили оптимізацію модельного ряду хопердозаторів з метою покращення процесів транспортування зерна і зернових культур на основі комплексу технічних та економічних показників. У роботі [6] досліджувалися питання оптимізації ланцюга поставок зерна в контейнерах шляхом мінімізації загальних витрат. Автори прийшли до висновку, що збільшення пропускної спроможності інтермодальних майданчиків, розміру парку вантажівок і парку вагонів знижує загальну вартість ланцюга постачання. Якщо перші два фактори позитивно впливають на стійкість ланцюга поставок, останній збільшує ризик збоїв у ланцюгу поставок. Науковці зі США присвятили своє дослідження [7] удосконаленню процесів транспортування зерна з поля до елеватора. Розроблена ними імітаційна модель дискретних подій дозволяє оцінити вплив обмежень перевізних

спроможностей на ефективність збирання урожаю, використання ресурсів і пропускну здатність системи. В роботі [8] була розглянута проблема аналітичності комплексних критеріїв, які використовуються для оцінювання виробництва зерна сільськогосподарськими підприємствами. Зокрема автором запропоновані алгоритми ітераційної оптимізації структури парку комбайнів на основі техніко-економічних показників їх роботи. Дослідження колективу науковців [9] присвячені проблемам формування структури збирально-транспортних комплексів. Оптимальний парк збиральних машин і транспортних засобів автори пропонують визначати за допомогою комплексної номограми умов їх взаємодії. Як інтегральний критерій для формування структури комплексу та визначення мінімальної вартості транспортування однієї тонни зерна використано технічні особливості сільськогосподарського підприємства, технологічні параметри збиральної техніки та техніко-економічні показники роботи збиральних машин.

Відштовхуючись від особливостей розглянутих робіт та зважаючи на поточні проблеми аграрної галузі, виникає необхідність у підвищенні ефективності роботи зернозбиральних комплексів, удосконаленні організації, планування та управління процесами перевезення зернових культур автомобільним транспортом. Обумовлено це тим, що сьогодні будь-яка система, яка регулює процеси в середині зернозбирального комплексу, швидко вичерпує свій оптимізаційний ресурс. Натомість, якщо поєднати між собою декілька підходів до вирішення наявних проблем, можна отримати більшу гнучкість та ефективність у вирішенні технічних, технологічних та економічних питань.

Основна частина

У сільському господарстві вирощування зернових є одним з основних, складних та трудомістких виробництв. Для його спрощення, скорочення фізичного навантаження працівників використовують засоби механізації виробництва, особливо під час збиральної кампанії [7, 9]. Процес збирання врожаю повинен проходити своєчасно і в необхідні терміни. Це дозволить зібрати урожай із мінімальними втратами.

Застосування сучасних способів визначення обсягів перевезення, підвищення ефективності експлуатації автотранспортних засобів (АТЗ) сприяють вирішенню проблеми забезпечення збереження якісного стану та кількості зібраного урожаю. Процес обробки зерна після жнив повинен розглядатися як частина єдиного виробничого процесу збирання та транспортування зерна.

Забезпечення підвищення ефективності робіт потребує уточнення знань про техніко-експлуатаційні показники збиральних комбайнів, АТЗ, врожайність зернових культур, рельєф місцевості та розміри полів, їхню віддаленість тощо [10]. Це дозволить підвищити якість збирально-транспортного комплексу та вдосконалити процес післяжнивної обробки зерна з урахуванням технологічних, технічних та організаційних особливостей виробництва зерна (рис. 1).

Реалізація особливостей виробництва зерна потребує розробки певних науково-методичних положень та рекомендацій, пропозицій щодо підвищення технологічної та технічної ефективності збиральної кампанії: технології збирання, транспортування зерна, скорочення

втрат та мінімізації собівартості робіт. При цьому, актуальними практичними завданнями є визначення оптимального складу збирально-транспортних ланок, маршрутів руху АТЗ, місць розташування пунктів прийому зерна тощо.

За універсальний критерій оптимальності можна прийняти мінімум витрат на збирання та транспортування зерна [11, 12]

$$V_O = V_Z + V_T + V_{VK} + V_{NZ} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де V_Z – витрати на збирання зерна;

V_T – витрати на транспортування зерна;

V_{VK} – витрати внаслідок втрати зерна за комбайном;

V_{NZ} – витрати внаслідок втрати зерна через несвоєчасне збирання.

Альтернативним підходом може стати використання як критерія оптимальності мінімуму приведених витрат [9], які враховують вплив функції зовнішніх чинників F_{ZN} , технічних показників зернозбиральних комбайнів P_K та АТЗ P_A

$$V_P = f(F_{ZN}, P_K, P_A) \rightarrow \min. \quad (2)$$

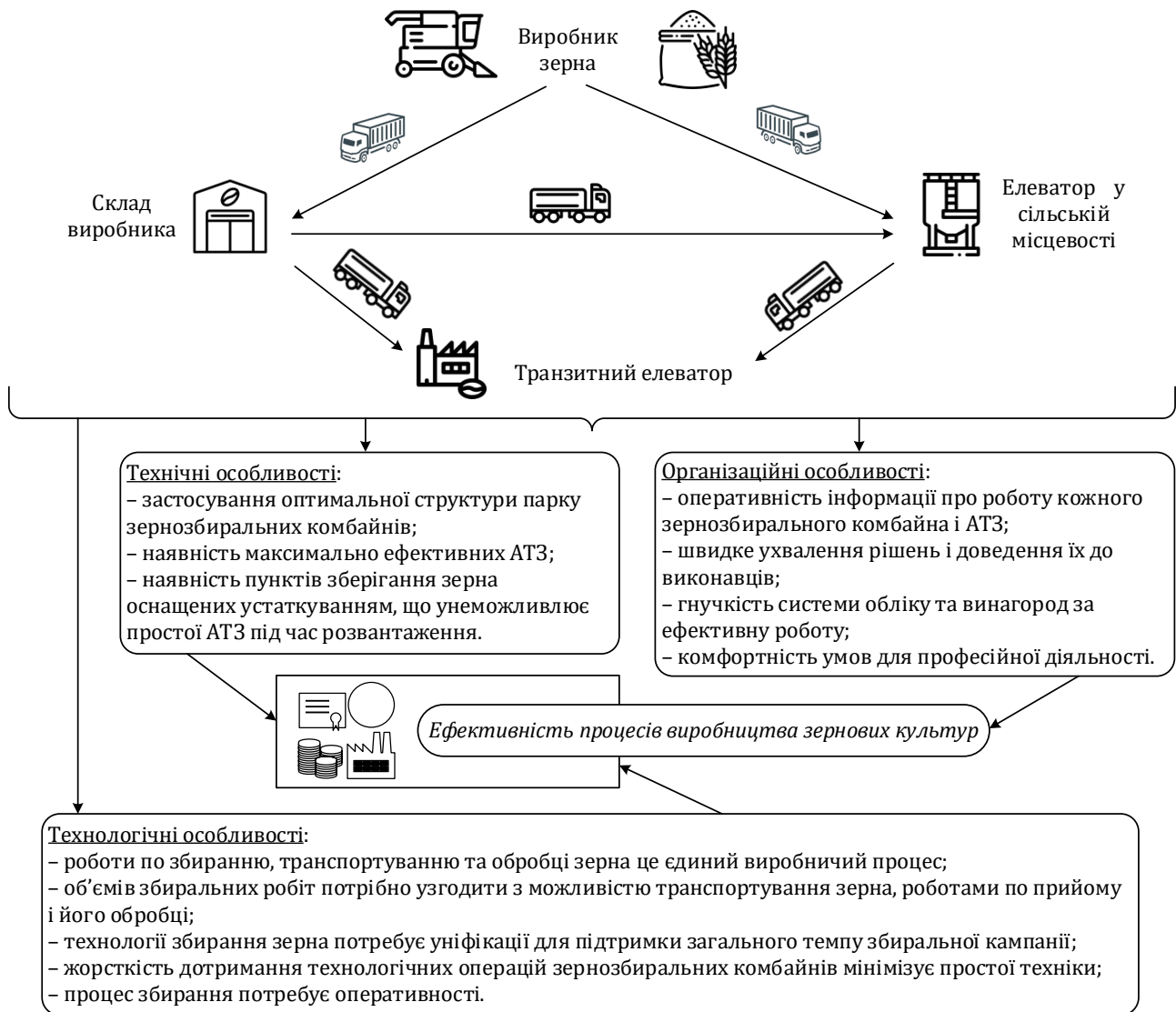


Рис. 1. Особливості забезпечення ефективності процесів виробництва зернових культур

Витрати на транспортування зерна великі і можуть доходити до 30–50 % від собівартості зернової продукції [4]. Транспортування зерна з поля до місць зберігання (склад, елеватор) можна реалізувати кількома способами організації роботи АТЗ та зернозбиральних комбайнів [6–9] (рис. 2).

АТЗ під час прямих перевезень зерна разом із транспортуванням виконують складальну операцію. Такий спосіб не вимагає застосування спеціалізованих АТЗ, з автомобілями можуть використовуватися і трактори з причепами. Основний недолік – потреба в

жорсткій узгодженості роботи АТЗ та комбайнів у часі для забезпечення високої ефективності процесів. Прямі перевезення АТЗ з прокладенням розвантажувальних магістралей мінімізують пробіги АТЗ по полю. Основний недолік – необхідність використання комбайнів з уніфікованою місткістю бункерів.

Застосування проміжних компенсаційних ланок дозволяє суттєво скоротити тривалість складальних операцій порівняно з прямими перевезеннями АТЗ. Водночас значно утрудненим є контроль виконання робіт окремими зернозбиральними комбайнами.



Рис. 2. Основні способи організації роботи АТЗ і зернозбиральних комбайнів

Перевезення зерна із застосуванням «мультиліфтів» потребує оновлення всього парку АТЗ аграрних підприємств, що в нинішній економічній ситуації є нездійсненним.

Застосування контейнерних перевезень потребує наявності накопичувача-перевантажувача, контейнерів, контейнеровозів. У разі необхідності їхнього придбання це обов'язково позначається на собівартості перевезень.

Складність конструкції цих засобів також може негативно позначитися на їхній надійності та успішності усієї збиральної кампанії.

Отже, існує потреба в удосконаленні процесів перевезення зерна.

Для вирішення цього завдання пропонується використовувати двоетапну схему перевезення з поля до споживача (**рис. 3**).



Рис. 3. Схема використання тимчасових пунктів зберігання для доставки зерна до споживача

Як видно з **рис. 3**, на першому етапі зерно перевозять АТЗ невеликої вантажопідйомності з поля на тимчасовий пункт зберігання (відкритий або закритий майданчик, тік, склад) в безпосередній близькості від поля. В подальшому (на другому етапі) тимчасовий пункт зберігання виступає як постачальник. З нього АТЗ великої вантажопідйомності перевозять зерно на зерносховище, елеватор чи завод із переробки зерна, які обладнані сучасними високопродуктивними пристроями для обробки і сушки зернових культур. Ця схема транспортування зерна дає змогу знизити негативну антропогенну дію автотранспорту та підвищити його якість і збережність.

Значний резерв підвищення продуктивності транспортно-технологічних перевезень зернових культур полягає у зменшенні непродуктивних витрат часу, зокрема тих, що виникають під час очікування на вивантаження зерна та завантаження автотранспорту.

У процесі обґрунтування оптимального парку АТЗ необхідно враховувати, що кількість транспорту повинна відповідати продуктивності зернозбиральних комбайнів, оскільки їхня продуктивність має дорівнювати загальній продуктивності транспорту, який їх обслуговує.

$$N_A \cdot Q_A = Q_K \cdot N_K, \quad (3)$$

де N_A – кількість АТЗ;
 Q_A – продуктивність АТЗ, т/год;
 Q_K – продуктивність зернозбирального комбайна, т/год;
 N_K – кількість зернозбиральних комбайнів.
 Загальну тривалість виконання будь-якого технологічного процесу можна подати у вигляді залежності

$$T_{\Sigma} = T_P + T_{OV} + T_{NV} + T_{IV}, \quad (4)$$

де T_P – чистий час виконання процесу, год;
 T_{OV} – обов'язкові (необхідні) втрати часу, пов'язані з особливостями реалізації технологічного процесу, год;
 T_{NV} – час непродуктивних втрат, пов'язаний із відновленням або підтриманням працездатності учасників технологічного процесу, год;

T_{IV} – інші втрати часу, пов'язані з організацією робіт, природно-кліматичними умовами та іншими непередбаченими причинами, год.

Залежність (4) відображає взаємозв'язок чистого часу роботи зернозбирального комплексу, часу, необхідного для забезпечення технологічного циклу, втрати часу через незадовільний технічний стан засобів збору зерна та/або транспортування, а також якості організації робіт. Вона дозволяє оцінити і показати переваги роботи триланкової системи збирання зернових культур (рис. 3).

У цьому випадку найкращий варіант, коли немає втрат часу, можна подати у вигляді

$$T_{\Sigma} = T_P, \quad T_V = T_{OV} + T_{NV} + T_{IV} = 0, \quad (5)$$

де T_V – загальні втрати часу, год.

На практиці завжди $T_V > 0$, тому умову (5) можна досягти лише теоретично. Аналіз витрат часу виробників зернових культур показує, що 43,5 % – це чистий час роботи. Основні втрати часу (28 %) можна віднести до виконання транспортних робіт та очікування вивантаження, усунення технічних та технологічних відмов становить 19,5 % часу, і лише 9 % часу займає сам процес збирання.

На основі критерію оптимальності – мінімуму витрат від збирання, перевезення і втрат зерна від несвоєчасного збирання, враховуючи виробничі можливості, пропускну спроможність пунктів зберігання, вибір

оптимального варіанту об'ємів збирання і розподілу транспортних потоків можна подати як завдання мінімізації витрат

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} \left((V_{ij} \cdot I_{ij} + \sum_{e=1}^d Q_{eij} \cdot \delta_{ei} \cdot C_e) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{p=1}^P t_{ikp} x_{ikp} \right) \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} a_{ikj} \cdot I_{ij} - \sum_{p=1}^P x_{ikp} \geq 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m; \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} I_{ij} \leq 1, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, J_i; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ikp} \geq b_{ip}, \quad p = 1, \dots, P; \quad k = 1, \dots, m; \quad (9)$$

$$x_{ikp} \geq 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad p = 1, \dots, P; \quad (10)$$

де $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} V_{ij} \cdot I_{ij}$ – витрати на збирання зерна за j -м варіантом на i -му полі;

$\sum_{e=1}^d Q_{eij} \cdot \delta_{ei} \cdot C_e$ – витрати внаслідок незібрання зерна на i -му полі за j -м варіантом збирання;

$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{p=1}^P t_{ikp} x_{ikp}$ – витрати на перевезення зернової культури k -го виду з i -го поля на p -й пункт;

d – число днів після оптимального терміну збирання урожаю;

a_{ikj} – обсяг виробництва зернової культури k -го виду за j -м варіантом на i -му полі;

b_{ip} – сумарна потреба в зерновій культурі k -го виду на p -му пункті споживання.

Пара $\langle I, x \rangle$ – це виробничо-транспортний план, якщо I відповідає умовам (6)–(10). I є виробничою складовою, а x – транспортною. Виробничо-транспортний план є допустимим у разі відповідності умовам (7)–(10), а оптимальним при мінімізації функціоналу (6).

Висновки

Ведення бойових дій на території України стало причиною кардинальних змін у діяльності аграрного сектору. Логістичні витрати в Україні на сьогодні складають 30–50 % у собівартості продукції. Це свідчить про значний потенціал щодо скорочення витрат підприємств. Запропонований варіант вирішення задачі підвищення ефективності транспортування зернових культур автомобільним

транспортom дозволяє отримати об'єми збирання, перевезення з кожного поля на тимчасові пункти зберігання, маршрути перевезень з мінімальними витратами з урахуванням втрат зерна за кожним варіантом збирання та вийти на загальний позитивний результат оптимізації, що буде предметом подальших досліджень.

References

1. Dykun A. (2023). Medium-sized businesses produce 65 % of agricultural gross domestic product and need the most support. [Online]. Retrieved from <https://uacouncil.org/uk/post/serednij-biznes-viroblae-65-agrarnogo-vvp-ta-potrebuie-najbilsoi-pidtrimki-andrij-dikun>.
2. UkraineInvest. (2024). Investment opportunities in the agro-processing sector. [Online]. Retrieved from <https://ukraineinvest.gov.ua/wp-content/uploads/2024/09/sekto-agropererobky-ukrayiny-1.pdf>.
3. Naumov, M., & Rybak, H. (2023). The main problems of the export of cereals under the conditions of the state of martial. *Economy and society*, 52, 1-6. Retrieved from <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-52-80>.
4. Kashkanov, A., & Buriak, V. (2024). Problem Issues of Organizational and Technical Development of Grain Transportation by Road Transport in Ukraine. *Advances in mechanical engineering and transport*, 1, 22, 163-169. Retrieved from <https://doi.org/10.36910/auto-mash.v1i22.1357>.
5. Khomenko L., Tkachenko S., & Vodolazska O. (2023). Increasing the profitability of the agricultural market by optimizing grain transportation. *Economics and Region*, 2, 89, 88-95. Retrieved from [https://doi.org/10.26906/eip.v0i2\(89\).2940](https://doi.org/10.26906/eip.v0i2(89).2940).
6. Li, J., Jing, K., Khimich, M., & Shen, L. (2023). Optimization of Green Containerized Grain Supply Chain Transportation Problem in Ukraine Considering Disruption Scenarios. *Sustainability*, 15, 9, 7620. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/su15097620>.
7. Aaron P. Turner, Michael P. Sama, L. Samuel G. McNeill, Joseph S. Dvorak, Tyler Mark, & Michael D. Montross (2019). A discrete event simulation model for analysis of farm scale grain transportation systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167, 105040. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105040>.
8. Rogovskii, I. (2021). Analyticity of complex criteria for evaluation of grain production in agricultural enterprises intensification of engineering management. *Machinery & Energetics*, 12, 4, 129-138. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.04.129>.
9. Muzylyov, D., Shramenko, N., Karnaukh, M., Berezchnaja, N., Kravcov, A., & Kutya, O. (2019). The problems of transport and logistics providing at the agricultural branch. Monograph. Kharkiv: Miskdruk.
10. Lubko, D., & Zinovieva, O. (2023). Design of a simulation model of grain harvesting and transportation complex. *Scientific Bulletin of Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*, 13, 1, 492-501. Retrieved from <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-42>.
11. Kashkanov V. A., Kashkanov A. A., & Var-chuk V. V. (2017). Organization of road transportation. Textbook. Vinnytsia: VNTU.
12. Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2014). The Handbook of Logistics and Distribution Management. Understanding the Supply Chain. 5th edition. Philadelphia: Kogan Page.

© В. Ю. Чернега, аспірант,
ORCID: 0009-0004-4938-4348,
e-mail: vitalij019283@gmail.com
(Вінницький національний технічний університет)

© Vitaliy Chernega, Postgraduate,
ORCID: 0009-0004-4938-4348,
e-mail: vitalij019283@gmail.com
(Vinnytsia National Technical University)

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОРТУВАННЯ ВАНТАЖІВ У ЛОГІСТИЧНОМУ ЦЕНТРІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

INCREASING THE EFFICIENCY OF CARGO SORTING IN THE LOGISTICS CENTER USING AUTOMATION MEANS

Анотація. У сучасних умовах стрімкого розвитку глобальної торгівлі, електронної комерції та зростання обсягів вантажоперевезень особливого значення набуває забезпечення ефективної роботи логістичних центрів, які відіграють ключову роль у системі товароруку. Розвиток ефективної системи управління автомобільними вантажними перевезеннями є важливим фактором забезпечення стабільності економічних процесів, особливо в умовах сільської місцевості, де транспортна інфраструктура є недостатньо розвинутою.

Актуальність теми обумовлена стрімким зростанням обсягів вантажопотоків, розвитком електронної комерції, підвищенням вимог до швидкості та точності обробки замовлень, а також необхідністю оптимізації логістичних операцій для забезпечення конкурентоспроможності підприємств на ринку транспортно-логістичних послуг. У статті розглянуто основні проблеми організації перевезень, серед яких обмеженість транспортної інфраструктури, сезонні коливання попиту на перевезення, недостатній рівень впровадження сучасних інформаційних технологій та проблеми оптимізації маршрутів.

У роботі розглянуто актуальні проблеми управління автомобільними вантажними перевезеннями, які виникають через недостатню якість дорожньої інфраструктури, нерівномірний розподіл транспортних потоків, зростання витрат на паливо та технічного обслуговування транспорту. Окремлено основні виклики, пов'язані з оптимізацією логістичних процесів, ефективним використанням транспортної інфраструктури та впровадженням інноваційних технологій у сферу вантажоперевезень. Основними факторами, що ускладнюють пасажирські перевезення, є: застаріла інфраструктура та зношеність рухомого складу, низький рівень сервісу та комфорту для пасажирів, недостатній рівень цифровізації, екологічні проблеми, недосконала законодавча база та відсутність ефективного державного регулювання тощо.

Ключові слова: автомобільні перевезення, вантажний транспорт, логістичні системи, оптимізація маршрутів, цифрові технології.

Abstract. In today's conditions of rapid development of global trade, e-commerce and growth in freight volumes, ensuring the effective operation of logistics centers, which play a key role in the system of goods movement, is of particular importance. The development of an effective road freight transportation management system is an important factor in ensuring the stability of economic processes, especially in rural areas where the transport infrastructure is underdeveloped.

The relevance of the topic is due to the rapid growth in freight flows, the development of e-commerce, increasing requirements for the speed and accuracy of order processing, as well as the need to optimize logistics operations to ensure the competitiveness of enterprises in the transport and logistics services market. The article considers the main problems of organizing transportation, including the limited transport infrastructure, seasonal fluctuations in demand for transportation, insufficient level of implementation of modern information technologies and problems of route optimization.

The paper examines the current problems of road freight transportation management, which arise due to the insufficient quality of road infrastructure, uneven distribution of transport flows, increasing costs for fuel and maintenance of transport. The main challenges associated with the optimization of logistics processes, effective use of transport infrastructure and the introduction of innovative technologies in the field of freight transportation are outlined. The main factors complicating passenger transportation are: outdated infrastructure and wear and tear of rolling stock, low level of service and comfort for passengers, insufficient level of digitalization, environmental problems, imperfect legislative framework and lack of effective state regulation, etc.

Keywords: road transportation, freight transport, logistics systems, route optimization, digital technologies.

Вступ

Транспортно-логістична система – це складна багаторівнева структура, яка об'єднує сукупність взаємопов'язаних і взаємодіючих елементів, серед яких транспортна інфраструктура, рухомий склад, логістичні центри, склади, інформаційно-комунікаційні технології, системи управління та нормативно-правове забезпечення. Її основним призначенням є організація, координація та ефективне

ктура, рухомий склад, логістичні центри, склади, інформаційно-комунікаційні технології, системи управління та нормативно-правове забезпечення. Її основним призначенням є організація, координація та ефективне

управління всіма процесами, пов'язаними з перевезенням вантажів і пасажирів, їхнім зберіганням, обробкою, оформленням супровідної документації, а також інформаційним та аналітичним супроводом логістичних операцій.

Метою дослідження є аналіз сучасного стану управління автомобільними вантажними перевезеннями, виявлення основних проблем та розробка ефективних заходів щодо вдосконалення логістичних процесів, оптимізації маршрутів, зниження витрат.

Основна частина

Логістичні системи спираються на принципи будівництва багаторівневих систем, які

забезпечують можливість управління матеріальними потоками на різних рівнях операційного управління з виходом на загальні критерії ефективності логістичних систем. Разом із тим у логістичних системах велика увага приділяється питанням інформаційного забезпечення керуючих систем. Адже лише завдяки інформаційному забезпеченню існує можливість координувати процеси управління в єдиному інформаційному просторі за наявності великої кількості суб'єктів. Функціональну структуру транспортної системи зображено на **рис. 1**.

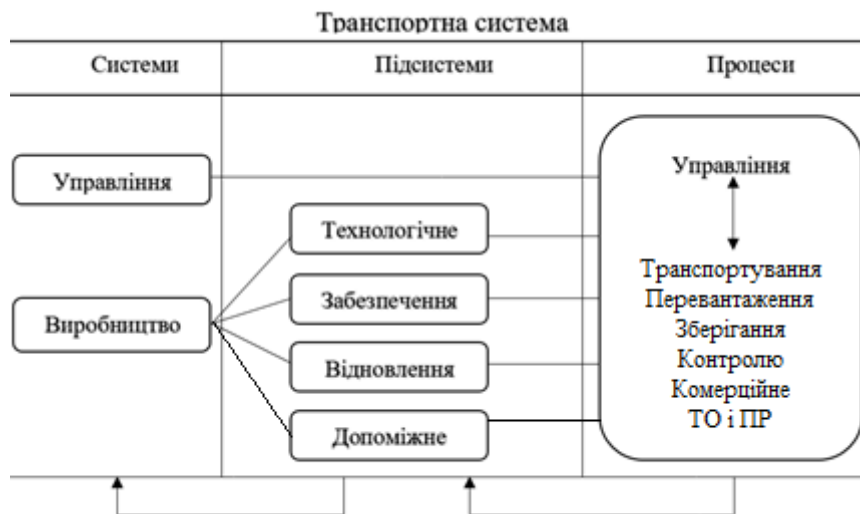


Рис. 1. Функціональна структура транспортної системи

На першому рівні перебувають виробнича та управлінська системи. Сукупність елементів та зв'язків, які утворюють транспортну систему, – не постійна величина, ця сукупність залежить від об'єкта управління та інших факторів. Найчастіше склад системи можна визначити з точки зору позиції «спостерігача». Це узагальнювальна назва дослідника, проєктувальника, конструктора, особи, яка приймає рішення, та інших аналогічних суб'єктів, котрі займаються вивченням, створенням системи або її управлінням. Так, наприклад, для експедитора як об'єкт управління виступає безпосередньо сам процес доставки вантажу, а значить, відповідно до цього в транспортну систему входять вантажовласник, перевізник, графік доставки і т. д. З позицій перевізника, який уклав з експедитором договір на здійснення перевезення, до транспортної системи

входять водій, транспортний засіб, технічне обладнання, необхідне для безпечного та своєчасного перевезення вантажу, а також інші елементи, що забезпечують виконання зобов'язань за договором. Допоміжна підсистема покликана забезпечити здійснення функцій, пов'язаних із спільною роботою системи (кадрова робота, облікові функції тощо).

Загалом сучасні підсистеми покликані забезпечувати здійснення процесів, щоб система змогла досягти поставленої мети. Підтримка керованості системи здійснюється завдяки зворотньому зв'язку. Якщо розглядати процес перевезення вантажу, він охоплює низку окремих процесів, які йдуть один за одним ланцюжком [2]. Процес перевезення складається з низки технологічних операцій, які є неоднорідними та мають відмінності за тривалістю. Окремі операції, поєднавшись, утворили певні

етапи процесу перевезення, в яких кожен етап покликаний здійснювати конкретні завдання. Процес перевезення вантажу є багатоетапним і багатоопераційним, передбачає технологічні, експлуатаційні та економічні різновиди

операцій. Деякі етапи процесу перевезення вантажу нерідко можуть бути представлені як самостійні процеси. Нижче на рис. 2 можна побачити технологічні схеми процесу перевезення вантажів [3].

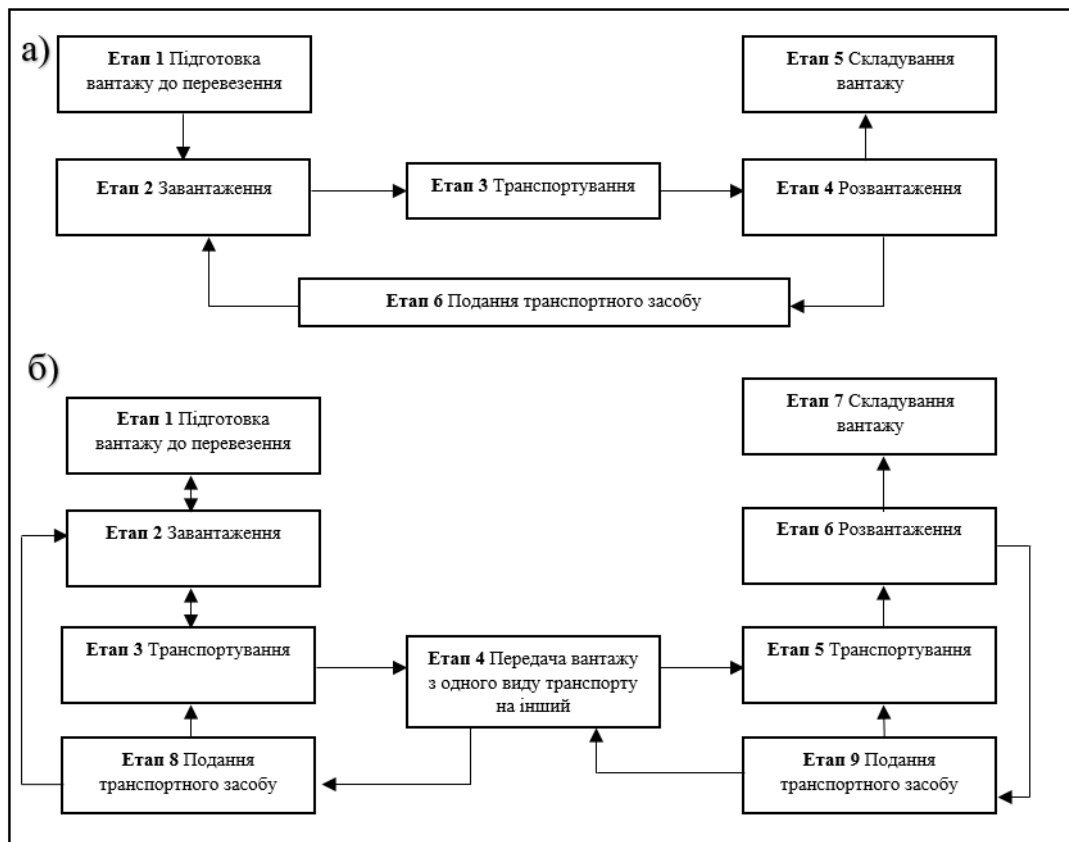


Рис. 2. Технологічні схеми процесу перевезення вантажів

Цьому процесу властивий циклічний характер. Це означає, що транспортування вантажу здійснюється повторюваними виробничими перевізними циклами, які йдуть один за одним, окрім випадків, коли використовується трубопровідний транспорт, діяльність якого відбувається постійно. Ритм цих циклів встановлюється їхньою частотою, що залежить від середнього періоду тривалості одного циклу [4], можуть коливатися в часі. Проте вони завжди мають початок і кінець. Усі цикли перевезення вантажу, що повторюються, охоплюють велику кількість окремих етапів, взаємозалежних і рівно спрямованих. Сукупність окремих циклів, що формують цикл перевезення, становить перевізний процес. У всіх процесах перевезення є свої етапи, які властиві лише вантажу, етапи, характерні лише для рухомого складу, та спільні етапи. Спільними етапами є такі: навантаження, перевезення та розвантаження. Різними етапами є подання рухомого складу для завантаження, підготовчі заходи до

відправлення, зберігання вантажу на місці його виготовлення та в проміжних місцях, складування тощо. Це все робить поняття процесу перевезення складнішим.

З погляду автотранспортних підприємств, де на першому плані – питання вдосконалення та використання рухомого складу, зменшення часу обороту рухомого складу, для здійснення процесу транспортування вантажу потрібно, крім перевезення вантажу, виконати ще і його навантаження, вивантаження та подати рухомий склад під навантаження, іншими словами, здійснити транспортний процес. Практичний досвід з організації перевезень показав, що не весь вантаж, розміщений на рухомому складі в пункті виробництва, буде доставлений до пункту його споживання. Причинами цього можуть бути втрати вантажу, його псування, а також його природний спад маси тощо. Тривалість розподілу перебування рухомого складу в місці завантаження визначається так:

1) вхідним потоком рухомого складу;

- 2) часом очікування рухомим складом навантаження (розвантаження);
- 3) часом маневрування;
- 4) тривалістю завантаження (розвантаження);
- 5) часом оформлення документації [5].

Тривалість такої складової, як «маневрування», залежить здебільшого від роботи вантажного пункту.

Від організації вантажних робіт залежить також і розподіл тривалості обслуговування та фактична тривалість обслуговування.

За результатами роботи, проведеної на прикладі організації, спостерігаються процеси, що вимагають коригування: рівень послуг сервісу, що надаються клієнтам, а також значення продуктивності процесу вантажопереробки на складі, що охоплює процеси приймання готової продукції, комплектації та відвантаження. Через те, що між названими факторами виявлено зв'язок, ці два параметри будуть об'єктами заходів щодо підвищення ефективності транспортно-логістичної діяльності організації. Необхідно провести заходи щодо скорочення тимчасових витрат у зоні відправлення, а також щодо переміщення продукції до зони комплектації та пошуку продукції на складі. Виходячи з цих даних, склад працює з переважаннями зон відправлення та комплектування, що призводить до помилок у виконанні замовлень, пошкодження тари під час завантаження, а також до затримок у комплектації замовлень та під час відвантаження зі складу.

Завдяки імітаційному моделюванню та вивченню методів раціональної організації транспортно-логістичного процесу (ТЛП) можлива пропозиція заходів щодо підвищення ефективності ТЛП на підприємстві. Одним із таких заходів пропонується автоматизація складу із застосуванням системи штрихкодів.

Ця технологія товару винайдена у США в 1970-ті рр. Уже тоді використовували схожу технологію сортування листів поштою та на військових заводах для обліку номерів виробів. У наш час штрихове кодування товарів у внутрішньому обліку стає дедалі популярнішим. Основною перевагою використання цієї технології є прискорення логістичних операцій під час приймання товару, його відвантаження, збирання замовлень та інвентаризації, а також зниження витрат за рахунок ліквідації випадків пересортування. Для організації ця технологія вкрай актуальна, оскільки

штрикування товарів застосовується в упаковці товарів, через необхідність маркування, але не в операціях приймання, збирання замовлень та відвантаження товарів на складі готової продукції. Це неминуче призводить до втрати часу у процесі виконання складських операцій.

Приймання продукції від «червоної зони» відбувається через спеціальні вікна подачі товару за допомогою конвеєра. Тобто на одному кінці конвеєра здійснюється упаковка товару, а на іншому комплектувальник на складі готової продукції укладає товар у транспортну одиницю для зберігання. Він виконує такі дії:

- переміщення порожньої транспортної одиниці до конвеєра;
- підготовка транспортної одиниці;
- тарування готової продукції;
- перерахунок базових одиниць готової продукції в тарі;
- формування прибуткової накладної;
- обпалювання (якщо потрібно);
- переміщення затареної транспортної одиниці для зберігання.

Автоматизація приймання готової продукції за допомогою технології штрих-кодування передбачає встановлення сканерів штрихкоду на конвеєрі приймання, за яким готова продукція рухається із зони упаковки. Коли продукція, що приймається, упаковується в більші одиниці, пропонується маркувати їх, використовуючи вже встановлений термопринтер для друку штрих-кодів на кожному гофрокоробі і звичайний принтер для друку палетних листів зі штрих-кодом, що вказує на кратність упаковки. Наприклад, усього на складі готової продукції встановлено три конвеєри, на двох з яких може одночасно вестися приймання в ящики на палеті, металеву тару або полімерні контейнери, а на одному – приймання в гофрокороб на палеті; тож на приймання потрібно три сканери штрихкодів. Впровадження цієї технології дозволить економити час на таких операціях, як перерахунок базових одиниць готової продукції в тарі, формування прибуткової накладної, приймання в ТСД, проте потребує одноразових капітальних вкладень, при цьому необхідний розрахунок ефективності. За наявною технологією відвантаження продукції організації часто, у зв'язку з великим обсягом замовлення, одне замовлення розподіляється на кілька машин, найчастіше дві чи три машини.

Через це виникають труднощі розподілу палет одного замовлення на різні машини, оскільки цей процес не повністю не комп'ютеризований. У процесі відвантаження старший зміни і виконує такі операції:

- 1) перерахунок продукції за кількістю одиниць, звіряння із замовленням;
- 2) заповнення маршрутного листа;
- 3) зведення маршрутних листів кількох машин;
- 4) виправлення помилок (за їхньої наявності);
- 5) формування накладних (по одній для кожної машини);
- 6) роздрукування документів.

Із цього списку видно, що час займає паперова робота. Цю проблему також можна вирішити впровадженням технології сканування завдяки використанню терміналів збору даних із вбудованим сканером штрих-коду в процесі відвантаження, цей захід не потребує капітальних вкладень. Комп'ютеризація процесу відвантаження дозволить уникнути проблем із розподілом одного замовлення між декількома машинами, скоротить час оформлення необхідних документів, скоротить кількість помилок, чим дозволить підвищити рівень сервісу за рахунок відсутності затримок при поставці продукції клієнтам, а також дозволить заощадити підприємству витрати найманого транспорту, що має погодинну.

Захід з підвищення продуктивності зони комплектації замовлень передбачає використання технології «multipicking» та комплектації по «хвилях». У процесі хвильового складання ріск-листів замовлення комплектуються в межах т. з. «хвилі». Хвиля – це набір позицій, що збирається у певній зоні зберігання, одночасно відбираються товари всіх замовлень і переміщуються в зону комплектації. Хвильова комплектація дозволяє підвищити швидкість комплектації замовлень, знизивши тимчасові витрати завдяки мінімізації відстані між точками забору компонентів та ліквідації простоїв комірників. Іще одним заходом, що впливає на продуктивність складу, а переважно зони комплектації, є впровадження адресної системи зберігання. Його суть полягає в тому, щоб розбити складське приміщення на ділянки і кожному з них призначити свою адресу та присвоїти штрихкод, тоді будь-яка така ділянка, незалежно від її фізичних характеристик, називатиметься осередком.

Якщо одна партія готової продукції розміщується на кількох палетах, осередки об'єднуються в області для швидкого та гнучкого оперування ними. Передбачається, що проведення запропонованих заходів призведе до підвищення продуктивності складських операцій за рахунок скорочення тимчасових витрат на їх виконання, а також до скорочення помилок при комплектації, прийманні та відвантаженні, що забезпечить високий рівень сервісу. Доцільність застосування запропонованих заходів можна визначити розрахунками ефективності їхнього застосування. Наявність одноразових витрат на впровадження заходів передбачає розрахунок окупності інвестицій [6].

Щоб описати та провести аналіз транспортно-логістичних процесів у таких системах, потрібно використовувати адекватні формальні методи та засоби. Зазвичай для таких цілей вдаються до методу дослідження операцій (наприклад, методу управління запасами, методу розв'язання транспортних задач та методу лінійного програмування). Тому, зважаючи на ускладнення завдань, які вирішуються в організаціях, дуже актуальною є проблема створення моделі транспортно-логістичних процесів та програми, яка б дозволила їх описати та експериментально перевірити.

Таким інструментом є імітаційне моделювання у програмі AnyLogic 7 Personal Learning Edition. Використання методу імітаційного моделювання дає можливість довести значущість прийнятих рішень і тим самим знизити ризик їх реалізації. Для управління транспортно-логістичними процесами (ТЛП) потрібно було описати ці процеси. Для моделювання транспортно-логістичних процесів було розроблено імітаційну модель у програмі Anylogic. Експериментально перевірено створену модель та знайдено недоліки в роботі ТЛП.

Висновки

У ході проведеної роботи розглянуто особливості функціонування транспортно-логістичної системи підприємства та проаналізовано основні проблеми, що впливають на ефективність організації транспортно-логістичних процесів. З'ясовано, що сучасні транспортно-логістичні системи є складними багаторівневими структурами, які охоплюють виробничу, управлінську та допоміжну підсистеми. Кожна з них виконує специфічні функції, спрямовані

на досягнення загальної мети – забезпечення безперервного, якісного та економічно доцільного перевезення вантажів.

Проаналізовано технологічні схеми перевезення вантажів, визначено основні етапи транспортного процесу, зокрема подання рухомого складу під завантаження, навантаження, транспортування, розвантаження та оформлення документації. Встановлено, що однією з актуальних проблем є тривалість обслуговування рухомого складу на вантажних пунктах, що залежить від часу очікування, маневрування, завантаження та оформлення супровідних документів. На основі проведеного аналізу складських операцій було виявлено перевантаженість зон відправлення та комплектування замовлень, що призводить до помилок у виконанні замовлень, пошкоджень тари, затримок у комплектації та відвантаженні. З метою усунення цих проблем запропоновано низку заходів: автоматизація складських процесів із застосуванням технології штрих-кодуювання продукції на етапах приймання, збирання замовлень та відвантаження, що дозволить скоротити тимчасові витрати та мінімізувати кількість помилок; комп'ютеризація процесу відвантаження продукції за допомогою терміналів збору даних, що зменшить тривалість паперових операцій і підвищить якість сервісу; впровадження технології multipicking та хвильової комплектації, яка забезпечить одночасне виконання кількох замовлень,

скоротивши простої персоналу та відстані переміщення.

Отже, впровадження запропонованих організаційно-технічних заходів дозволяє істотно підвищити ефективність транспортно-логістичної діяльності підприємства, забезпечити стабільність перевізного процесу, скоротити тимчасові витрати на виконання складських операцій та підвищити якість обслуговування клієнтів. Це створює підґрунтя для подальшого розвитку логістичних процесів на підприємстві та підвищення його конкурентоспроможності на ринку.

References

1. Kovalenko, V. V. (2021). The influence of road surface condition on the efficiency of freight transportation. *Automobile transport*, 30, 45–51.
2. International Road Transport Association (IRU). (2022). *Innovations in Road and Tire Technologies for Sustainable Rural Transport*, Geneva, 45.
3. European Road Federation (ERF). (2020). *Green Roads for the Future: Technologies for Reducing Rolling Resistance*, Brussels, 68.
4. Smith, J., Brown, P. (2019). Road-Tire Interaction under Varying Environmental Conditions. *International Journal of Vehicle Systems*, 25, 3, 175–189.
5. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 28580:2018. Passenger car, truck and bus tyres. Methods of measuring rolling resistance. Single point test and correlation of measurement results*.
6. Oliynyk, Y. L. (2021). The influence of weather conditions on the operational characteristics of freight transport. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 23, 59–64.

© А. В. Ушаков, провідний інженер,
ORCID: 0009-0004-6805-0191,
e-mail: aushakov@insat.org.ua
(ДП «ДержавтотрансНДІпроект»)

© Anton Ushakov, Lead Engineer,
ORCID: 0009-0004-6805-0191,
e-mail: aushakov@insat.org.ua
(State Road Transport Research Institute)

ГАЗОГЕНЕРАТОРИ МИНУЛОГО... ЧИ МАЮТЬ ПЕРСПЕКТИВУ У МАЙБУТНЬОМУ?

GAS GENERATORS OF THE PAST... DO THEY HAVE PROSPECTS IN THE FUTURE?

Анотація. Проведене ретроспективне дослідження поширення газогенераторних автомобілів у світі, зокрема на території колишнього СРСР, у 1930-1950-х роках. Проаналізовано основні конструктивні недоліки, що зумовлювали значні ризики й небезпеки під час експлуатації таких транспортних засобів. Розглянуто потенційну можливість відновлення використання газогенераторів в автомобілях та іншій техніці в Україні з урахуванням законодавства.
Ключові слова: газогенератор, піроліз, альтернативне паливо, переобладнання.

Abstract. A retrospective study of the worldwide spread of gas generator vehicles — particularly within the former USSR — during the 1930s to 1950s (roughly 70–90 years ago) has been carried out. The principal design shortcomings that entailed substantial operational risks and hazards for such vehicles have been analysed. The study also considers the potential feasibility of re introducing gas generator systems for vehicles in Ukraine, taking into account the current regulatory acts governing vehicle conversion.

A gas generator (gasifier) is a device for converting solid or liquid fuel into a gaseous form. The most common gas generators are those that run on wood, charcoal, hard coal, brown coal, coke and fuel pellets. Gas generators that use fuel oil and other types of liquid fuel as fuel are used much less frequently.

The beginning of the development and widespread use of transport gas generators can be considered 1914, the first industrial production of transport gas generators was established in France.

In 1938, the total number of gas generator vehicles in the world was no more than 10 thousand units, but by 1942 their number had increased to 600 thousand units, and by 1946 it had exceeded 1 million.

This is explained by the desire, primarily of European countries and the former Soviet Union, to ensure their energy security in view of the risk of war, and then during war.

The engines of gas generator vehicles lost a significant part of their power, their traction and dynamic characteristics deteriorated, and their maximum speed decreased due to the significantly lower calorific value of generator gas compared to gasoline.

Gas generator vehicles had an increased fire hazard, particularly in the event of an accident. Operation of gas generators posed a risk of burns and carbon monoxide poisoning for service personnel.

The publication analyzes the hypothetical possibility of resuming the use of gas generators for vehicles, taking into account the requirements of regulatory documents in force in Ukraine, which relate to the conversion of vehicles.

Keywords: gas generator, pyrolysis, alternative fuel, conversion.

Вступ

З огляду на суттєве подорожчання традиційних моторних палив – бензину, дизельного та газових палив, можливим нестабільним їхнім постачанням в Україну з'являється зацікавленість повернутися до використання газогенераторних установок у регіонах, де є наявними місцеві ресурси деревини, кам'яного вугілля, коксу, торфу та іншої енергетичної сировини, які в газогенераторах можуть бути перетворені (газифіковані) в альтернативне паливо – генераторний газ для живлення, насамперед, двигунів внутрішнього згоряння стаціонарного обладнання та іншої техніки, зокрема, автомобільної та сільськогосподарської.

Загалом газогенератор є пристроєм для перетворення твердого або рідкого палива в

газоподібну форму. Найпоширеніші газогенератори, що працюють на дровах, деревному вугіллі, кам'яному вугіллі, бурому вугіллі, коксі і паливних пелетах. Газогенератори, що використовують як паливо мазут та інші види рідкого палива, застосовуються значно рідше.

Газогенератор дає змогу газифікувати тверде паливо, що робить його використання більш зручним і ефективним, чи то опалювальний котел, двигун внутрішнього згоряння, газова турбіна або хімічна промисловість.

Основна частина

Принцип дії газогенератора

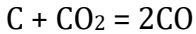
Принцип дії і реакції перетворення вуглецю (палива) у газогенераторі можна описати так [1]:

$C + O_2 = CO_2$ – це повне згоряння палива, яке супроводжується виділенням вуглекислого газу CO_2 ;

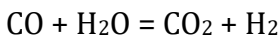
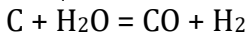
$C + (1/2) O_2 = CO$ – при неповному згорянні, в результаті якого утворюється горючий газ – оксид вуглецю CO .

Обидва ці процеси відбуваються в зоні окиснення газогенератора.

Оксид вуглецю CO утворюється також при проходженні вуглекислого газу CO_2 крізь шар розпеченого палива:



У процесі бере участь частина вологи палива (або волога, підведена ззовні) з утворенням вуглекислого газу CO_2 , водню H_2 , і оксиду вуглецю CO .



Зону, в якій протікають три описаних вище реакції, називають зоною відновлення газогенератора. Обидві зони – окиснення та відновлення, несуть загальну назву активна зона газифікації.

Існують три основні типи газогенераторного процесу: прямого, зворотного (принципова схема газогенератора зі зворотним процесом газифікації палива на **рис. 1.**) і горизонтального. Також відомі й газогенератори двозонного процесу, що представляють собою комбінацію прямого і зворотного процесів.

Приблизний склад газу, отриманого в газогенераторі зверненого процесу газифікації при роботі на деревних цурках абсолютною вологістю 20 %, є таким (у % за об'ємом):

- водень H_2 - 16,1 %;
- вуглекислий газ CO_2 - 9,2 %;
- оксид вуглецю CO - 20,9 %;
- метан CH_4 - 2,3 %;
- неграничні вуглеводні C_nH_m (без смол) - 0,2 %;
- кисень O_2 - 1,6 %;
- азот N_2 - 49,7 %. [1]

Отже, генераторний газ складається з таких основних компонентів – горючих (CO , H_2 , CH_4 , C_nH_m) і – баласту (CO_2 , O_2 , N_2 , H_2O). Активна частина газогенератора складається з трьох перетікаючих ділянок: термічного розкладання палива, окиснення, відновлення.

Калорійність генераторного газу також залежить від складу газу обдуву:

Повітря	3,8 - 4,5 МДж/м ³
Повітря + водяна пара	5 - 6,7 МДж/м ³
Кисень + водяна пара	5 - 8,8 МДж/м ³
Водяна пара	10 - 13,4 МДж/м ³

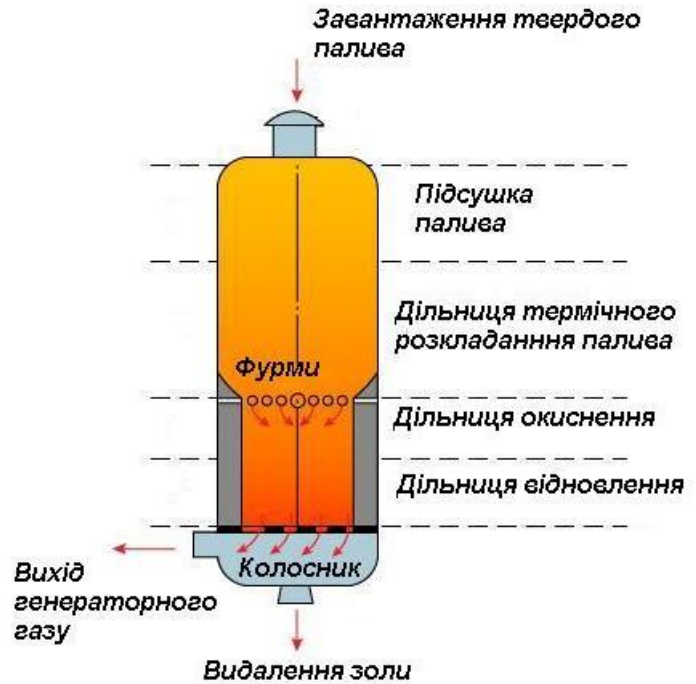


Рис. 1. Схема газогенератора зі зворотним процесом газифікації палива

Причини поширення транспортних газогенераторів

Початком розвитку і широкого застосування транспортних газогенераторів можна вважати 1914 рік, перше промислове виробництво транспортних газогенераторів було налагоджено у Франції.

Активний розвиток технологія автомобільних газогенераторів отримала в 1936 році, коли в період політичної нестабільності, що панувала у світовій спільноті, керівники більшості європейських країн, передбачаючи можливість війни і намагаючись забезпечити енергетичну безпеку своїх держав, почали субсидувати розвиток цього напрямку.

У Франції до 1938 року було 7800 газогенераторних вантажівок, які становили приблизно 2 % всього автомобільного парку країни. У 1940 році Франція зробила масове переобладнання комерційних і військових транспортних засобів з метою переведення їх на використання відходів біомаси. І до кінця 1940 року 50 тис. газогенераторних автомобілів було в дії, а ще 40 тис. газогенераторних установок перебувала у провадженні. Це стало можливим завдяки створенню в країні низки вдалих конструкцій газогенераторних установок, що зробили великий вплив на розвиток технології у світовому масштабі.

У 1938 році загальна кількість газогенераторних автомобілів у світі складало не більше 10 тис. одиниць, але вже до 1942 року їхня кількість зросла до 600 тис. одиниць, а до 1946 року перевищило 1 млн.

Досвід використання газогенераторних автомобілів у колишньому СРСР, недоліки конструкції і ризики експлуатації

У колишньому Радянському Союзі газогенераторні установки для автомобілів почали серійно виробляти в 30-х роках минулого століття, газогенераторні автомобілі серійно виробляли з 1936 року. Найвідомішими моделями таких автомобілів були ЗИС-13, ЗИС-21, ГАЗ-42 та УралЗИС-352.

Залежно від конструкції встановленого на автомобілі газогенератора застосовували різні види твердого палива (деревні цурки, кам'яне і деревне вугілля, кокс, торф тощо), яке в газогенераторі перетворювали (газифікували) у генераторний газ. Причому, тверде паливо для газогенераторних автомобілів повинне було відповідати низці вимог щодо теплотворності, вологості, розмірів шматків, вмісту золи, смол, летючих речовин, механічної міцності тощо.

Конструкція громіздких і важких автомобільних газогенераторів того часу (наприклад, маса газогенераторної установки ЗИС-21А складала 520 кг [1]), була недостатньо досконалою і надійною, у зв'язку з чим їхня експлуатація, технічне обслуговування та ремонт потребували значних затрат часу. Лише розпалювання газогенератора (без застосування бензину) тривало 30-40 хвилин, потім необхідно було постійно підтримувати під доглядом підготовленого персоналу стабільний режим газифікації, з періодичністю біля 3-х годин «шурувати» паливо ломом у камері газифікації, не допускаючи зайвого шлакоутворення і перегріву камери, періодично докладати тверде паливо, витрати якого на автомобілях УралЗИС-352 складали 115 кг на 100 км пробігу [2] (у важких умовах експлуатації витрати палива сягали 165 кг на 100 км пробігу, запас ходу на однієї загрузці палива 30-35 км) [1].

Практично кожні 100-150 км пробігу елементи конструкції газогенератора потребували очищення від шлаку, золи і паливного пилу. Газогенераторну установку необхідно було щоденно оглядати і за необхідності усувати негерметичність ущільнюючими матеріалами, зокрема, азбестовими шнурами, ремонтувати зварюванням прогари корпусних деталей, замінювати гумотехнічні вироби, які часто виходили з ладу. Газогенератори систематично (кожні 8-10 тис. км) повністю розбирали, відчищали від шлаку, золи, пилу і засмолювання механічною обробкою та розчинни-

ками, окремі деталі пропалювали або замінювали новими.

Через значно меншу калорійність генераторного газу ніж бензину двигуни газогенераторних автомобілів втрачали значну частку потужності, суттєво погіршувалися тягово-динамічні властивості автомобілів і зменшувалася максимальна швидкість. У зв'язку з цим при переобладнанні бензинових автомобілів для роботи на генераторному газі були вимушені збільшувати ступінь стиснення, змінювати конструкцію впускної системи двигуна, збільшувати передавальне відношення головної передачі тощо.

Під час роботи газогенераторного автомобіля склад і калорійність генераторного газу коливалися в широких межах залежно від теплотворності і вологості твердого палива, розмірів його шматків, режиму газифікації, забруднення газогенератора та інших чинників. Це, а також те, що складні системи очищення генераторного газу були малоефективними і разом із газом до двигуна потрапляли зола, пил, смоли та інші шкідливі речовини, спричиняло не лише передчасне зношування двигуна, а й значні викиди шкідливих речовин із відпрацьованими газами.

Крім того, газогенераторні автомобілі мали підвищену пожежну небезпечність, зокрема, при скоєнні ДТП. Із працюючим газогенератором не дозволялося перевозити легкозаймисті вантажі, заїжджати до нафтобаз, АЗС, закритих приміщень гаражів і майстерень. Газогенератори не застосовували для газобалонних автомобілів. Експлуатація газогенераторів становила загрозу для обслуговуючого персоналу отримання опіків та отруєння чадним газом.

Враховуючи наявні недоліки газогенераторних автомобілів, їх застосовували переважно у віддалених регіонах під час Другої світової війни – у тилу, коли було неможливо постачання бензину і дизельного палива. У 1956 році, враховуючи недоліки газогенераторів, остаточно припинили виробництво останньої у колишньому СРСР моделі газогенераторного автомобіля УралЗИС-352.

За понад 20 років серійного виробництва газогенераторних автомобілів у колишньому СРСР їхня конструкція залишилася недосконалою, небезпечною і, зокрема, такою, що не змогла б відповідати основним вимогам правил, нормативів і стандартів, які на сьогодні діють в Україні.

Перспективи відновлення використання газогенераторів у автомобілях та іншій техніці

За майже 70 років, що минули після припинення виробництва газогенераторних автомобілів, технічний прогрес у технологіях і конструкційних матеріалах зазнав революційних змін, що відкриває потенційну можливість удосконалити як конструкцію газогенераторів, так і хімічні процеси, які в них відбуваються, усунути чи принаймні зменшити ключові недоліки, характерні для цього обладнання в минулому, та створити енергоефективні газогенератори удосконаленої, безпечної конструкції (далі – удосконалені газогенератори).

Однак дані з доступних джерел не підтверджують реалізацію цієї можливості — відсутня інформація про досвід створення й серійного виробництва удосконалених газогенераторів. В Україні немає такого обладнання, допущеного до промислового виробництва, яке можна було б використовувати для переобладнання автомобілів та іншої моторної техніки.

Відповідно до пункту 3 Порядку переобладнання транспортних засобів [3], переобладнання автомобіля для роботи на альтернативному газовому паливі, зокрема генераторному газі, може виконувати лише суб'єкт господарювання, який має нормативно-технічну документацію на такий вид робіт і свідоцтво про погодження конструкції транспортного засобу щодо безпеки дорожнього руху (далі – Свідоцтво).

Власник автомобіля не вправі здійснювати таке переобладнання в індивідуальному порядку, тим паче із застосуванням саморобного газогенератора кустарного виробництва, на який відсутня нормативно-технічна документація.

Отже, нині в Україні переобладнання автомобілів з установленням газогенераторів унеможливлено внаслідок відсутності:

- удосконалених газогенераторів, допущених до промислового виробництва;
- нормативно-технічної документації як на самі газогенератори, так і на такий вид переобладнання;
- суб'єктів господарювання, які мали б таку документацію і відповідні Свідоцтва.

Відновлення використання газогенераторів в автомобілях та в іншій техніці може мати перспективу лише за умови створення удосконалених газогенераторів без недоліків, відомих в минулому.

У цьому разі суб'єкту господарювання для отримання Свідоцтва на такий вид переобладнання та виконання його на постійній основі необхідно буде розробити, відповідно до вимог ДСТУ 3974 [4] та ДСТУ 8634 [5], нормативно-технічну документацію на газогенератор, здійснити постановку обладнання на виробництво, а також розробити нормативно-технічну документацію на переобладнання відповідних типів і моделей транспортних засобів із застосуванням газогенератора.

Постановка газогенератора на виробництво, відповідно до [4, 5], потребує, зокрема, розроблення конструкторської та технологічної документації, виготовлення та випробування дослідних зразків продукції, підтвердження відповідності продукції технічним регламентам та/або її сертифікації.

Найбільшою, а можливо й непереборною, проблемою відновлення використання газогенераторів в автомобілях є потреба забезпечити, щоб переобладнані транспортні засоби відповідали не лише вимогам пожежної безпеки, а й жорстким нормам щодо викидів шкідливих речовин.

З огляду на це, якщо буде створено достатньо досконалий газогенератор, доцільно розглянути можливість його використання, насамперед, не в автомобілях, а в іншій моторній техніці — як в стаціонарній, так і в мобільній (зокрема сільськогосподарській). Для таких машин екологічні вимоги є менш жорсткими, ніж для автомобілів, а їхнє переобладнання регулюється не Порядком [3], а іншими нормативно-правовими актами.

Створення і розширення використання удосконалених газогенераторів дозволило б зменшити енергетичну залежність від поставок імпорتنих енергоносіїв та застосовувати як моторне паливо дешеве тверде, відновлювальне паливо.

Висновки

1. Відновлення використання газогенераторів в автомобілях та в іншій техніці може мати перспективу лише за умови створення достатньо досконалого газогенератора без недоліків, відомих в минулому.

2. Технічний прогрес відкрив можливості для удосконалення конструкції газогенераторів та хімічних процесів, які в них відбуваються. Однак, досі відсутні дані про створення удосконаленого газогенератора, призначеного для переобладнання автомобілів та іншої техніки.

3. У разі створення достатньо досконалого газогенератора, найбільшою проблемою їхнього використання в автомобілях буде забезпе-

чення відповідності нормам щодо викидів шкідливих речовин. Тому було б доцільним розглянути можливість використання газогенераторів у стаціонарній і мобільній техніці, для якої екологічні вимоги є менш жорсткими, ніж для автомобілів.

4. Потенційне розширення використання удосконалених газогенераторів у окремих сферах дозволило б застосовувати дешеве тверде, відновлювальне паливо та зменшити залежність від імпорتنих енергоносіїв.

References

1. Tokarev H. H. (1955). Gas generator cars. Moscow, Mashhiz, 206.
2. Mashhiz. (1955). Gas generator car Ural-ZIS-352. Operation manual. Moscow, 160.
3. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2010, July 21). On approving the Procedure for

re-equipping vehicles (Resolution No. 607).

Retrieved from

<https://zakon.rada.gov.ua/go/607-2010-%D0%BF>

4. State Basic Center for Critical Technologies (SBC CT) "Mikrotek". (2000). DSTU 3974-2000 System for the development and delivery of products to production. Rules for the implementation of research and development work. General provisions. Retrieved from

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=67207

5. Ukrmetrteststandart. (2016).

DSTU 8634:2016 System for the development and delivery of products to production. Guidelines for the development and delivery of non-food products. Retrieved from

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65001