ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗБІРНИК ТЕЗ

IX Міжнародної науково-технічної конференції

НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ АВТОМОБІЛЬНОЇ І ТРАНСПОРТНО-ДОРОЖНЬОЇ ГАЛУЗЕЙ



м. Луцьк, 26.05–31.05.2026 р.

УДК 656.13

Н34 Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей: матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 60-річчю ЛНТУ та 40-річчю кафедри автомобілів і транспортних технологій, м. Луцьк, 26–31 трав. 2026 р. Луцьк, 2026. – 164 с.

До збірника ввійшли матеріали доповідей, подані учасниками Дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції «Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей», присвяченої 60-річчю Луцького національного технічного університету та 40-річчю кафедри автомобілів і транспортних технологій (26–31 травня 2026 року, кафедра автомобілів і транспортних технологій), до її Організаційного комітету. Тексти публікуються в авторській редакції. За науковий зміст і якість поданих матеріалів відповідають автори, а також (для студентів і аспірантів) наукові керівники.

Відповідальний за випуск: В. ОНИЩУК

© Кафедра автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ, 2026
© Автори статей, 2026

ЗМІСТ

J. Medzevičius, S. Slavinskas. Nickel manganese cobalt oxide battery round trip efficiency at different state of health levels	5
Д.Б. Бегерський. Теоретичні основи параметричного ризик-орієнтованого підходу до контролю якості та надійності деталей автомобілів	9
В.М. Дембіцький, Н.Р. Боярський. Проблеми та перспективи розвитку зарядної інфраструктури для електромобілів в Україні	11
Ю.Ю. Євчук, Ю.Я. Ройко, Ю.М. Лубенець. Аналіз основних чинників, які обумовлюють режими світлофорного регулювання з урахуванням пріоритету для громадського транспорту	15
В.І. Захарчук, О.В. Захарчук, А.Л. Ципящук. Дослідження переобладнаного з дизеля газового двигуна на пропан-бутані	19
Н.М. Защепкіна, І.В. Приміський. Вимірювач димності відпрацьованих газів дизельних двигунів	22
А.В. Йовченко. Дослідження пристрою пасивної безпеки для підвищення безпеки вантажних перевезень	31
А.А. Кашканов, А.А. Кашканова, Г.В. Козачук. Інтеграція навігаційних систем у логістичні процеси приватних автотранспортних підприємств	35
Е.С. Клімов, А.П. Солтус. Моделювання руху еластичного колеса з відведенням	40
А.В. Кологойда, О.О. Аксьонова. Аналіз параметрів відновлення компонентів систем транспортних засобів методами 3D-друку	46
В.М. Корендій, О.Ю. Качур, Р.Г. Літвін, Р.Б. Карпин, М.В. Пилип, А.В. Похмурська. Обґрунтування конструкції та експериментальне дослідження динаміки наземного роботизованого комплексу на гусеничному шасі	49
В.М. Корендій, О.Й. Коцюмбас, Р.Г. Літвін, Л.С. Угрин, Н.О. Гембара, А.М. Кучеренко. Комплексне дослідження систем рекуперації енергії в сучасних автомобільних та транспортно-дорожніх системах: теоретичні та прикладні аспекти	53
В.І. Котенко. Логістичні стратегії забезпечення ефективності ланцюгів постачання	60
В.І. Котенко, А.Ю. Карпович. Напрями удосконалення транспортно-логістичних систем доставки вантажів у міжнародному сполученні	62
В.І. Котенко, Д.С. Хринюк. Напрями удосконалення процесу міжнародних пасажирських перевезень	65
Я.В. Кужельний, Д.С. Машковцев. Можливості використання мультимарочного сканера Launch CRP 239 при діагностуванні гібридних автомобілів різних типів	68
М.А. Мачульський. Вплив стилю водіння на експлуатаційну та паливну ефективність вантажних автомобілів категорії N3 у середовищі CRM-платформ	73
М.М. Маяк, В.І. Григоренко. Світові тенденції у впровадженні екологічних стандартів у транспортній логістиці	76
І.С. Мурований, А.І. Лазарчук. Удосконалення організації доставки дрібнопартійних вантажів у міжміському сполученні	80
І.С. Мурований, С.Л. Слюсар. Безпека та організація автомобільних перевезень нафтопродуктів автоцистернами	84
В.П. Онищук. Моделювання тривалості черги на митниці при виконанні міжнародних перевезень	88
В.І. Павлюк, Ю.В. Булік. Моделювання та дослідження характеристик роботи термоелектричних модулів у системах автомобільного транспорту	93
Ю.Я. Ройко, Ю.Ю. Євчук, Д.Ю. Сидоров. Проблеми в русі транспортних потоків у центральних частинах міст та способи їх розв'язання	97
В.Р. Самостян. Дослідження факторів, що впливають на реальний запас ходу електромобілів	100
І.О. Хітров, С.В. Клімов. Інтелектуальні методи контролю технічного стану транспортних засобів у процесі експлуатації	104

І.В. Худяков, І.В. Грицук, Д.С. Погорлецький, В.В. Черненко. Керування технічним станом транспортних засобів в умовах експлуатації	107
С.П. Чуйко, О.Б. Шмерего. Ризики експлуатації електромобілів на літій-іонній батареї	111
С.М. Шарай, В.В. Першин. Дослідження економічної ефективності впровадження цифрових технологій у діяльність автотранспортних підприємств при виконанні міжнародних вантажних перевезень	114
С.М. Шарай, В.П. Сахно, М.П. Рой, В.М. Поляков. Застосування методів та засобів системного підходу в процесах доставки вантажів автомобільним транспортом	117
В.В. Буряк, А.А. Кашканов. Управління збереженістю та ефективністю доставки насіння соняшнику автомобільним транспортом на основі GPS-даних	120
І.А. Вікович, А.Ф. Обшта, М.В. Бур'ян. Вплив динамічних характеристик регульованого широкочастотного пластинчастого динамічного гасника коливань на зниження вібрації роторного насоса	126
В.В. Гілевич, Ю.М. Яремко. До екологічних небезпек автомобілів у міському середовищі.....	132
М.Ю. Євчук, М.В. Бойків. Динаміка руху транспортного потоку на ділянці доріг з урахуванням облаштування перехресть	136
М.Ю. Євчук, Р.В. Бойків. Оцінка впливу лівоповоротного руху на середню довжину черги транспортних засобів на підході до перехрестя	140
Н.О. Тюрдьо, Т.М. Пострaнський. Driver reaction time as a factor affecting road safety	145
J. Ragulskienė, A. Pauliukas, P. Paškevičius, R. Maskeliūnas, V. Maskeliūnas, I. Murovanyi, L. Ragulskis. Investigation of vibrations of plate type elements of agricultural transportation devices ..	148
В.В. Стельмащук, О.А. Коваль. Прогнозування вантажопотоку як основа планування провізної спроможності міжнародного автомобільного перевізника	154
В.В. Стельмащук. Електронна накладна e-CMR у транспортно-експедиційній діяльності: правові передумови та організаційні наслідки для українського експедитора	158
M. Afonin, O. Maksymiuk, R. Mickiene. Optimization of bulk root-crop transportation: a literature review and a conceptual model for Ukraine	162

UDC 621.355.9:629.331-83

J. Medzevičius, S. Slavinskas
Vytautas Magnus University Agriculture Academy, Studentų Str. 11, 53361 Akademija, Lithuania

NICKEL MANGANESE COBALT OXIDE BATTERY ROUND TRIP EFFICIENCY AT DIFFERENT STATE OF HEALTH LEVELS

This study investigates the influence of battery state of health and discharge rate on the round-trip efficiency of lithium nickel manganese cobalt oxide battery cells used in electric vehicle applications. Experimental testing was performed on individual 18650 size cells using controlled charge and discharge cycles at discharge rates of 1C, 2C, and 3C. Battery round-trip efficiency was evaluated at different state of health levels to determine how battery aging affects overall energy efficiency. The findings indicate that limiting battery discharge rates through battery management system control strategies may improve energy efficiency and extend electric vehicle driving range, particularly for aged batteries.
***Key words**: round-trip efficiency, state of health, electric vehicles, battery aging.*

1 Introduction

The evaluation of lithium-ion battery degradation in electric vehicles is of significant importance for ensuring long-term operational performance, safety, reliability, and energy efficiency. As lithium-ion batteries undergo repeated charge and discharge cycles throughout their service life, a variety of degradation mechanisms occur within the cell structure. These degradation processes gradually reduce the available battery capacity, increase internal resistance, and alter the thermal characteristics of the battery system [1]. Consequently, battery aging directly affects critical electric vehicle performance parameters, including driving range, charging capability, power delivery, thermal stability, and overall energy efficiency [2].

Among the various indicators used to characterize battery performance degradation, round-trip efficiency (RTE) is considered one of the most important parameters for evaluating the overall efficiency of electric vehicle battery system [3]. The RTE of a battery is defined as the ratio of the energy delivered during the discharge process to the total energy required during charging, typically expressed as a percentage. High RTE is essential for maximizing vehicle energy utilization and minimizing energy losses associated with battery operation.

For new NMC batteries, the RTE typically ranges between approximately 85% and 95%, depending on operating conditions such as temperature and charge-discharge rate. However, as the battery ages and its state of health (SOH) progressively declines, the RTE also decreases [4]. Battery aging is primarily characterized by capacity fade and an increase in internal resistance caused by electrochemical side reactions. The increase in internal resistance results in higher resistance losses and elevated heat generation during both charging and discharging processes, thereby reducing the amount of recoverable energy and lowering overall battery efficiency [5].

In electric vehicle applications, the reduction in battery RTE over time can significantly influence total vehicle energy consumption and operational economics. Lower battery efficiency results in increased charging energy requirements for the same usable output energy, ultimately reducing system-level efficiency and affecting vehicle range predictions [6]. Therefore, understanding the relationship between battery aging, discharge rates and RTE is essential for accurate modeling of electric vehicle performance, battery lifetime estimation, and optimization of battery management system (BMS) strategies.

This study investigates the RTE characteristics of lithium-ion NMC battery cells at different SOH levels while discharging at different discharge rates C, in order to evaluate how battery aging influences energy efficiency during different operating conditions. By analyzing the variation of RTE under different degradation conditions, the research aims to provide a better understanding of the efficiency behavior of electric vehicle batteries throughout their operational lifetime and to contribute to the development of more accurate battery performance assessment methodologies.

2 Evaluation of Battery Degradation

2.1 Battery SOH Measurement

Battery state of health (SOH) can be evaluated by monitoring the reduction in battery capacity over repeated charge–discharge cycles. This is typically accomplished by periodically discharging the battery under controlled conditions and measuring the delivered energy and discharged capacity during each cycle (1). As the battery ages, electrochemical degradation mechanisms progressively reduce the available capacity, resulting in a gradual decline in energy storage capability with increasing cycle number.

$$SOH_C = \frac{C_{Measured}}{C_{Initial}} \times 100\ \% \quad (1)$$

Where the battery capacity health SOH_C is the ratio of battery's cell current measured capacity $C_{Measured}$ to the initial capacity $C_{Initial}$ [7].

2.2 Battery RTE Measurement

Battery round-trip efficiency can be determined by measuring the total energy required to charge the battery and comparing it with the total energy delivered during the subsequent discharge process (2). The RTE generally decreases at higher charge and discharge rates, as increased current levels lead to greater internal resistive and thermal losses within the battery.

$$RTE = \frac{Wh_{out}}{Wh_{in}} \times 100\ \% \quad (2)$$

Where the battery round trip efficiency RTE is the ratio of discharged energy from the battery Wh_{out} to the charged energy to the battery $C_{Initial}$ [8].

3 Research Methodology

In this study, experimental investigations were conducted using individual lithium-ion battery cells rather than complete battery packs. This approach was selected in order to reduce overall energy consumption during testing procedures and to minimize the financial costs associated with experimental research, as commercially available full-scale electric vehicle battery packs are significantly more expensive. Furthermore, testing at the cell level enables more precise control of operating conditions and allows the electrochemical performance of each cell to be evaluated independently, without the influence of battery management systems or inter-cell balancing effects typically present in battery pack configurations.

The experiments were performed using cylindrical 18650-format lithium NMC battery cells. Each cell was subjected to individual charge and discharge cycles while continuously monitoring and recording the electrical energy supplied to and extracted from the cell. All measurements were carried out using the EBC-A40L battery testing system in combination with the EB Tester software platform, which enabled automated control and data acquisition throughout the experimental procedure.

To evaluate the RTE of the cells under different operating conditions, discharge tests were performed using the constant current (CC) method at multiple discharge rates corresponding to 1C, 2C, and 3C. These discharge rates were selected to investigate the influence of increasing current load (simulated higher acceleration in electric vehicle) on battery efficiency and energy losses. During each experimental cycle, the cells were discharged from a fully charged state of 100% state of charge (SOC), corresponding to a terminal voltage of 4.2 V, down to 0% SOC, corresponding to a cutoff voltage of 2.5 V.

Following the completion of each discharge cycle, the cells were recharged using a two-stage charging protocol commonly applied to lithium-ion batteries. Initially, the charging process was conducted in constant current (CC) mode at a charging rate of 1C until the cell voltage reached the upper charging limit of 4.2 V. Subsequently, the charging process transitioned to constant voltage (CV) mode, during which the voltage was maintained constant while the charging current gradually decreased. The charging cycle was terminated once the charging current dropped to 250 mA, indicating that the cell had reached a fully charged condition.

4 Results and Their Analysis

4.1 NMC Battery Round Trip Efficiency analysis

The experimental results revealed a clear relationship between battery SOH, discharge rate, and RTE of the investigated lithium NMC cells. A progressive decrease in RTE was observed with declining SOH

across all tested discharge rates, indicating that battery aging significantly reduces energy conversion efficiency.

At a discharge rate of 1 C, the measured battery RTE decreased from 91.7% at 100% SOH to 85.6% at 65% SOH, as presented in Table 1. This reduction demonstrates the impact of battery degradation on energy losses during charge-discharge cycling, even under relatively moderate current loading conditions.

Table 1. NMC round trip efficiency test results at different SOH levels

SOH	Charged energy (1 C), Wh	Discharged energy (1 C), Wh	RTE (1 C), %	Charged energy (2 C), Wh	Discharged energy (2 C), Wh	RTE (2 C), %	Charged energy (3 C), Wh	Discharged energy (3 C), Wh	RTE (3 C), %
100	10,2	9,4	91,7	10,1	9,2	91,1	10,1	8,8	86,8
95	9,7	8,9	91,2	9,6	8,7	90,7	9,6	8,3	86,5
90	9,2	8,3	90,1	9,2	8,1	88,4	9,2	7,8	84,9
85	8,8	7,9	89,7	8,7	7,6	87,0	8,7	7,3	84,6
80	8,3	7,4	88,6	8,3	7,1	85,4	8,2	6,9	83,5
75	7,9	6,8	86,8	7,8	6,6	84,5	7,8	6,3	81,3
70	7,4	6,3	85,5	7,3	6,1	82,8	7,3	5,9	80,4
65	6,8	5,9	85,6	6,9	5,6	82,1	6,8	5,4	79,8

A more pronounced efficiency reduction was observed at higher discharge rates. At a discharge rate of 2 C, the RTE decreased from 91.1% for a new battery cell at 100% SOH to 82.1% at 65% SOH. Similarly, at the highest investigated discharge rate of 3C, the RTE declined from 86.8% at 100% SOH to 79.8% at 65% SOH (Figure 1).

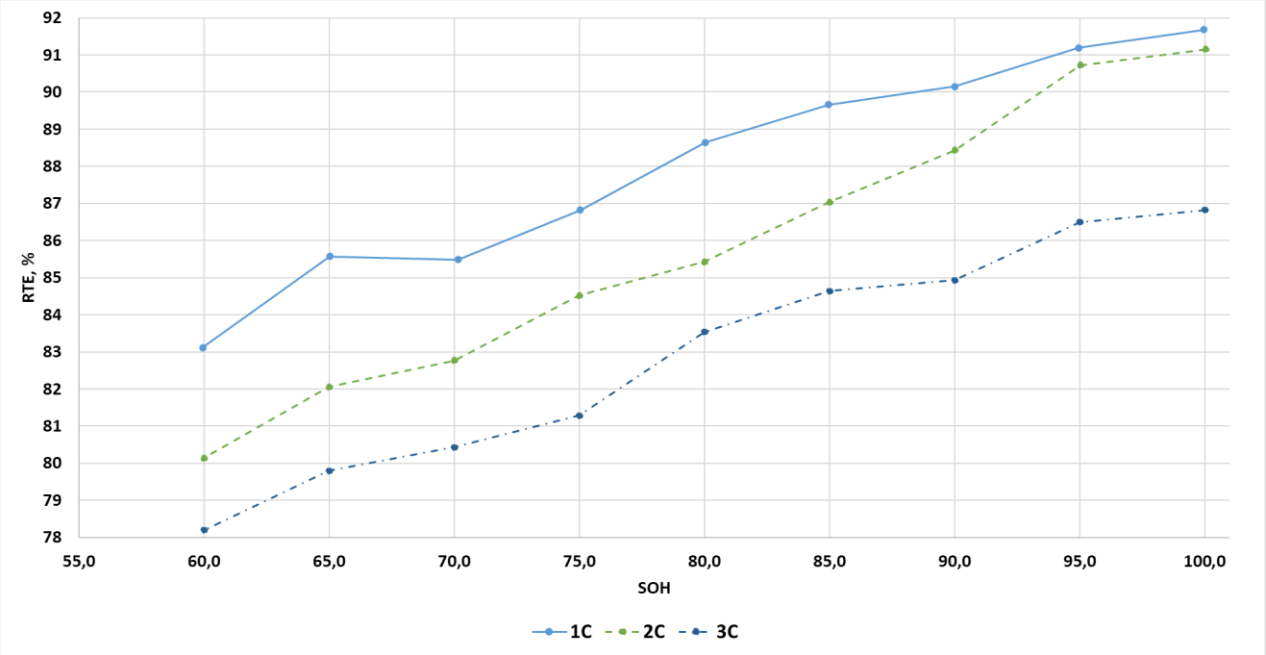


Figure 1. NMC battery round trip efficiency dependency on battery the state of health at different discharge rates C

The obtained results indicate that both battery aging and increased discharge currents contribute to lower round-trip efficiency. Higher discharge rates intensify internal resistive losses and heat generation within the cell, while aging-related increases in internal resistance further amplify these effects.

5 Conclusions

This study demonstrated that the state of health of lithium nickel manganese cobalt oxide battery cells has a significant influence on battery round-trip efficiency. As battery degradation progresses, the RTE decreases due to increased internal resistance and higher energy losses during charging and discharging processes.

The experimental results also showed that battery RTE is strongly dependent on the discharge rate. Higher discharge currents resulted in lower efficiency because of increased resistance and thermal losses within the cell. Therefore, limiting the discharge rate can improve the overall energy efficiency of aged lithium-ion batteries.

The findings suggest that, in electric vehicle applications, the battery management system can improve energy utilization by reducing the allowable discharge rate as the battery ages. Such control strategies may help maintain higher RTE values and increase the achievable driving distance by up to approximately 6%, despite reduced battery capacity at lower SOH levels.

In addition, the results indicate that energy-saving vehicle operating modes, such as “ECO” mode, can further improve electric vehicle efficiency and driving range by limiting battery power demand and reducing discharge rates.

Further research is required to investigate the influence of depth of discharge (DOD) and dynamic operating conditions on battery RTE in order to better adapt these findings for real-world electric vehicle battery management systems.

References

1. Carnovale, A., Li, X.: A modeling and experimental study of capacity fade for lithium-ion batteries. *Energy and AI*, 2 (100032) (2020).
2. Guo, J., Li, Y., Pedersen, K., Stroe, D.-I.: Lithium-ion battery operation, degradation, and aging mechanism in electric vehicles: An overview. *Energies*, 14(17) (2021).
3. Wang, N., Fu, L., Wang, Y., Wang, M., Li, M., Dong, X., Zheng, R.: Life cycle carbon emissions of lithium-ion batteries considering dynamic round-trip efficiency degradation: From assessment to reduction. *Journal of Energy Storage*, 163(122148) (2026).
4. Zhang, R., Xia, B., Li, B., Lai, Y., Zheng, W., Wang, H., Wang, W., Wang, M.: Study on the characteristics of a high capacity nickel manganese cobalt oxide (NMC) lithium-ion battery–an experimental investigation. *Energies*, 11(9), 2275 (2018).
5. Peringer, S. M., Kotak, Y., Schweiger, H.-G.: Experimental investigation of heat dissipation of lithium–ion cells and its correlation with internal resistance. *Applied Sciences*, 14(16), 7430 (2024).
6. Reick, B., Konzept, A., Kaufmann, A., Stetter, R., & Engelmann, D.: Influence of charging losses on energy consumption and CO2 emissions of battery-electric vehicles. *Vehicles*, 3(4), 736–748 (2021).
7. Su, L., Xu, Y.: State-of-health estimation of lithium-ion batteries: A comprehensive literature review from cell to pack levels. *Energy Conversion and Economics* 5(4), 224-242 (2024).
8. Safoutin, M., Cherry, J., McDonald, J., Lee, S.: Effect of current and SOC on round-trip energy efficiency of a Lithium-Iron Phosphate (LiFePO4) battery pack. *SAE Technical Paper Series*, 1 (2015).

Justinas Medzevičius – Ph.D. student, Vytautas Magnus University Agriculture Academy, Studentų Str. 11, 53361 Akademija, Lithuania, e-mail: justinas.medzevicius@vdu.lt
Stasys Slavinskas – Doctor of engineering, Professor, Vytautas Magnus University Agriculture Academy, Studentų Str. 11, 53361 Akademija, Lithuania, e-mail: stasys.slavinskas @vdu.lt

УДК 629.113.012.1:658.562:004.94

Д.Б. Бегерський
Державний університет «Житомирська політехніка»

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПАРАМЕТРИЧНОГО РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ ДО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ

У роботі розглянуто теоретичні основи параметричного ризик-орієнтованого підходу до контролю якості та надійності деталей автомобілів. Обґрунтовано доцільність параметричного опису стану деталей і виділення критичних параметрів. Показано багатофакторний характер процесів деградації та роль поверхневого шару у формуванні відмов. Запропоновано інтеграцію параметричного і ризик-орієнтованого підходів для підвищення точності діагностики та прогнозування ресурсу.

Ключові слова: *якість, надійність, деталі автомобілів, параметричний підхід, ризик-орієнтований підхід, неруйнівний контроль, технічна діагностика.*

The paper considers the theoretical foundations of a parametric risk-based approach to quality control and reliability of automotive parts. The feasibility of a parametric description of part condition and identification of critical parameters is substantiated. The multifactor nature of degradation processes and the role of the surface layer in failure formation are shown. Integration of parametric and risk-based approaches is proposed to improve diagnostic accuracy and service life prediction.

Keywords: *quality, reliability, automotive parts, parametric approach, risk-based approach, non-destructive testing, technical diagnostics.*

Забезпечення якості та надійності деталей автомобілів є одним із визначальних чинників безпечної та ефективної експлуатації транспортних засобів. У сучасних умовах розвитку автомобільного транспорту спостерігається стійка тенденція до ускладнення конструкцій транспортних засобів, широкого впровадження нових матеріалів і підвищення рівня експлуатаційних навантажень. Це зумовлює необхідність підвищення вимог до технічного стану конструктивних елементів автомобілів, оскільки навіть незначні відхилення їх параметрів можуть призводити до розвитку деградаційних процесів і виникнення відмов.

Надійність деталей автомобілів формується під впливом складної взаємодії матеріалознавчих, технологічних і експлуатаційних чинників. Дефекти, що виникають на стадіях виготовлення, зокрема мікропори, включення, структурні неоднорідності та залишкові напруження, у процесі експлуатації можуть виступати концентраторами напружень і ініціювати процеси втомного руйнування. У поєднанні з дією змінних навантажень, температурних коливань і трибологічних процесів це призводить до поступового накопичення пошкоджень і зниження ресурсу деталей.

Особливу роль у формуванні експлуатаційної надійності відіграє поверхневий шар матеріалу, який безпосередньо взаємодіє із зовнішнім середовищем. Саме у приповерхневих зонах відбувається зародження більшості дефектів, що визначають довговічність деталей. Зміна фізико-механічних властивостей поверхневого шару, викликана процесами зношування, мікропластичної деформації та структурних перетворень, суттєво впливає на розвиток деградаційних процесів.

Суттєвою проблемою сучасного етапу є також поширення контрафактних автомобільних деталей, які не відповідають встановленим вимогам якості. Використання таких компонентів призводить до підвищення ймовірності відмов, особливо у критичних системах автомобіля, що безпосередньо впливають на безпеку дорожнього руху. Це обумовлює необхідність розроблення нових підходів до контролю якості, здатних забезпечити виявлення не лише явних, але й прихованих дефектів.

Сучасні методи неруйнівного контролю є важливим інструментом оцінювання технічного стану деталей, однак їх можливості щодо діагностики ранніх стадій деградації залишаються обмеженими. Традиційні методи орієнтовані переважно на виявлення вже сформованих дефектів, що не дозволяє своєчасно прогнозувати розвиток пошкоджень. У зв’язку з цим актуальним є розвиток підходів, що базуються на аналізі параметрів стану матеріалу та їх змін у процесі експлуатації, а також використанні сучасних методів структурного моніторингу.

У роботі розглянуто параметричний підхід до контролю якості та надійності деталей автомобілів, який передбачає опис їх технічного стану за допомогою системи кількісних параметрів. У межах цього підходу деталь розглядається як складна багатопараметрична система, що характеризується сукупністю матеріалознавчих, геометричних, технологічних та експлуатаційних характеристик. Такий підхід дозволяє перейти від якісного аналізу до кількісного оцінювання стану деталей і створює передумови для використання математичних моделей прогнозування їх поведінки.

Одним із ключових елементів параметричного підходу є визначення критичних параметрів, зміна яких суттєво впливає на надійність деталі або призводить до ініціювання процесів руйнування. Для різних груп деталей такими параметрами можуть виступати твердість, залишкові напруження, шорсткість поверхні, параметри режиму мащення, температурні характеристики та інші показники. Виділення критичних параметрів дозволяє обґрунтовано формувати програми контролю та підвищувати ефективність діагностики.

Процеси дефектоутворення мають багаторівневий характер і включають стадії зародження мікродефектів, їх накопичення та подальший розвиток до макроскопічного руйнування. Втомне руйнування є одним із основних механізмів відмов і характеризується кумулятивним характером. При цьому швидкість розвитку дефектів визначається як зовнішніми навантаженнями, так і внутрішніми параметрами матеріалу, зокрема його структурою та напруженим станом.

Ризик-орієнтований підхід передбачає оцінювання технічного стану деталі з урахуванням імовірності її відмови та тяжкості можливих наслідків. Такий підхід дозволяє враховувати не лише фізичний стан деталі, але й її функціональну значущість у системі. Це особливо важливо для елементів, відмова яких може призвести до серйозних наслідків для безпеки експлуатації транспортних засобів.

Інтеграція параметричного та ризик-орієнтованого підходів дозволяє сформувати узагальнену модель контролю якості та надійності деталей автомобілів. У межах цієї моделі параметри визначають поточний стан деталі, ризик оцінює критичність цього стану, а аналіз зміни параметрів у часі дозволяє прогнозувати розвиток деградаційних процесів. Це забезпечує перехід від статичного контролю до динамічного управління технічним станом.

Запропонований підхід створює теоретичне підґрунтя для побудови систем технічної діагностики нового покоління, які базуються на принципах інтеграції даних, прогнозування та цифровізації. Його використання дозволяє підвищити точність діагностики, оптимізувати процеси технічного обслуговування, знизити ймовірність відмов і підвищити рівень безпеки експлуатації автомобільного транспорту.

Таким чином, параметричний ризик-орієнтований підхід є перспективним напрямом розвитку систем контролю якості та надійності деталей автомобілів, що забезпечує комплексне врахування багатофакторної природи процесів їх деградації та підвищує ефективність управління технічним станом транспортних засобів.

БЕГЕРСЬКИЙ Дмитро Богданович – к.т.н., доцент кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту Державного університету «Житомирська політехніка». E-mail: begerskiy@gmail.com

УДК 629.331:621.31
В.М. Дембіцький
Н.Р. Боярський
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ В УКРАЇНІ

У роботі розглянуто проблеми та перспективи розвитку зарядної інфраструктури для електромобілів в Україні. Визначено основні бар'єри її формування, зокрема нерівномірність розміщення зарядних станцій, обмежену кількість швидкісних пунктів та недостатню інтеграцію з енергетичною системою. Обґрунтовано перспективні напрями розвитку зарядної мережі з урахуванням потреб користувачів, транспортної системи та принципів сталої мобільності.
***Ключові слова**: електромобіль, зарядна інфраструктура, зарядна станція, електромобільність, автомобільний транспорт, енергетична система, стала мобільність.*

The paper examines the problems and prospects of developing the charging infrastructure for electric vehicles in Ukraine. The main barriers to its formation are identified, in particular, the uneven placement of charging stations, the limited number of high-speed points, and insufficient integration with the energy system. Prospective directions for developing the charging network are substantiated, taking into account the needs of users, the transport system, and the principles of sustainable mobility.
***Keywords**: electric vehicle, charging infrastructure, charging station, electromobility, road transport, energy system, sustainable mobility.*

Сучасний розвиток автомобільного транспорту характеризується поступовим переходом до енергоефективних, екологічно безпечніших та технологічно досконаліших транспортних засобів. Одним із ключових напрямів такої трансформації є поширення електромобілів, які розглядаються як важлива складова сталої мобільності, зменшення залежності від нафтопродуктів і скорочення негативного впливу транспорту на довкілля. Водночас ефективність упровадження електромобільного транспорту значною мірою залежить не лише від технічних характеристик самих транспортних засобів, а й від рівня розвитку відповідної інфраструктури, насамперед мережі зарядних станцій.

В Україні ринок електромобілів поступово розвивається, однак формування зарядної інфраструктури відбувається нерівномірно та переважно під впливом локальних ініціатив, комерційного інтересу окремих операторів і потреб великих міст. У результаті виникає низка проблем, пов'язаних із недостатньою кількістю зарядних пунктів, їх просторовою незбалансованістю, обмеженою доступністю у житлових районах, на міжміських маршрутах і в малих населених пунктах, а також із різним рівнем технічної оснащеності зарядних станцій. Це ускладнює планування поїздок, знижує довіру користувачів до електромобілів та стримує їх ширше використання.

Окремою проблемою є недостатня інтеграція зарядної інфраструктури з енергетичною системою, міським плануванням, транспортною мережею та цифровими сервісами. Збільшення кількості електромобілів потребує врахування навантаження на електричні мережі, можливостей підключення зарядних станцій, режимів споживання електроенергії, тарифної політики, використання відновлюваних джерел енергії та систем управління попитом. Без комплексного підходу розвиток зарядної мережі може супроводжуватися технічними, організаційними й економічними обмеженнями, що знижуватиме її ефективність.

Таким чином, загальна проблема полягає у необхідності формування науково обґрунтованих і практично придатних підходів до розвитку зарядної інфраструктури для електромобілів в Україні. Така інфраструктура має бути доступною, надійною, територіально збалансованою, технічно сумісною з потребами різних категорій користувачів і узгодженою з можливостями енергетичної та транспортної систем. Її розвиток повинен розглядатися як важлива передумова подальшого поширення електромобілів, модернізації автомобільного транспорту та переходу до більш сталих моделей мобільності.

Метою дослідження є визначення основних проблем, що стримують розвиток зарядної інфраструктури для електромобілів в Україні, та обґрунтування перспективних напрямів її удосконалення з урахуванням потреб користувачів, особливостей транспортної системи, можливостей електричних мереж і завдань сталого розвитку автомобільного транспорту.

Упродовж останніх п’яти років проблема розвитку зарядної інфраструктури для електромобілів активно розглядається у наукових працях, аналітичних звітах і програмних документах, оскільки саме доступність заряджання визначається як одна з ключових умов масового переходу до електромобільності. У звіті *Global EV Outlook 2025* Міжнародного енергетичного агентства зазначено, що у 2024 році у світі було додано понад 1,3 млн публічних зарядних пунктів, а їх загальна кількість перевищила 5 млн; водночас підкреслено, що домашнє заряджання залишається основним способом заряджання, але розвиток публічної мережі є критично важливим для користувачів без доступу до приватних зарядних пристроїв [1].

У дослідженнях IEA також наголошується, що подальше розширення зарядної інфраструктури має відбуватися не лише у великих містах, а й за межами урбанізованих територій, оскільки саме це забезпечує довіру користувачів до електромобілів під час міжміських поїздок [2]. Європейський досвід свідчить про значну потребу в прискоренні темпів розгортання зарядних пунктів: за оцінками ACEA, кількість зарядних точок у ЄС зростає повільніше, ніж продажі електромобілів, що створює ризик інфраструктурного відставання [3].

Українські дослідники також акцентують увагу на питаннях оптимізації та управління зарядною мережею. Зокрема, А. Бондарчук, П. Складанний, В. Жебка та А. Стражніков розглядають можливість застосування методів дослідження операцій для оптимізації системи заряджання електромобілів [4]. Р. Грашт і П. Матейчик пропонують комплексну методику керування розвитком мережі зарядних станцій на основі багатокритеріального підходу [5]. Окремий напрям становлять дослідження кіберфізичної природи зарядної інфраструктури, її стандартів, вразливостей і вимог до безпеки, що особливо важливо для швидкісних зарядних станцій і цифрових сервісів [6]. Отже, сучасні дослідження підтверджують необхідність комплексного розвитку зарядної інфраструктури в Україні з урахуванням просторового розміщення, енергетичних обмежень, цифровізації, безпеки та потреб користувачів.

Розвиток зарядної інфраструктури для електромобілів є однією з ключових передумов переходу автомобільного транспорту України до більш енергоефективної, екологічно орієнтованої та технологічно сучасної моделі функціонування. Електромобіль як транспортний засіб не може розглядатися ізольовано від інфраструктурного середовища, оскільки його практична ефективність значною мірою залежить від доступності заряджання, надійності зарядних станцій, зручності їх використання, вартості електроенергії, швидкості обслуговування та можливості планування поїздок. Саме тому зарядна інфраструктура має розглядатися не лише як сукупність окремих зарядних пунктів, а як комплексна транспортно-енергетична система, що поєднує технічні, просторові, організаційні, економічні та цифрові складові.

Однією з основних проблем розвитку зарядної інфраструктури в Україні є нерівномірність її територіального розміщення. Найбільша кількість зарядних станцій концентрується у великих містах, біля торговельних центрів, бізнес-об’єктів, готелів, автозаправних комплексів та на окремих ділянках магістральних автомобільних доріг. Водночас у малих містах, селищах, житлових масивах, на периферійних територіях та на багатьох міжміських маршрутах доступ до зарядної інфраструктури залишається обмеженим. Така ситуація знижує мобільність користувачів електромобілів, ускладнює планування поїздок і формує так званий психологічний бар’єр «обмеженого запасу ходу», коли потенційний користувач сумнівається у можливості своєчасного заряджання транспортного засобу.

Важливою проблемою є також недостатня кількість швидкісних зарядних станцій. Для щоденного міського використання електромобіля часто достатньо повільного або середньошвидкісного заряджання, зокрема у місцях тривалої стоянки автомобіля. Проте для міжміських поїздок, комерційного транспорту, служб доставки, таксі та корпоративних автопарків особливого значення набуває швидкісна зарядка, яка дає змогу мінімізувати простої транспортного засобу. Недостатня кількість таких станцій обмежує функціональні можливості електромобілів і стримує їх використання у сферах, де важливою є висока інтенсивність експлуатації.

Окремого значення набуває питання технічної сумісності зарядної інфраструктури. На практиці користувачі можуть стикатися з різними типами роз’ємів, різними потужностями зарядних пристроїв, неоднаковими умовами доступу до зарядних мереж, відмінностями у способах оплати та реєстрації в мобільних застосунках. Це ускладнює користування зарядними станціями, особливо для водіїв, які здійснюють поїздки між регіонами або використовують зарядні пункти різних операторів. Тому перспективний розвиток зарядної інфраструктури має передбачати підвищення рівня стандартизації, технічної сумісності, відкритості даних про доступність станцій, прозорості тарифів і зручності цифрових сервісів.

Суттєвим обмеженням для розвитку зарядної мережі є стан електричних мереж та можливості підключення нових потужностей. Масове впровадження зарядних станцій, особливо швидкісних, створює додаткове навантаження на електроенергетичну систему. Це потребує врахування

пропускної здатності локальних мереж, пікових навантажень, режимів споживання електроенергії та можливості застосування систем керування попитом. У цьому контексті важливим є не лише збільшення кількості зарядних пунктів, а й їх раціональне розміщення з урахуванням наявної енергетичної інфраструктури. Перспективним напрямом є поєднання зарядних станцій із локальними джерелами відновлюваної енергії, системами накопичення електроенергії та інтелектуальними системами управління заряджанням.

Розвиток зарядної інфраструктури має враховувати різні сценарії використання електромобілів. Для приватних користувачів важливим є доступ до заряджання біля місця проживання, роботи, навчання або тривалого перебування. Для міського електротранспорту, таксі, каршерингу, служб доставки та корпоративних автопарків важливими є прогнозованість заряджання, висока потужність, можливість резервування зарядних пунктів і мінімізація часу простою. Для міжміських поїздок визначальним є формування зарядних коридорів уздовж основних автомобільних доріг. Отже, зарядна інфраструктура повинна розвиватися диференційовано, з урахуванням потреб різних груп користувачів і різних типів транспортних операцій.

Важливою складовою є інтеграція зарядної інфраструктури у міське планування. Зарядні станції доцільно розміщувати не випадково, а з урахуванням інтенсивності транспортних потоків, структури паркування, щільності житлової забудови, розташування громадських, торговельних, адміністративних і сервісних об’єктів. Особливої уваги потребують багатоквартирні житлові райони, де значна частина користувачів не має можливості встановити індивідуальний зарядний пристрій. У таких умовах важливим є розвиток доступних публічних і напівпублічних зарядних пунктів на паркінгах, прибудинкових територіях, стоянках підприємств, закладів освіти, торговельних центрів і транспортно-пересадкових вузлів.

Перспективним напрямом є розміщення зарядних станцій на підприємствах автомобільного сервісу. Станції технічного обслуговування, автосалони, сервісні центри, шиномонтажні комплекси та інші об’єкти автомобільної інфраструктури можуть виконувати не лише традиційні функції технічного обслуговування і ремонту, а й функції заряджання, діагностування та обслуговування електромобілів. Це дає змогу поєднати процес заряджання з виконанням сервісних операцій, консультаційним супроводом користувачів, технічним контролем стану акумуляторної батареї та електричних систем транспортного засобу. Для сервісних підприємств це створює нові напрями діяльності, а для користувачів – підвищує зручність експлуатації електромобілів.

Важливу роль у розвитку зарядної інфраструктури відіграють цифрові технології. Сучасна зарядна мережа повинна забезпечувати користувача інформацією про розташування станцій, їх потужність, доступність у реальному часі, вартість заряджання, можливість бронювання, прогнозований час очікування та способи оплати. Для операторів зарядної інфраструктури цифрові системи дають змогу контролювати завантаження станцій, аналізувати попит, планувати технічне обслуговування, управляти тарифами та оптимізувати використання енергетичних ресурсів. У перспективі такі системи можуть бути інтегровані з навігаційними сервісами, платформами міської мобільності, системами керування електромережами та транспортними інформаційними системами.

Серед перспектив розвитку зарядної інфраструктури в Україні доцільно виділити кілька ключових напрямів:

– розширення мережі зарядних пунктів у містах із пріоритетом для житлових районів, громадських паркінгів, місць роботи та об’єктів масового відвідування;

– формування міжміських зарядних коридорів, що забезпечуватимуть можливість безперешкодного пересування електромобілями між регіонами;

– збільшення частки швидкісних зарядних станцій, особливо на транспортних вузлах, автомагістралях, логістичних центрах і сервісних об’єктах;

– інтеграція зарядної інфраструктури з відновлюваними джерелами енергії та системами накопичення, що може підвищити енергетичну стійкість і зменшити навантаження на мережу;

– удосконалення нормативного, організаційного та інвестиційного забезпечення розвитку зарядної інфраструктури.

Таким чином, проблеми розвитку зарядної інфраструктури для електромобілів в Україні мають комплексний характер і охоплюють технічні, просторові, енергетичні, економічні та організаційні аспекти. Водночас наявні проблеми формують і значний потенціал для подальшого розвитку. За умови системного підходу зарядна інфраструктура може стати важливим елементом модернізації автомобільного транспорту, підвищення енергоефективності перевезень, розвитку нових сервісних послуг і поступового переходу до сталої мобільності. Її ефективне формування потребує узгоджених дій держави, органів місцевого самоврядування, енергетичних компаній, операторів зарядних мереж, підприємств автомобільного сервісу та користувачів електромобілів.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що розвиток зарядної інфраструктури є однією з ключових передумов поширення електромобілів в Україні та формування більш сталої моделі функціонування автомобільного транспорту. Ефективність використання електромобілів значною мірою залежить не лише від їх технічних характеристик, а й від доступності, надійності, територіальної збалансованості та зручності зарядної мережі.

Визначено, що основними проблемами розвитку зарядної інфраструктури в Україні є нерівномірне розміщення зарядних станцій, недостатня кількість швидкісних зарядних пунктів, обмежена доступність заряджання у житлових районах і на міжміських маршрутах, різний рівень технічної сумісності обладнання, а також недостатня інтеграція зарядної мережі з енергетичною системою та цифровими сервісами.

Обґрунтовано, що подальший розвиток зарядної інфраструктури має здійснюватися на основі комплексного підходу, який враховує потреби різних груп користувачів, особливості міського та міжміського транспортного середовища, можливості електричних мереж, економічну доцільність, рівень цифровізації та перспективи використання відновлюваних джерел енергії.

Перспективними напрямами розвитку зарядної інфраструктури в Україні є розширення мережі зарядних пунктів у містах, формування міжрегіональних зарядних коридорів, збільшення частки швидкісних зарядних станцій, розміщення зарядних пунктів на об'єктах автомобільного сервісу, інтеграція зарядної інфраструктури з системами накопичення енергії та впровадження інтелектуальних цифрових сервісів для управління процесом заряджання.

Таким чином, формування ефективної зарядної інфраструктури для електромобілів в Україні є важливим завданням, що потребує узгодженої взаємодії держави, органів місцевого самоврядування, енергетичних компаній, операторів зарядних мереж, підприємств автомобільного сервісу та користувачів. Її розвиток сприятиме підвищенню енергоефективності автомобільного транспорту, зниженню екологічного навантаження, модернізації транспортної системи та поступовому переходу до сталої мобільності.

1. IEA. Global EV Outlook 2025 [Electronic resource]. Paris : International Energy Agency, 2025. URL: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025. Дата звернення: 15.05.2026.

2. IEA. Global EV Outlook 2024: Outlook for electric vehicle charging infrastructure [Electronic resource]. Paris : International Energy Agency, 2024. URL: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-electric-vehicle-charging-infrastructure. Дата звернення: 15.05.2026.

3. EU needs 8 times more car charging points per year to meet demand, ACEA finds [Electronic resource] / Reuters. 2024. URL: https://www.reuters.com/business/autos-transportation/eu-needs-8-times-more-car-charging-points-per-year-meet-demand-acea-finds-2024-04-29/. Дата звернення: 15.05.2026.

4. Бондарчук А. П., Складанний П. М., Жебка В. В., Стражніков А. А. Оптимізація системи зарядки електромобілів на основі методів дослідження операцій. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2024. DOI: 10.31673/2412-4338.2024.038693.

5. Грашт Р., Матейчик П. В. Комплексна методика керування розвитком мережі зарядних станцій. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2024. № 3. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2024.3.40.

6. Mitikiri S. B., Babu K. V. S. M., Dwivedi D., Srinivas V. L., Chakraborty P., Yemula P. K., Pal M. Modelling of the Electric Vehicle Charging Infrastructure as Cyber Physical Power Systems: A Review on Components, Standards, Vulnerabilities and Attacks [Electronic resource]. 2023. URL: https://arxiv.org/abs/2311.08656. Дата звернення: 15.05.2026.

7. Alcaraz C., Cumplido J., Triviño A. OCPP in the spotlight: threats and countermeasures for electric vehicle charging infrastructures 4.0. International Journal of Information Security. 2023. Vol. 22. P. 1395–1421. DOI: 10.1007/s10207-023-00698-8.

ДЕМБІЦЬКИЙ Валерій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, Луцький національний технічний університет, e-mail: valerii.dembitskyi@lutsk-ntu.com.ua

БОЯРСЬКИЙ Назарій Романович, *аспірант кафедри автомобільного транспорту, Луцький національний технічний університет, e-mail:* boyarskyy_12972248@lutsk-ntu.com.ua

УДК 656.051

Ю.Ю. Євчук, Ю.Я. Ройко, Ю.М. Лубенець
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЧИННИКІВ, ЯКІ ОБУМОВЛЮЮТЬ РЕЖИМИ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ПРІОРИТЕТУ ДЛЯ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Актуальною проблемою на сьогодні залишається забезпечення пріоритетного проїзду громадським транспортом найбільш завантажених ділянок вулично-дорожньої мережі. Поряд з цим існує велике різноманіття науково-прикладних підходів та методів щодо забезпечення такої пріоритизації. Загалом їх розділяють на дві основні групи – часова пріоритизація, яка забезпечується застосуванням адаптивних алгоритмів управління світлофорною сигналізацією, та просторова пріоритизація, яка забезпечується виділенням спеціальних смуг для руху або поширень перед стоп-лініями виключно для руху громадського транспорту. Застосування того або іншого способу або його різновиду залежить від планувальних особливостей ділянок вулично-дорожньої мережі та показників руху транспортного потоку.

Ключові слова: *громадський транспорт, світлофорне регулювання, світлофорний об'єкт, вулично-дорожня мережа, затримка руху, інтенсивність руху, транспортний потік.*

Ensuring priority passage for public transportation on the busiest sections of the street and road network remains a pressing issue today. At the same time, there is a wide variety of scientific and practical approaches and methods for implementing such prioritization. Generally, these are divided into two main groups: temporal prioritization, achieved through adaptive traffic signal control algorithms; and spatial prioritization, achieved by designating special lanes or extensions beyond stop lines specifically for public transit. The application of one method or another or a variation thereof, depends on the planning characteristics of street network sections and traffic flow indicators.

Keywords: *public transport, traffic light regulation, traffic light object, street and road network, traffic delay, traffic volume, traffic flow.*

Збільшення рівня автомобілізації, недостатній розвиток транспортної інфраструктури, різноманіття конфігурацій вулично-дорожньої мережі, утворення черг на перехрестях та пішохідних переходах, постійна зміна показників транспортної рухливості населення – всі ці чинники обумовлюють необхідність розосередження транспортного потоку у часі та просторі. Це обґрунтовує висновок, що під час управління рухом у сучасному місті неможливо обійтись без використання світлофорних об'єктів, що дозволить підвищити рівень безпеки для усіх учасників дорожнього руху, а також структурувати групи транспортних засобів та пішоходів задля більш впорядкованого пропуску через ділянки вулично-дорожньої мережі.

Облаштування світлофорного об'єкта на локальному перехресті є індивідуальним завданням. Рішення щодо режиму роботи світлофорних груп приймаються на основі врахування низки чинників: конкретних геометричних параметрів проїзної частини (кількості смуг руху, радіусів заокруглення, наявності поздовжнього ухилу тощо), інтенсивності руху транспортних та пішохідних потоків, частки вантажного руху та громадського транспорту, швидкісного режиму на підходах до перехрестя або пішохідного переходу тощо. Окрім цього, значний вплив на режим роботи світлофорного об'єкта має щільність вулично-дорожньої мережі, яка обумовлює відстань між суміжними світлофорними об'єктами. Складним завданням є забезпечення ефективного керування дорожнім рухом, приймаючи окремі локальні рішення. У зв'язку з цим постає необхідність створення системи координації, які складаються із мережі послідовних світлофорних об'єктів, особливо на магістральних вулицях. У вітчизняній інженерній практиці є ряд нормативних документів, якими регламентовано критерії введення світлофорного регулювання та принципи пофазного роз'їзду транспортних засобів, вимоги до вулично-дорожньої мережі залежно від показників транспортного потоку. Так, нормативами регламентується впровадження світлофорного регулювання, виходячи з показників інтенсивності руху транспортних і пішохідних потоків, кількості смуг руху та показників аварійності.

Регламентовані умови введення світлофорного регулювання та облаштування світлофорних об'єктів є досить загальними. Ключовим питанням залишається врахування інтенсивності руху

громадського транспорту, надання йому пріоритетів, нерівномірності руху його учасників, особливо в умовах перевантаженості вулично-дорожньої мережі приватними транспортними засобами.

Принципи сталої міської мобільності передбачають комфортне пересування мешканців територією міста на значні відстані у великих обсягах, які може забезпечити виключно громадський транспорт.

Незважаючи на те, що регламенти з уведення світлофорного регулювання не передбачають окремих алгоритмів врахування специфічних особливостей руху громадського транспорту, нормативами визначено певні особливості щодо облаштування зупинок маршрутного транспорту, виділення спеціальних смуг для його руху за різного дорожньо-транспортного планування. Все це впливає на режим руху транспортного потоку, закономірності зміни його показників, утворення черг, а відтак і на часові параметри світлофорного регулювання. До прикладу, щодо зупинок громадського транспорту, то їх розміщення може бути таким: після проїзду перехрестя (маршрутний транспорт за виключенням трамвая); до перехрестя (для трамваїв); з облаштуванням заїзної «кишені», так і без неї. Поряд з цим спосіб облаштування зупинок громадського транспорту має вплив на рух інших учасників дорожнього руху залежно від планувальних особливостей перехрестя, інтенсивності руху самого громадського транспорту та способу його пропуску ділянками вулично-дорожньої мережі. Під способом пропуску громадського транспорту ділянками вулично-дорожньої мережі розуміється облаштування спеціальних виділених смуг на всій протяжності маршруту або окремих вулицях, або перед перехрестями. Так, нормативами передбачено, що виділена смуга для громадського транспорту обов'язково облаштовується за кількості смуг не менше ніж три в одному напрямку. Також відзначається, що на житлових вулицях за відповідного обґрунтування дозволяється впроваджувати виділені смуги. Проте не наведено жодних умов, за яких таке рішення буде обґрунтованим. Відповідно до цього, за будь-яких умов руху на міських магістралях при певній кількості смуг завжди необхідно передбачати просторовий пріоритет для руху громадського транспорту, незважаючи на жодні показники учасників дорожнього руху, наявність або відсутність світлофорних об'єктів та відстані між ними, швидкість руху тощо. Такі рішення часто можуть лише нашкодити та створити значні транспортні затримки.

Як відзначалось раніше, перехрестя є важливим елементом будь-якої виділеної смуги для громадського транспорту. Невдало сплановане перехрестя або неефективно (з погляду рівня завантаження) розраховані фази на світлофорному об'єкті можуть значно знизити пропускну здатність маршрутної мережі. Рішення щодо оптимізації роботи системи регульованих перехресть може значно підвищити її ефективність. Мета проектування мережі регульованих перехресть з урахуванням виділених смуг для громадського транспорту полягає в тому, щоб:

– мінімізувати затримки на виділених смугах для громадського транспорту;
– підвищити безпеку руху і покращити доступність пішоходів до зупинок;
– мінімізувати затримки для загального транспортного потоку.

На виділених смугах з невеликою кількістю рухомого складу громадського транспорту, відносно невеликою кількістю пасажирів і великою кількістю перехресть, світлофорне регулювання може бути однією з основних причин виникнення затримок у маршрутній мережі. Під час проектування виділених смуг для громадського транспорту часто значна увага приділяється зменшенню тривалості затримки сигналу і ґрунтується на різноманітності способів пріоритизації.

З метою уникнення цих загальних проблем мережі різні методики використовують такі підходи для розв'язання локальних проблем на перехрестях:

1. Визначення існуючих місць накопичення транспортних засобів і пошук вирішення з використанням стандартних практик проектування.
2. Спрощення маршрутної мережі та структури виділених смуг для громадського транспорту.
3. Управління світлофорними сигналами на основі розрахунку прогнозованої затримки в новій маршрутній мережі.
4. Застосування максимальних обмежень кількості поворотів транспортних засобів загального транспортного потоку на виділених смугах для громадського транспорту.
5. Обґрунтування рішень щодо організації поворотного руху на виділених смугах для громадського транспорту за умови, коли обмеження поворотів є нераціональним або їх неможливо уникнути, виходячи з планувальних особливостей вулично-дорожньої мережі.
6. Оптимізація розташування зупинок громадського транспорту.

7. Оптимізація проектування перехресть та пішохідних переходів і розрахунок фаз світлофорного регулювання.

8. Визначення способу пріоритизації громадського транспорту за критеріями мінімізації витрат часу на переміщення вулично-дорожньою мережею всіма її користувачами.

Після визначення базової структури маршрутної мережі необхідне бачення ймовірної зміни транспортної рухливості на ній. Для цього слід провести ґрунтовний аналіз, щоб визначити, чи або як утворюватимуться затримки на виділеній смузі для громадського транспорту за умови збереження існуючих фаз регулювання на перехресті та розподілу транспортних засобів загального транспортного потоку вздовж цієї виділеної смуги. Також необхідно проаналізувати кожне перехрестя з виділеними смугами для громадського транспорту.

Загальна затримка на всіх світлофорних об'єктах мережі, де є виділені смуги для громадського транспорту, пов'язана з двома окремими явищами. Перше, затримка, спричинена сигналами світлофора, – це проста затримка, яка виникає через значну кількість транспортних засобів, які використовують виділену смугу для громадського транспорту (рухомий склад громадського транспорту та транспортні засоби загального транспортного потоку, які здійснюють повороти), що пов'язано з пропускною здатністю перехрестя. Друге, затримки можуть виникати у зв'язку з тимчасовим скупченням громадського транспорту.

Якщо у системі вже враховано право пріоритетного проїзду громадського транспорту уздовж певного коридору, а під час проектування фаз обмежено повороти, тоді громадський транспорт на виділеній смузі отримає перевагу від більшої (лише для нього) тривалості дозвільного сигналу. Після цього пропускна здатність регульованого перехрестя для громадського транспорту стане дуже високою (часто понад 200 од/год), що перевищує необхідний рівень для більшості виділених смуг.

На рисунках 1–3 наведено результати моделювання залежно від тривалості заборонного сигналу на світлофорному об'єкті для виділеної смуги таких показників: середньої затримки одного транспортного засобу громадського транспорту (ТЗ ГТ) у виділеній смузі перед стоп-лінією (рис. 1); тривалості очікування, пов'язаної з величиною черги на виділеній смузі (рис. 2); загальної затримки на виділеній смузі (рис. 3). Моделювання проводилося за таких початкових параметрів: однорядна виділена смуга для громадського транспорту на напрямку; тривалість світлофорного циклу 80 с; інтенсивність руху громадського транспорту на виділеній смузі – 200 фактичних од/год. До того ж, під час процесу моделювання виставлялись такі обмеження:

– з виділеної смуги руху не здійснювався проїзд правоповоротних потоків, суміщених з пішохідними потоками попутного напрямку;

– тривалість фаз регулювання на всіх регульованих перехрестях, якими прокладена виділена смуга, була різною;

– моделювання проводилось для всієї протяжності вулиці.

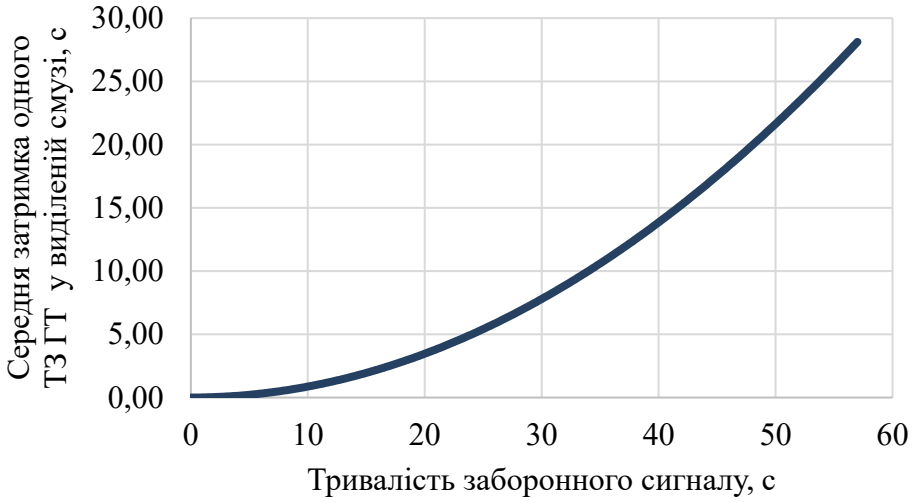


Рис. 1. Результати моделювання середньої затримки одного ТЗ ГТ у виділеній смузі перед стоп-лінією



Рис. 2. Результати моделювання тривалості очікування, пов’язаної з величиною черги на виділеній смузі

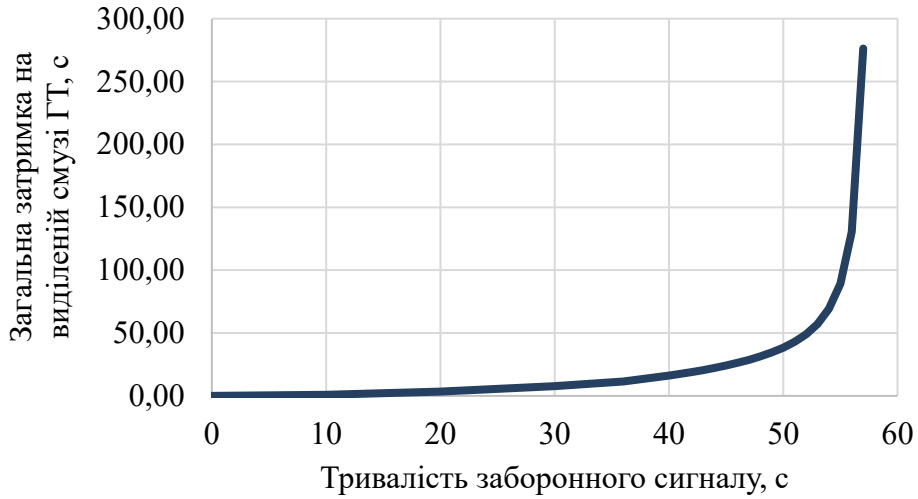


Рис. 3. Результати моделювання загальної затримки на виділеній смузі

Отже, затримка на регульованих перехрестях залежить від частки заборонного сигналу на напрямку у структурі світлофорного циклу. Загалом найкритичнішим, з погляду тривалості очікування та затримки громадського транспорту на виділеній смузі, є його величина 45-50 с.

ЄВЧУК Юрій Юрійович – д-р філософії, старший викладач кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: yurii.y.yevchuk@lpnu.ua

РОЙКО Юрій Ярославович – к.т.н., доцент, директор інституту механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: yurii.y.roiko@lpnu.ua

ЛУБЕНЕЦЬ Юрій Михайлович – аспірант кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: yurii.lubenets.asp.2025@lpnu.ua

YEVCHUK Yurii – PhD, Senior Lecturer, Department of Transport Technologies, Lviv Polytechnic National University, e-mail: yurii.y.yevchuk@lpnu.ua

ROYKO Yuriy – PhD, Associate Professor, Head of the Institute of Mechanical Engineering and Transport, Lviv Polytechnic National University, e-mail: yurii.y.roiko@lpnu.ua

LUBENETS Yurii – postgraduate student, Department of Transport Technologies, Lviv Polytechnic National University, e-mail: yurii.lubenets.asp.2025@lpnu.ua

УДК 621.43
UDK 621.43

Захарчук В.І., Захарчук О.В., Ципящук А.Л.
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕОБЛАДНАНОГО З ДИЗЕЛЯ ГАЗОВОГО ДВИГУНА НА ПРОПАН-БУТАНІ

Пропан-бутан має низку переваг у порівнянні з природним газом для використання в автомобільній техніці. Було проведено переобладнання дизельного двигуна Д-243 у газовий двигун з іскровим запалюванням, адаптований для роботи на пропан-бутані за аналогічною технологією, яка застосовується для природного газу. При цьому ступінь стиску двигуна було знижено до 11 одиниць. Результати стендових випробувань підтвердили працездатність переобладнаного двигуна на пропан-бутані. Потужність газового двигуна залишилася на рівні базового дизельного аналога, хоча годинна витрата палива дещо збільшилась через використання багатших паливоповітряних сумішей під час роботи.

Ключові слова: *дизель, переобладнання, пропан-бутан, газове паливо, витрата палива, екологічні показники.*

Propane–butane has a number of advantages compared to natural gas for use in automotive applications. A diesel engine D-243 was converted into a gas engine with spark ignition, adapted to operate on propane–butane using a technology similar to that applied for natural gas. At the same time, the engine compression ratio was reduced to 11. Bench test results confirmed the operability of the converted engine running on propane–butane. The power of the gas engine remained at the level of the base diesel counterpart, although the hourly fuel consumption increased slightly due to the use of richer air–fuel mixtures during operation.

Keywords: *diesel engine, conversion, propane–butane, gaseous fuel, fuel consumption, environmental performance.*

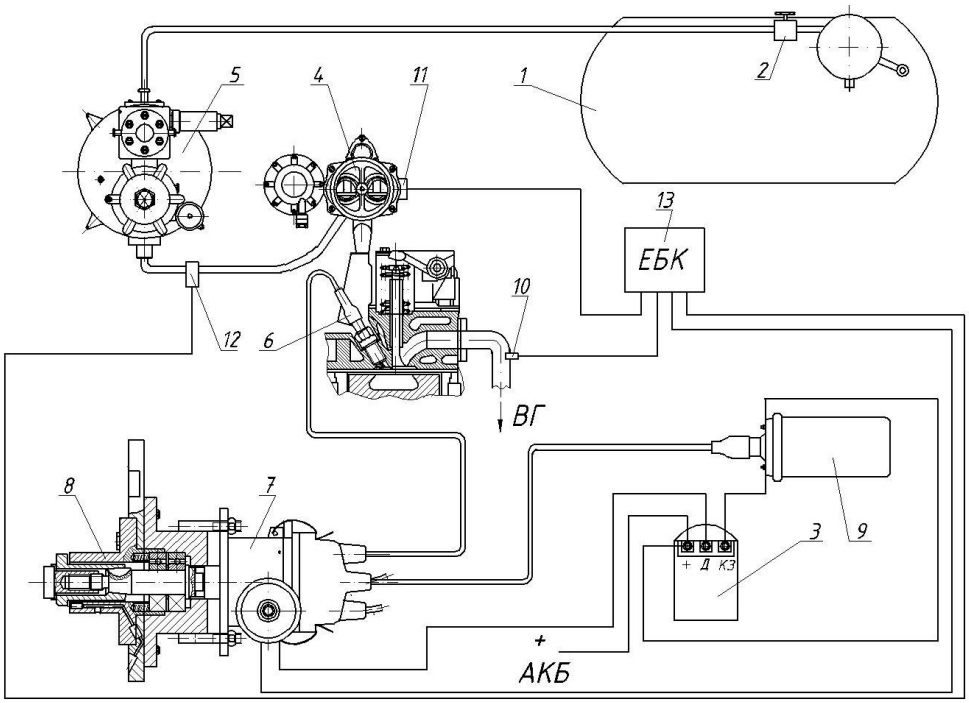
У європейському контексті запланованого переходу до нульового вуглецевого майбутнього початковим питанням на початку цього дослідження була оцінка енергетичних та екологічних показників модернізованого дизельного двигуна, перетвореного на іскрове запалювання, використовуючи два газоподібних палива: природний газ (NG) та зріджений вуглеводневий газ (LPG).

Природний газ (NG) – це суміш компонентів, що в основному складаються з метану (CH_4), з різною кількістю інших газів, таких як етан, пропан, бутан, азот, а також вуглекислий газ. Це одне з найбільш широко використовуваних і універсальних джерел енергії в світі, з численними додатками, такими як промислове, транспортне і побутове. Використання NG як палива для сталого автомобільного транспорту завжди привертало увагу як потенційна альтернатива традиційним бензиновим та дизельним паливам [1].

Результати цього експериментального дослідження підтверджують корисність розробки двигуна виключно для NG або LPG, тобто двигуна з іскровим запалюванням. Отже, це дослідження також може сприяти підтримці автомобільної промисловості для вивчення екологічних переваг цих газоподібних видів палива.

У лабораторії двигунів внутрішнього згоряння Луцького національного технічного університету проведено модернізацію дизельного двигуна Д-243, встановленого на випробувальному стенді, з перетворенням його в газовий двигун з іскровим запалюванням. Роботи виконані згідно зі схемою, яка показана на рис. 1 [2]. У ході переобладнання було демонтовано систему дизельного живлення, замість якої встановлено електронну безконтактну систему запалювання. На місці форсунок змонтовано свічки запалювання, а паливний насос високого тиску замінено на переривач-розподільник. Додатково була встановлена газова паливна апаратура, що включає газовий редуктор і газоповітряний змішувач. Змішувач інтегровано у новий впускний колектор, виготовлений спеціально для цього завдання. Для адаптації двигуна до роботи на суміші пропан-бутану ступінь стиску було зменшено з 16 до 11 одиниць, враховуючи октанове число цього виду палива. На завершальному етапі була здійснена настройка двигуна: визначений оптимальний кут випередження

запалювання та точно відрегульований склад газоповітряної суміші для забезпечення ефективної та стабільної роботи двигуна.



1 – балон; 2 – магістральний вентиль; 3 – комутиатор; 4 – газоповітряний змішувач; 5 – газовий редуктор; 6 – свічка запалювання; 7 – переривач-розподільник; 8 – привід переривача-розподільника; 9 – котушка запалюваннія; 10 – датчик вільного кисню; 11 – датчик положення дросельної заслінки; 12 – крокавий дозатор; 13 – електронний блок керування

Рисунок 1 – Об'єднана схема систем запалювання і живлення газового двигуна

У результаті стендових випробувань були визначені навантажувальні характеристики двигуна з одночасним вимірюванням рівня токсичності відпрацьованих газів. Аналіз отриманих характеристик показав, що вміст оксиду вуглецю (CO) у відпрацьованих газах газового двигуна на малих і середніх навантаженнях майже не відрізняється від дизельного двигуна. На великих навантаженнях (потужність двигуна понад 25 кВт) концентрація CO у газового двигуна трохи вища і становить до 0,5 %. Концентрація вуглеводнів у відпрацьованих газах газового двигуна на малих і середніх навантаженнях перевищує дизельний аналог до 180 млн$^{-1}$. Натомість на великих навантаженнях цей показник для газового двигуна є нижчим. Варто зазначити, що у відпрацьованих газах газового двигуна повністю відсутня сажа, тоді як у дизеля її кількість суттєва. Номінальна потужність газового двигуна зросла з 40 кВт до 41,5 кВт, що можна пояснити високими енергетичними властивостями пропан-бутану. Погодинна витрата палива в газового двигуна на малих і середніх навантаженнях вища на приблизно 1 кг/год, що пов'язано з роботою на більш багатих паливоповітряних сумішах. Проте на великих навантаженнях витрата газу фактично дорівнює витраті дизельного палива.

Що стосується майбутньої роботи, на основі отриманих результатів, перерахованих вище, планується дослідження ощадливої роботи для подальшого поліпшення енергетичних та екологічних показників прототипу; оцінка використання системи очищення вихлопних газів газового двигуна (каталітичний нейтралізатор); оцінка пускових властивостей та повної продуктивності навантаження.

1. Arslan E., Kahraman N. Comparison of natural gas and propane addition to combustion air in terms of engine performance in compression ignition engine. Fuel. 2022. Vol. 312. Article 122952. DOI: 10.1016/J.FUEL.2021.122952.

2. Захарчук В.І., Захарчук О.В., Швабюк В.В., Ярощук В.В. Переобладнання дизеля для роботи на пропан-бутані. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2025. № 1 (24). С. 209–215.

ЗАХАРЧУК Віктор Іванович – д.т.н., професор кафедри автомобілів і транспортних технологій, ЛНТУ, e-mail: victavto@gmail.com.

ЗАХАРЧУК Олег Вікторович – к.т.н., доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, ЛНТУ, e-mail: Zaharchukov205@gmail.com.

ЦИПЯЩУК Андрій Лукич – аспірант кафедри автомобілів і транспортних технологій, ЛНТУ, e-mail: andriy.cypa@gmail.com

Victor ZAKHARCHUK – Doctor of Science in Engineering, Professor of Motor Cars and Transport Technologies, LNTU, e-mail: victavto@gmail.com.

Oleg ZAKHARCHUK – PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies, LNTU, e-mail: Zaharchukov205@gmail.com.

Andrii TSYPYASHCHUK – postgraduate of Motor Cars and Transport Technologies, LNTU, e-mail: andriy.cypa@gmail.com

УДК 543.271.3

Наталія Миколаївна Защепкіна, Ігор Владиславович Приміський
Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИМІРЮВАЧ ДИМНОСТІ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Анотація

Розглянуто нормативну правову базу застосування вимірювачів димності (димомірів) відпрацьованих газів дизельних двигунів. Проаналізовані дані щодо викидів забруднюючих речовин з відпрацьованих газів дизельних і бензинових двигунів, методи вимірювання димності «Bosch», «Hartridge», проблеми нестабільності коефіцієнта перетворення димоміра в цілому внаслідок старіння оптичних елементів схеми, впливу температури і вологості у вимірювальній камері.

Розглянуто вдосконалену нову структурну схему димоміра, яка компенсує старіння елементів оптичної схеми димоміра під дією високотемпературного високотоксичного відпрацьованого газу дизельного двигуна, функціональну схему побудови димоміра, наведені технічні характеристики. Розроблені схеми забезпечують інваріантність вимірювання димності від дестабілізуючих факторів, відхилення коефіцієнта перетворення димоміра від номінального значення. Експериментальні дослідження показали, що основна приведена похибка вимірювань димоміра знижується з 2% до 0,5%. Наведено метрологічне забезпечення сучасних вимірювачів димності.

Ключові слова: димомір, вимірювання, коефіцієнт перетворення, оптичний фільтр, похибка.

Annotation

The regulatory legal framework for the use of smoke detectors (smoke detectors) of exhaust gases of diesel engines is considered. Analyzed data on emissions of pollutants from the exhaust gases of diesel and gasoline engines, "Bosch", "Hartridge" smoke measurement methods, problems of instability of the conversion coefficient of the smoke meter as a whole as a result of the aging of the optical elements of the temperature and humidity influence scheme in the measuring chamber. An improved new structural scheme of the smoke meter, which compensates for the aging of the elements of the optical scheme of the smoke meter under the influence of high-temperature, highly toxic exhaust gas of a diesel engine, the functional scheme of the construction of the smoke meter, and technical characteristics are considered.

The developed schemes ensure the invariance of smoke measurement from destabilizing factors, the deviation of the conversion coefficient of the smoke meter from the nominal value. Experimental studies have shown that the main reduced measurement error of the smoke meter is reduced from 2% to 0.5%. The metrological support of modern smoke detectors is presented.

Keywords: smoke meter, measurement, conversion factor, optical filter, error.

Німецький винахідник Рудольф Дизель в 1892 р. розробив принцип роботи дизельного двигуна, якому не потрібні свічки запалювання, як в класичному бензиновому двигуні внутрішнього запалювання, а паливо запалюється від нагрітого повітря. Нагрівання повітря відбувається від поршня, який стискає повітря, для його стрибкоподібного нагріву в циліндрі, куди надходить (впорскується) через форсунки розпилене паливо, паливо взаємодіє з нагрітим повітрям. Паливо загоряється, створює енергію, яка штовхає поршень циліндра вниз і передає енергію колінчастому валу двигуна, і далі цикл повторюється. Потужність дизельного двигуна напряму залежить від ступеня стиснення повітря. На відміну від бензинового ДВС паливна суміш в дизельному двигуні утворюється прямо в циліндрі.

Дизельні двигуни мають ряд переваг перед бензиновими ДВС з свічками запалювання, вони більш економічні на 20-30%, простіші в експлуатації. Дизельні двигуни знайшли широке розповсюдження в автотранспортних засобах: вантажівки, легкові автомобілі, автобуси, будівельних, дорожніх машинах: грейдери, екскаватори, котки, сільськогосподарській техніці: трактори,

комбайни, сіялки; військовій техніці; різноманітних насосах газів і рідин; дизель-генераторів для виробляння електричної енергії і т.д. Якщо взяти порівняльні дані щодо викидів забруднюючих речовин з відпрацьованих газів дизельних і бензинових двигунів, Таблиця 1, то видно, що загалом на 1 кг спаленого палива дизельний двигун фактично викидає на порядок менше шкідливих речовин: оксиду вуглецю (CO), вуглеводнів (C_nH_m), оксидів азоту (NO_x), але майже в 10 разів більше викидається твердих суспендованих частинок – сажі [1]. Головна небезпека сажі, що розвинені поверхні сажевих частинок досягають значних розмірів, 1 г сажі має сумарну поверхню 75 $м^3$ [2]. Утворення сажі являє собою процес термічного розкладу палива. Загалом тверді частинки складаються із сажі, золи, сульфатів, абразивно зносних частинок. Детально механізми утворення сажових частинок розглянуто у відповідних дослідженнях зарубіжних і вітчизняних розробників [2,3,4]. Таким чином, збільшення кількості автомобілів з дизельними двигунами приводить до збільшення забруднення довкілля, тому контроль димності у відпрацьованих газах дизелів є міжнародною проблемою, відповідно є міжнародні національні стандарти, які регламентують норми димності [5.6]. Контроль викидів ТСЧ виконується за допомогою спеціальних засобів вимірювальної техніки – вимірювачів димності (димомірів).

Аналіз і постановка задачі

Згідно українського стандарту [6]:

- димність відпрацьованих газів двигуна автомобіля – показник, який характеризує ступінь поглинання світлового потоку, що просвічує відпрацьовані гази двигуна автомобіля;
- натуральний показник ослаблення світлового потоку K, $м^{-1}$ (absorption coefficient) – величина, обернена товщині шару відпрацьованих газів, проходячи який потік випромінювання від джерела світла димоміра ослаблюється в e разів;
- коефіцієнт ослаблення світлового потоку N, % – ступінь ослаблення світлового потоку внаслідок поглинання і розсіювання світла відпрацьованими газами під час проходження ними робочої труби димоміра.

Відомий метод вимірювання димності – метод «Bosch», у якому визначається ступінь почорніння спеціального білого фільтрувального паперу, коли через нього прокачують визначений об'єм проби відпрацьованого газу. Градуювання шкали димоміра виконується фотоколориметром із застосуванням стандартних зразків. Метод трудомісткий, який не можна застосовувати в режимі вільного прискорення дизельного двигуна, тому згаданий метод «Bosch» має обмежене застосування.

Згідно вимог міжнародних стандартів [6,7,8] вимірювачі димності (димоміри) повинні бути побудовані на вимірювання ступеня поглинання відпрацьованими газами світлового потоку, визначеної довжини хвилі світла, в фіксованій частині спектру. Так званий метод «Hartridge». При такій побудові димоміра для вимірювання ступеня поглинання відпрацьованими газами світлового потоку довжини хвилі світла, виникають проблеми нестабільності коефіцієнта перетворення димоміра в цілому внаслідок старіння оптичних елементів схеми (джерело і приймач випромінювання, лінзи, віддзеркалювачі), впливу температури і вологості у вимірювальній камері. Виникає необхідність вдосконалення структурної схеми димоміра для стабілізації коефіцієнта перетворення димоміра. Димність відпрацьованих газів дизельного двигуна залежно від типу палива і конструкції наведені в таблиці 1 [6].

Таблиця 1 – Нормативи димності

Автомобілі	Гранично допустимий показник ослаблення світлового показника, $К_{доп}$, $м^{-1}$	Гранично допустимий коефіцієнт ослаблення світлового потоку, $N_{доп}$, %
Автомобілі з дизелями - без наддуву	2,5	66
- з наддувом	3,0	73
Автомобілі з газодизелями: - без наддуву	1,7	52
- з наддувом	2,0	58

Димність дизельних двигунів визначають за показником (коефіцієнтом) ослаблення світлового потоку, при поглинанні відпрацьованими газами світлового потоку випромінювання від

джерела випромінювання світла (що утворює паралельний пучок) у вимірювальній камері димоміра використовуються дві системи одиниць вимірювання димності [6]:

– натуральний показник (коефіцієнт) поглинання K, м$^{-1}$;

– лінійний показник (коефіцієнт) поглинання N, %.

Натуральний показник (коефіцієнт) поглинання K, м$^{-1}$ **(**light absorption coefficient or absorption coefficient) величина, обернена товщині шару відпрацьованих газів, проходячи потік випромінювання від джерела світла димоміра ослаблюється в ***e*** разів:

(1)

де: Φ - світловий потік від джерела світла димоміра, який фіксує фотоприймач після проходження світлового потоку через відпрацьовані гази у вимірювальній камері димоміра;

Φ_o - світловий потік від джерела світла димоміра, який фіксує фотоприймач після проходження потоку крізь чисте повітря у вимірювальній камері димоміра, незаповненій відпрацьованими газами.

Лінійний показник (коефіцієнт) поглинання N, % (linear absorption coefficient or opacity) вимірює ступінь ослаблення потоку випромінювання у % від джерела світла димоміра на відстані, що дорівнює ефективній фотометричній базі димоміра, внаслідок поглинання і розсіювання світла відпрацьованими газами у вимірювальній камері димоміра:

$$N = 100 \times \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_o}\right). \qquad (2)$$

Залежність натурального показника поглинання K від лінійного показника N наведена на рис. 1, числова перерахункова таблиця K в N наведена у додатку до ДСТУ 4276-04 [6].

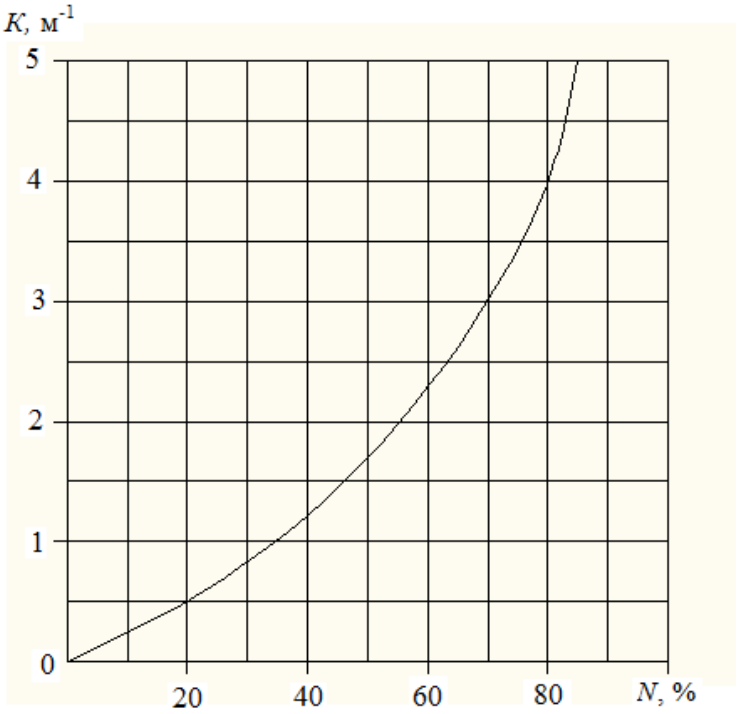


Рис. 1 – Залежність між натуральним показником ослаблення світлового потоку K і коефіцієнтом ослаблення світлового потоку N

Перерахунок значень N в K здійснюється за формулою [3]:

(3)

де К – натуральний показник ослаблення світлового потоку, м$^{-1}$; L – ефективна база димоміра, м; N – коефіцієнт ослаблення світлового потоку, %.

З метою уніфікації результатів контролю димності на міждержавному рівні стандарти жорстко фіксує вимоги до технічних, метрологічних параметрів вимірювачів димності. Основні вимоги до конструкції димомірів представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Основні вимоги до конструкції димомірів

№	Основні блоки димоміра	Технічні вимоги до блоків димоміра
1	Джерело випромінювання	Лампа розжарювання з температурою випромінювання в інтервалі від 2800 К до 3250 К (відповідно до стандарту CIE S 001) або зелений світлодіод з амплітудою спектра в інтервалі від 550 нм до 570 нм.
2	Приймач випромінювання	Фотоприймач (фотодіод), при необхідності із світлофільтром). При цьому характеристика спектральної чутливості фотоприймача повинна бути подібною до характеристики максимальної чутливості людського ока у діапазоні від 550 нм до 570 нм, менше ніж 4 % від максимальної чутливості, при довжині хвилі світлового потоку менше ніж 430 нм і більше ніж 680 нм.
3	Вимоги до конструктивного виконання і схеми вимірювача димності	Конструкція вимірювача димності повинна забезпечувати: - паралельність ліній світлового потоку, допускається кутове відхилення світлового потоку від оптичної осі не більше ніж 3°; - відсутність впливу на фотоприймач прямого або відбитого світлового випромінювання з кутом нахилу світлового потоку до оптичної осі більше ніж 3°. - регулювання електричних характеристик джерела випромінювання і приймача випромінювання для можливості встановлення нульового показу на шкалі вимірювача димності випадку, при проходженні світлового потоку через зону вимірювання, заповнену чистим повітрям – калібрування нуля шкали; - передбачити можливість індикації показників з від'ємним знаком і показників за верхньою межею вимірювальної шкали; - необхідно передбачити можливості перевіряння вимірювача димності з застосуванням екрану або світлофільтру з нейтральною оптичною густиною, встановлений перпендикулярно світловому променю, при димності відпрацьованих газів у межах від 15 % до 80 % повної шкали, відомої з похибкою не більше ±1 % при вимірюванні димності.
4	Вимірювальні перетворювачі в вимірювальній камері	Вимірювач димності повинен мати первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП) для вимірювання параметрів в вимірювальній камері, зазначені нижче: 1) Тиск відпрацьованих газів на вході вимірювальної камери або у вимірювальній камері; 2) Температура в точці контролю, заданій виробником як точка для вимірювання температури відпрацьованих газів; 3) Тиск продувального повітря (якщо необхідно); 4) Температура відпрацьованих газів перед перепускним клапаном (якщо перепускний клапан передбачений); 5) Напруга електроживлення лампи джерела світла (напруга не контролюється, якщо використовується зелений світлодіод); 6) Вихідний сигнал приймального пристрою (наприклад, сигнал, пропорційний димності відпрацьованих газів).

Міжнародні вимоги до технічних, метрологічних характеристик вимірювачів димності, з одного боку, уніфікують вимоги до конструкції, технічних і метрологічних характеристик вимірювачів димності і забезпечують єдність вимірювань відпрацьованих газів дизельних двигунів в більшості країн, з іншого боку, обмежують можливості розробників, конструкторів вимірювачів димності у можливості поліпшити метрологічні характеристики вимірювачів димності, бо досить складно обійти усі вищенаведені вимоги до схеми і конструкції вимірювачів димності.

Основним недоліком відомого методу є інструментальна похибка вимірювання, яка виникає внаслідок дії високотоксичного відпрацьованого газу дизеля на оптичні елементи вимірювача димності: джерел випромінювання, лінз, віддзеркалювачів, фотоприймача, тобто виникає штучне старіння згаданих оптичних елементів, і, як наслідок, виникає залежність результату вимірювання від зміни (коливань) коефіцієнта перетворення вимірювача димності, знижується чутливість, збільшується похибка вимірювань вимірювачів димності.

Виклад основного матеріалу

Типова структурна схема оптичного димоміра представлена на рисунку 2. Відпрацьовані гази дизельного двигуна надходять у вимірювальну камеру димоміра. З торців камери один навпроти одного розташовані джерело і приймач потоку світла (фотодіод). Відстань між джерелом випромінювання і приймачем світла фотометрична, нормована – 0,43 м. Джерело випромінювання та світлодіода повинні мати спектральну характеристику, відповідну кривій людського ока в інтервалі від 430 до 680 нм. Залежно від непрозорості диму – димності проби зменшується ступінь проходження світла, який попадає на фотодіод. Сигнал фотодіода, пропорційний ступеню поглинання однорідного за щільністю диму, визначає концентрацію димності дизельного двигуна.

Конструктивно оптичні елементи схеми захищені від забруднень примусовим обдувом джерела і приймача за допомогою повітря, яке подається через спеціальний клапан.

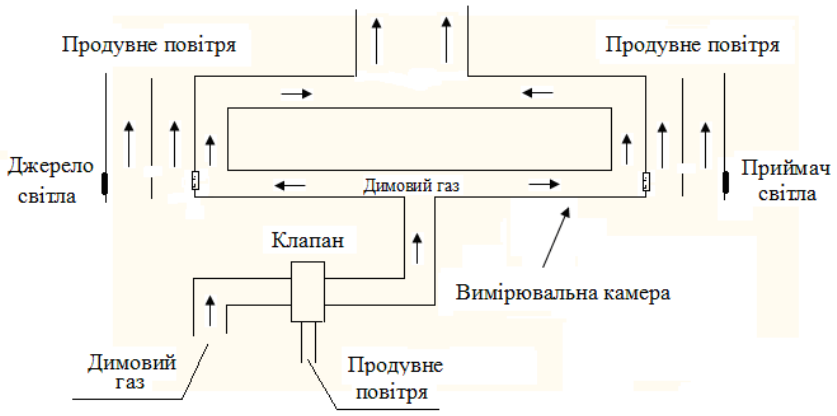


Рис. 2 – Структурна схема димоміра

Метод просвічування використовується у димомірах: ІНА-109, ИДП-2 (Україна), а також зарубіжних: Бош моделі RTT 100/100 (Німеччина), димомір Opacilit 1020 (Німеччина), 409, 435, 437 фірми AVL (Австрія) [2,4]. Робота схеми суттєво залежить від старіння елементів оптичної схеми, які постійно знаходяться під дією високотоксичного відпрацьованого газу дизельного двигуна з температурами вище 200 °С. Коефіцієнт перетворення оптичної схеми димоміра має тенденцію до змін, коливань від номінальних значень, нестабільності і відповідно збільшення похибки вимірювань димоміра. З метою зменшення розмірів і габаритів димомірів окремі виробники застосовують дзеркала або розрахунковим методом результат вимірювань приводять до фотометричної бази 0,43 м. У димоміра МЕТА – 01МП фотометрична база дорівнює 0,215 м, а приведення її до нормованого значення – 0,43 м, відбувається розрахунковим методом, шляхом використання мікропроцесора, який за заданою програмою перераховує результат вимірів до бази 0,43 м (рисунок 2) [2,4]. Принцип роботи приладу оснований на вимірюванні величини поглинання світлового потоку в вимірювальній камері димоміра і врахування температури відпрацьованого газу [2]. Димомір виконаний у вигляді переносного пристрою, що складається з вимірювальної камери, оптичних елементів, пробозабірника, мікропроцесора. У вимірювальній камері 5 розташований термодатчик 7, призначений для вимірювання температури дизельних газів. Лінза 2 формує потік випромінювання джерела випромінювання лампи 1, світлофільтр забезпечує спектральні властивості оптичної пари джерело – приймач випромінювання, відповідні чутливості людського ока. Захисні шторки – діафрагми 6 створюють захист оптичних елементів від забруднення сажею. Вимірювальні сигнали від температурного датчика 7 і з фотоприймача 3 надходять на аналогові входи мікропроцесора 8, де виконується обробка вимірювальних сигналів відповідно до програми, яка записана в ПЗУ мікропроцесора. Дані вимірювань і супровідна інформація транслюються на дисплеї 9 і на принтері

10. Живлення димоміра здійснюється від акумуляторної батареї 11. У приладі реалізується: автоматична фіксація і зберігання амплітудних значень димності в циклі випробувань двигуна, вибору чотирьох останніх значень, обчислення середнього значення; автоматична реєстрація і зберігання результатів вимірювання димності в режимі максимальної частоти обертання валу дизельного двигуна; вимірювання, автоматична корекція результатів за температурою дизельних газів; виведення результатів вимірювання димності у вигляді протоколу на принтер або в базу комп'ютера.

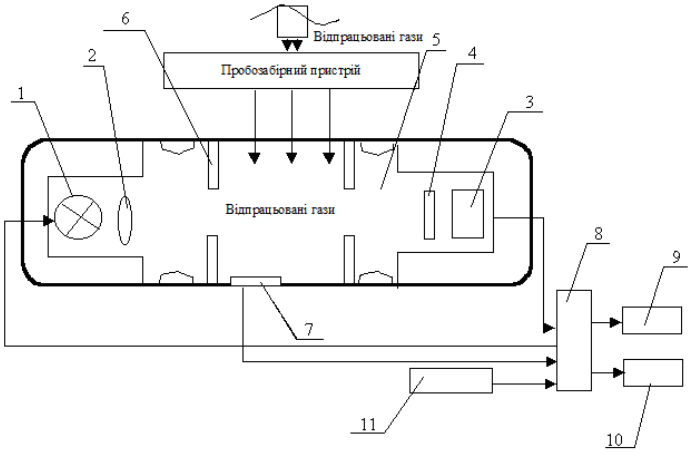


Рис. 3 – Схема функціональна вимірювача димності відпрацьованих газів МЕТА-01МП: 1 – лампа розжарювання; 2 – лінза; 3 – фотоприймач; 4 – світлофільтр; 5 – вимірювальна камера; 6 – захисні шторки – діафрагми; 7 – датчик температури; 8 – мікропроцесор; 9 – дисплей; 10 – принтер; 11 – акумуляторна батарея.

Недоліком типової структурної схеми димоміра є інструментальна похибка вимірювання, яка виникає внаслідок старіння джерел випромінювання, фотоприймача, інших оптичних елементів схеми, тобто виникає залежність результату вимірювання від зміни коефіцієнта перетворення димоміра.

На рис. 4 наведена вдосконалена нова інваріантна структурна схема димоміра, яка компенсує старіння елементів оптичної схеми димоміра під дією високотемпературного високотоксичного відпрацьованого газу дизельного двигуна [9].

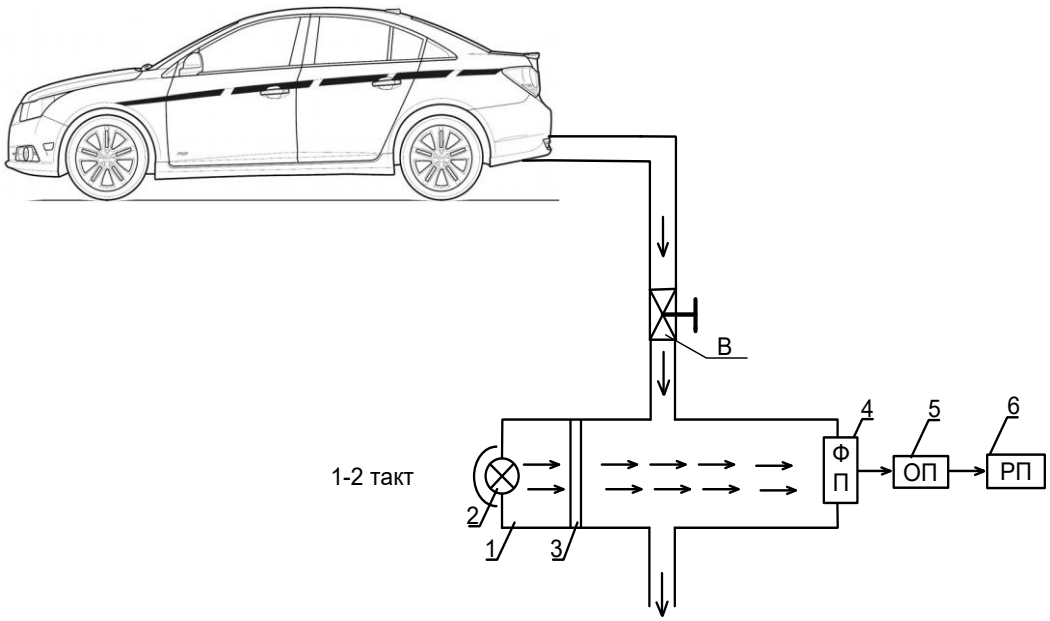


Рис. 4 – Інваріантна структурна схема димоміра з калібрувальним фільтром: 1- вимірювальна камера димоміра, 2- джерело випромінювання, 3- калібрувальний оптичний фільтр затемнення, 4- фотоприймач, 5 – обчислювальний пристрій, 6- реєструючий пристрій, В- вентиль.

В першому такті вимірювання відпрацьований газ з автомобіля в вимірювальній кюветі 1 не подається, вентиль «В» на трубопроводі від вихлопної труби автомобіля до вимірювальної камери 1 димоміра закритий. При цьому проводиться вимірювання поглинання світлового потоку від джерела випромінювання 2 калібрувальним оптичним фільтром 3, який встановлений в вимірювальній камері 1 перпендикулярно світловому потоку від джерела 2.

Світловий потік проходить від джерела 2 через попередньо метрологічно атестований калібрувальний оптичний фільтр затемнення 3 з фіксованим відомим значенням затемнення-X_o.

На фотоприймачі 4 формується електричний сигнал $N_1=KX_0$, пропорційний концентрації X_0 калібрувального оптичного фільтру, де К коефіцієнт перетворення вимірювальної схеми димоміра. Сигнал N_1 надходить до обчислювального пристрою 5, де і фіксується.

У другому, основному вимірювальному роботи димоміра вентиль В відкривається і в вимірювальну камеру 1, де встановлений калібрувальний оптичний фільтр затемнення 3, направляють відпрацьований газ з вихлопної труби автомобіля з концентрацією димності X_1.

В обчислювальному пристрою 5 фіксується результат вимірювання $N_2=K(X_1+X_o)$ – який вимірює рівень ослаблення світлового потоку від джерела випромінювання за рахунок сумарної дії концентрації X_1 димності відпрацьованого газу дизельного двигуна і калібрувального оптичного фільтру 3 з фіксованим значенням затемнення – X_o. Сигнал N_2 надходить до обчислювального пристрою 5. Де вирішується система рівнянь:

(4)

відносно визначення концентрації димності X_1:

$$X_1 = \frac{(N_2 - N_1)\cdot X_0}{N_1} \quad (5)$$

Результат обчислення виводиться на реєструючий пристрій 6.

Модифікація схеми рисунку 4 представлена на рисунку 5 [10]. В структурній схемі по рисунку 4 в вимірювальній камері 1 на поворотній осі 7 встановлюють оптичний калібрувальний фільтр 3.

Оптичний калібрувальний фільтр 3 на поворотній осі 7 може розміщуватись як паралельно світловому потоку від джерела випромінювання 2, тобто калібрувальний фільтр не впливає на проходження від джерела випромінювання 2 до фотоприймача, так і перпендикулярно світловому потоку від джерела випромінювання 3 і повністю поглинати світловий потік від джерела 2.

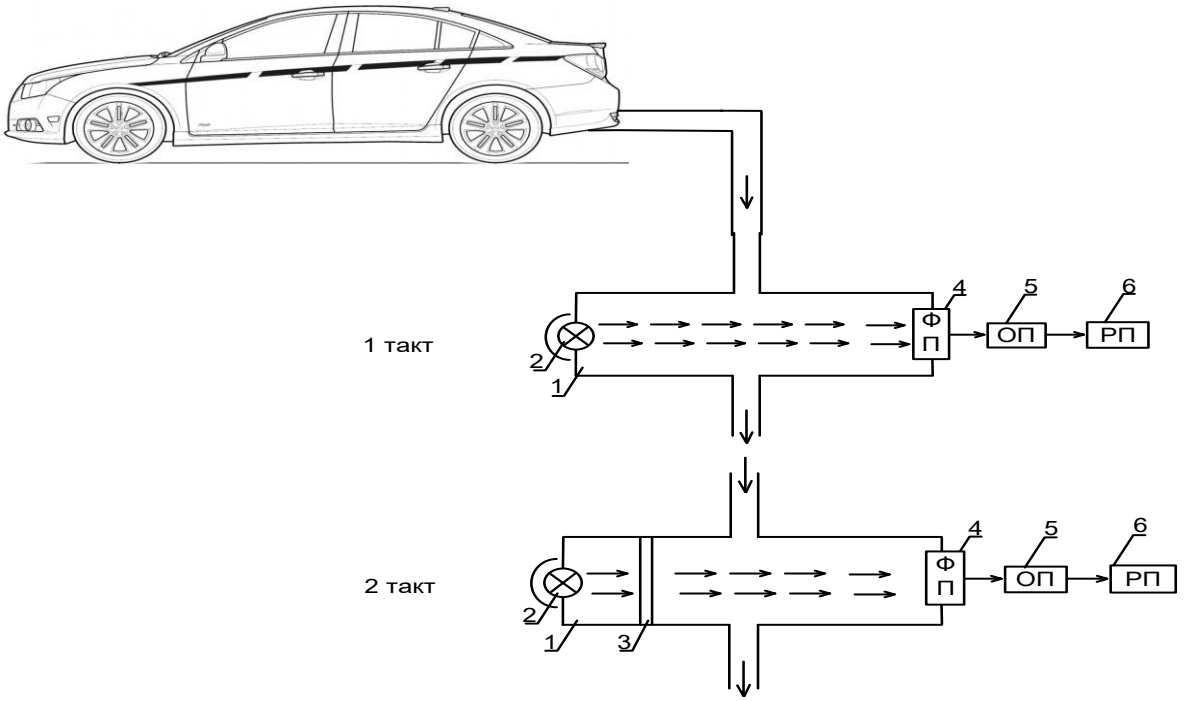


Рис. 5 – Структурна схема димоміра з двома вимірювальними камерами: 1- вимірювальна камера димоміра, 2- джерело випромінювання, 3-фотоприймач, 4 – обчислювальний пристрій, 5- реєструючий пристрій, 6- калібрувальний оптичний фільтр затемнення.

Вимірювання проводять у два такти. В першому такті вимірювання3 оптичний калібрувальний фільтр 3 на поворотній осі 7 розміщується паралельно світловому потоку від джерела випромінювання 2, на відпрацьований газ в вимірювальній кюветі 1 направляється потік світла від джерела випромінювання 2. Світловий потік проходить від джерела 2 через відпрацьований газ. Залежно від концентрації димності X_1 в відпрацьованому газі на фотоприймач (ФП) 4 надходить зменшений світловий потік від джерела випромінювання 2. На фотоприймачі 4 формується електричний сигнал, пропорційний концентрації X_1 димності $N_1=K X_1$, де К коефіцієнт перетворення димоміра, який далі надходить до обчислювального пристрою 5 і фіксується реєстратором 6.

У другому такті вимірювання оптичний калібрувальний фільтр 3 на поворотній осі 7 розміщується перпендикулярно світловому потоку від джерела випромінювання 2. В обчислювальному пристрою 5 фіксують з фотоприймача 3 сигнал $N = K(X_1 + X_o)$. X_1+X_o рівень ослаблення за рахунок сумарної дії в концентрації X_1 димності відпрацьованого газу дизельного двигуна і оптичного калібрувального фільтру 3. Сигнал N_2 надходить до обчислювального пристрою 5, де обчислюється система рівнянь:

(6)

відносно визначення концентрації димності викидів дизельного двигуна X_1:

$$X_1 = \frac{N_1 \cdot N_0}{N_2 - N_1} \qquad (7)$$

При визначенні концентрації X_1 по інваріантним схемам 5 і 6 і відповідно по формулам 5 і 7 відхилення коефіцієнта перетворення К взаємно компенсується.

Висновки

Розглянуті розроблені схеми забезпечують інваріантність вимірювання димності X_1 від дестабілізуючих факторів, відхилення коефіцієнта перетворення К димоміра від номінального значення не приводять до похибки вимірювання. По суті похибка вимірювань димоміра визначається інструментальною похибкою виготовлення і метрологічної атестації калібрувального оптичного фільтру затемнення 3. При цьому зміни коефіцієнта перетворення димоміра внаслідок старіння джерела випромінювання, інших дестабілізуючих чинників: температура, тиск, компенсуються за рахунок використання калібрувального оптичного фільтру і алгоритму обробки результат вимірювання у двох тактах, підвищується точність, зменшується похибка вимірювання.

Експериментальні дослідження показали, що основна приведена похибка вимірювань димоміра знижується з 2% до 0,5% і фактично визначається інструментальною похибкою виготовлення і визначення ступеня затемнення калібрувального оптичного фільтру.

Метрологічне забезпечення для вимірювачів димності відпрацьованих газів являє собою комплекс організаційних та технічних заходів і здійснюється відповідно до «Методики повірки», яка входить в комплект приладу. Основні проблеми метрологічного забезпечення димомірів потребує суттєвого доопрацювання. Насамперед це стосується до визначення ефективної фотометричної бази приладу, від величини якої значно залежить результат вимірювань.

Стандартна методика, що дозволяє визначити відповідність заявленим розробником димоміра величини ефективної фотометричної бази її фактичного значення при вимірюванні димності, відсутня. Спектральна характеристика приладу повіряється за допомогою нейтральних (в діапазоні 400-700 нм) світлофільтрами.

Література

[1] O. Klymenko, V. Ustymenko, K. Kolobov, S. Rychok, M. Gora, N. Naumenko. Analysis of Emissions in the European Driving Cycle of Used LightDuty Vehicles Imported to Europe from North America. SAE International Journal of Sustainable Transportation, Energy, Environment, & Policy, Issue 1 (1), Pages 1- 20, 2019, DOI: 10.4271/13-01-01-0001

[2] Марченко А.П. Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах.

Т. 5. Екологізація ДВЗ [Текст] / За ред. проф. А. П. Марченка та проф. А. Ф. Шеховцева. – Харків: Прапор, 2004.-360с.

[3] Marchenko A.P. Internal combustion engines: A series of textbooks in 6 volumes. Environmentalization [Text] / Ed. prof. A.P. Marchenko and prof. A.F. Shkhovtseva. - Kharkiv: Flag, 2004.- 360p.

[4] О.А.Клименко, В.С.Устименко, К.С.Колобов, С.О.Ричок, М.Д.Гора, Н.О.Науменко. Аналіз результатів досліджень викидів забруднювальних речовин легковими автомобілями, що були в користуванні, та імпортовані в Україну з США. «Автошляховик України», 2019, № 1 (257). – с. 2-11

[5] Гутаревич Ю.Ф. Екологія та автомобільний транспорт [Текст] /Ю.Ф. Гутаревич, Д.В. Зеркалов, А.Г.Говорун, А.О. Корпач, Л.П. Мержиєвська. Навчальний посібник. – К.: Арістей, 2006.- 292с. Gutarevich Y.F. Ecology and road transport [Text] / Y.F. Gutarevich, D.V.Zerkalov, A.G. ovorun, A.O. Korpach, L.P. Merzhievskaya, Tutorial. - K.: Ariste, 2006.- 292p.

[6] ДСТУ UN/ECE R 24-03:2002 Єдині технічні приписи

[7] ДСТУ України 4276:2004 Норми і методи вимірювань димності відпрацьованих газів автомобілів з дизелями або газодизелями

[8] Міжнародний стандарт ISO 3929:2003. Road vehicles – Measurement methods for exhaust gas emissions during inspection or maintenance (Колісні транспортні засоби. Методи вимірювання шкідливих газових викидів під час технічного контролю чи технічного обслуговування /[Текст]/2003The international standard ISO 3929: 2003. Road vehicles - Measuring methods for exhaust gas during inspection or maintenance / / Text / 2003

[9] Приміський І.В. Спосіб вимірювання димності [Текст] Патент України на винахід № 110167, Опубл. 25.11.2015. Бюл. №22. Primís'kiy I.V. Method of measuring smoke [Text] / Patent of Ukraine for invention. №. 110167, Pub. November 25, 2015 art. №. 2

[10] Приміський І.В. Спосіб автоматичного вимірювання димності дизельних двигунів[Текст]/ Патент України на винахід №108827. Опубл 10.06 2015. Бюл. 11, 2015Primís'kiy I.V . The process of automatic visibility of diesel engines [Text] / The patent of Ukraine on wine №108827. It is published on 10.06.2015. art. 11. 2015/

УДК 656.1:614.86

А.В. Йовченко

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ ПАСИВНОЇ БЕЗПЕКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Розглянуто проблему підвищення безпеки вантажних транспортних засобів і причепів шляхом своєчасного виявлення блокування або заклинювання коліс під час руху. Запропоновано конструкцію пристрою для візуального контролю обертання коліс, що дозволяє оперативно виявляти несправності, покращує сприйняття габаритів причепа та підвищує безпеку маневрування. Проведено аналіз сил, що діють на стержень при обертанні колеса, з урахуванням вібраційних, ударних та аеродинамічних навантажень.

Ключові слова: пасивна безпека, вантажний транспортний засіб, причіп, діагностування обертання коліс, міцність.

The problem of increasing the safety of freight vehicles and trailers by timely detection of wheel locking or jamming during movement is considered. The design of a device for visual control of wheel rotation is proposed, which allows for prompt detection of malfunctions, improves the perception of trailer dimensions and increases maneuvering safety. The forces acting on the rod during wheel rotation are analyzed, taking into account vibration, shock and aerodynamic loads.

Keywords: passive safety, freight vehicle, trailer, wheel rotation diagnostics, strength.

ВСТУП.

Сучасні вантажні перевезення вимагають підвищення безпеки та надійності експлуатації транспортних засобів (ТЗ) із причепами та напівпричепами [1–3]. Однією з актуальних проблем є відсутність оперативного контролю технічного стану коліс причепа під час руху, що може призводити до блокування коліс, пошкодження шин, втрати керованості та аварійних ситуацій.

Існуючі системи контролю переважно базуються на електронних датчиках і телеметрії, однак вони є складними, дорогими та потребують електроживлення. Тому актуальним є розроблення простих автономних засобів пасивної безпеки для візуального контролю обертання коліс під час руху [4–5]. Особливо небезпечним є заклинювання гальмівних механізмів за низьких температур, що спричиняє ковзання заблокованого колеса, інтенсивне зношення шин та ризик аварійних ситуацій [6–8].

Таким чином, розробка та дослідження пристрою пасивної безпеки для контролю роботи коліс ТЗ, причепа є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення безпеки та ефективності транспортних процесів у системах вантажних перевезень.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Експлуатація вантажних ТЗ у складних умовах, зокрема за впливу пилу, вологи та низьких температур, сприяє зношенню й пошкодженню колісних вузлів. Традиційна діагностика потребує зупинки ТЗ та проведення технічного огляду, що знижує оперативність контролю. Тому актуальними є засоби візуального моніторингу, які дозволяють контролювати стан коліс безпосередньо під час руху.

До найпростіших засобів належать контрастні мітки та індикатори кріпильних елементів, які забезпечують візуальне визначення обертання колеса або послаблення різьбових з’єднань [4–6]. Однак такі рішення не дозволяють ефективно виявляти блокування чи заклинювання коліс під час руху. Сучасні візуальні системи контролю, зокрема пристрої типу Skiddd або Wheel Watcher, забезпечують оперативне виявлення несправностей за допомогою спостереження через дзеркала заднього виду [6, 9, 10]. Їх перевагами є простота конструкції та низька вартість, проте ефективність може знижуватися через вібрації, забруднення, обмерзання та залежність від умов освітлення.

Телематичні системи дистанційного моніторингу дозволяють контролювати параметри шин і гальмівних систем у реальному часі, однак характеризуються високою вартістю та залежністю від електроживлення і зв’язку [10]. Незважаючи на розвиток сучасних технічних рішень, ризик виникнення несправностей під час експлуатації ТЗ з причепами повністю не усунуто. У зв’язку з цим

метою роботи є дослідження міцності стержня пристрою пасивної безпеки руху вантажного ТЗ з причепом, який забезпечує візуальний контроль обертання коліс причепа з кабіни водія. Як ключовий елемент конструкції, стержень піддано розрахунку на міцність і жорсткість з урахуванням експлуатаційних навантажень, зокрема вібраційних та аеродинамічних впливів, з метою оцінки його працездатності та забезпечення надійності пристрою під час руху ТЗ.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Пасивні (неелектричні) системи залишаються актуальними для сучасних ТЗ завдяки автономності, простоті конструкції та високій надійності. Вони не потребують електроживлення, електронних компонентів чи програмного забезпечення, що забезпечує їхню працездатність у складних умовах експлуатації та у разі відмови електронних систем. Такі пристрої характеризуються невисокою вартістю виготовлення й обслуговування та можуть застосовуватися на ТЗ без сучасних систем моніторингу. Додатковою перевагою є можливість безпосереднього візуального контролю стану коліс водієм під час руху.

Конструкція пристрою визначається параметрами колісного вузла, зокрема величиною вильоту диска. При цьому елементи пристрою не повинні виходити за габарити ТЗ. Орієнтовно допустимий виступ становить близько 20 см для дисків із негативним вильотом, 13 см – із нульовим та 10 см – із позитивним [8]. Для покращення візуального сприйняття кінцева частина стержня має сигнальне жовте забарвлення, що забезпечує високу контрастність та помітність під час обертання колеса.

Кінцева частина стержня довжиною 60 мм покрита люмінесцентною жовтою фарбою для покращення його помітності під час руху ТЗ. Перед монтажем пристрою необхідно ретельно очистити поверхню та різьбу шпильок за допомогою дротяної щітки, видаливши іржу, бруд і сторонні частинки, які можуть пошкодити різьбове з’єднання або колісні гайки. Додатково слід перевірити технічний стан різьби та у разі виявлення пошкоджень замінити несправні елементи.

Використання жовтого кольору обумовлене його високою помітністю та безпековими властивостями. Жовтий колір добре сприймається людським оком навіть за недостатнього освітлення та на значній відстані. Він створює контраст із дорожнім покриттям, шинами та металевими елементами ТЗ та причепа, що полегшує візуальний контроль обертання колеса. Крім того, жовтий традиційно застосовується для сигнальних і попереджувальних елементів у транспортній галузі та промисловості.

Під час руху ТЗ з причепом обертання колеса зі стержнем сигнального кольору створює чіткий візуальний ефект, який дозволяє водієві швидко визначати роботу колеса та своєчасно виявляти можливе блокування або заклинювання. Таким чином, використання люмінесцентного жовтого покриття сприяє покращенню сприйняття інформації водієм і підвищує безпеку експлуатації ТЗ з причепом.

Під час руху на колесо та стержень діють різні експлуатаційні навантаження, які необхідно враховувати при розрахунках (рис. 1). Для дослідження можна прийняти причіп KRONE SDP 27 із габаритними розмірами 2,48×2,75 м, площею лобового перерізу 6,82 м², масою 6750 кг та максимальною вантажопідйомністю 27000 кг, який використовується найбільш широко в Україні. До нього підходять колеса діаметром 1007 мм і масою 72 кг. Визначення параметрів взаємодії колеса з дорогою передбачає врахування лінійної та кутової швидкостей, крутного моменту та нормального навантаження на колесо [11, 12].

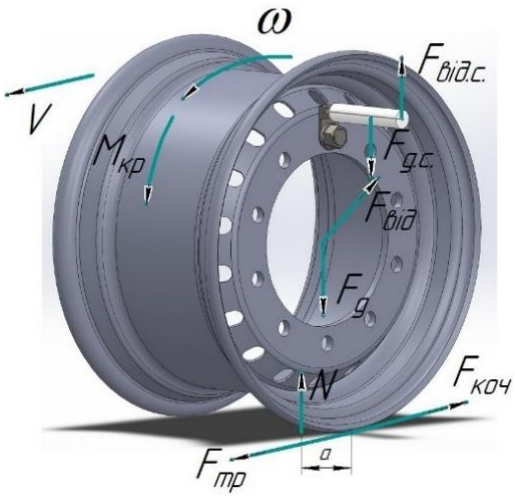


Рисунок 1 – Основні сили, що діють на колесо при русі

Джерело: розроблено автором

На стержень при русі діє комплекс навантажень різної природи. До них належать сила кочення $F_{коч}$, реакція опору N, сили тяжіння, що діють на колесо F_g та сили тяжіння, що діють на стержень $F_{g.c}$, сили тертя між шиною та дорожнім покриттям $F_{тр}$, відцентрові сили, що діють на колесо $F_{від}$ та відцентрові сили, що діють на стержень $F_{від.с.}$, інерційні навантаження, а також сили аеродинамічного опору (рис. 1). Сила тертя забезпечує зчеплення колеса з дорогою під час руху, гальмування та маневрування ТЗ. Водночас при збільшенні швидкості суттєво зростають відцентрові сили, які діють на стержень у радіальному напрямку та можуть викликати його згинання. Додатково під час розгону або гальмування виникають інерційні навантаження, які впливають на загальний напружено-деформований стан конструкції.

Під час руху вантажного ТЗ та обертання колеса стержень розробленого пристрою піддається дії змінних механічних навантажень, що можуть спричиняти його деформацію. У зв'язку з цим було поставлено завдання визначити оптимальні геометричні параметри стержня та обрати матеріал, який забезпечуватиме достатню міцність, жорсткість і довговічність конструкції. Однією з основних вимог до стержня є його добра видимість у дзеркалі заднього виду водія під час руху ТЗ. Попередньо для дослідження було прийнято стержень діаметром 40 мм, виготовлений із армованого поліаміду PA6-GF30. Довжина стержня визначається параметрами колісного диска, зокрема величиною його вильоту. Для оцінки найбільш несприятливих умов роботи прийнято максимальну довжину стержня 160 мм, що дозволило дослідити граничні деформації та напруження конструкції.

Особливу увагу необхідно приділити опору коченню та аеродинамічному опору причепа. Він є ключовим для забезпечення безпеки водіння та зменшення кількості ДТП. Опір коченню виникає внаслідок деформації шини та дорожнього покриття і безпосередньо впливає на умови руху ТЗ. Значення цього опору залежить від швидкості руху, стану дорожнього покриття та маси причепа з вантажем.

Аеродинамічний опір визначається геометрією ТЗ, формою причепа, наявністю обтічників і дефлекторів, а також розташуванням коліс відносно кузова. Для сучасних вантажних ТЗ з причепами використання аеродинамічних елементів дозволяє суттєво зменшити опір повітря та навантаження на колісні вузли. Необхідно враховувати вплив аеродинамічного потоку на колесо та стержень при різних швидкостях руху. У сучасних вантажних автомобілях, конструкція яких оптимізована з урахуванням аеродинаміки, значення коефіцієнта опору може становити близько 0,5–0,6. Для ТЗ із причепами цей показник зростає через додатковий опір, створений причепом, і зазвичай перебуває в межах 0,7–0,9.

Для стандартних вантажних причепів прямокутної форми характерні вищі значення аеродинамічного опору, тоді як використання обтічників та аеродинамічних елементів дозволяє його суттєво зменшити. На величину опору також впливає розташування коліс відносно кузова транспортного засобу. Передні колеса створюють найбільший опір повітряному потоку, тоді як для задніх коліс цей вплив є меншим. Використання аеродинамічних екранів і захисних кожухів дозволяє додатково знизити опір коліс завдяки зменшенню площі їх взаємодії з повітряним потоком.

ВИСНОВКИ.

Розроблений пристрій пасивної безпеки забезпечує ефективний візуальний контроль обертання коліс причепа безпосередньо з кабіни водія, що дозволяє своєчасно виявляти їх блокування або інші несправності. Додатковою перевагою є покращення сприйняття габаритів причепа, що спрощує маневрування, зокрема під час руху заднім ходом, та підвищує безпеку гальмування.

Однак необхідно провести розрахунки на міцність і жорсткість, визначити, чи обраний матеріал і геометричні параметри стержня забезпечують його працездатність в умовах експлуатаційних навантажень. Значення напружень не повинні перевищувати допустимих, що підтвердить достатній запас міцності та витривалості при дії циклічних, вібраційних і аеродинамічних навантажень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Про затвердження Порядку проведення обов'язкового технічного контролю транспортних засобів: постанова Кабінету Міністрів України від 30 січ. 2012 р. № 137.

2. Про затвердження Правил технічної експлуатації коліс і пневматичних шин транспортних засобів: наказ Міністерства інфраструктури України від 26 лип. 2013 р. № 549.

3. Про затвердження методів перевірки технічного стану колісних транспортних засобів: наказ Міністерства інфраструктури України від 24 груд. 2013 р. № 710.

4. Checkpoint. Офіційний сайт. URL: https://checkpoint-safety.com (дата звернення: 06.04.2026).

5. Redcat Industries. Офіційний сайт. URL: https://redcatindustries.com (дата звернення: 06.04.2026).

6. Skiddd. Офіційний сайт. URL: https://skiddd.com (дата звернення: 06.04.2026).

7. Йовченко А.В. Підвищення контролю безпеки переміщення вантажного транспорту з причепами. *Молодь: наука та інновації 2024*: зб. матеріалів конф. XII-ї Міжнар. наук.-техн. конф. студ., аспір. та мол. вчених; 13–15 лист. 2024 р. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2024. Том 1. С. 155-156.

8. Йовченко А.В. Розробка пристрою для контролю безпеки руху вантажного транспорту з причепами. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. №11(42) ч.1. С. 230–235. https:doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42)1.230-235.

9. Maxa Group. Офіційний сайт. URL: https://www.maxa-group.com (дата звернення: 06.04.2026).

10.Samsara. Trailer tracking. URL: https://www.samsara.com/products/equipment-tracking/trailer-tracking (дата звернення: 06.04.2026).

11.Nussupbek Zh. T., Bekenov T. N., Sattinova Z. K., Beisenbi M. A., Tassybekov Zh. T. Substantiation of methods for calculation of traction forces redistribution indicators on modular front and rear wheels of the vehicle (4X4). *Transportation Engineering*. 2023. Vol. 13, 100193. DOI: https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100193.

12.Спосіб визначення параметрів контакту колеса автомобіля з дорогою: пат. 102155 Україна: МПК (2015.01) B60B 15/00, G01M 17/02 (2006.01), G01N 19/02 (2006.01). № 2014 13703; заявл. 22.12.2014; опубл. 26.10.2015, Бюл. №20.

ЙОВЧЕНКО Алла Василівна, кандидат технічних наук, ст. викладач кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7069-1092

YOVCHENKO Alla – PhD tech. sci, senior lecturer of Department of Automobiles and Technology of Their Operation, Cherkasy State Technological University, e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7069-1092

УДК 656.13:004.89:005.8

А.А. Кашканов, А.А. Кашканова, Г.В. Козачук
Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

ІНТЕГРАЦІЯ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ У ЛОГІСТИЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИВАТНИХ АВТОТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Розглянуто можливості інтеграції навігаційних систем у логістичні процеси приватних автотранспортних підприємств. Обґрунтовано актуальність використання GPS-моніторингу та цифрових карт для підвищення ефективності управління перевезеннями, оптимізації маршрутів та зниження витрат. Проаналізовано організаційні та технічні аспекти впровадження навігаційних рішень, їхній вплив на економічні показники, безпеку руху та екологічність транспортної діяльності. Зроблено висновок про доцільність інтеграції навігаційних систем у логістичні схеми приватних підприємств як інструменту підвищення конкурентоспроможності та розвитку концепції «розумної логістики».

***Ключові слова**: навігаційні системи; GPS-моніторинг; цифрові карти; логістика; оптимізація маршрутів; транспортні технології; приватні автотранспортні підприємства; ефективність перевезень.*

The paper examines the integration of navigation systems into the logistics processes of private road transport enterprises. The relevance of GPS monitoring and digital maps is substantiated as tools for improving transport management efficiency, optimizing delivery routes, and reducing operational costs. Organizational and technical aspects of navigation system implementation are analyzed, along with their impact on economic performance, traffic safety, and environmental sustainability. The study concludes that the integration of navigation technologies into logistics schemes of private enterprises is a promising instrument for enhancing competitiveness and advancing the concept of "smart logistics".

***Key words**: navigation systems; GPS monitoring; digital maps; logistics; route optimization; transport technologies; private road transport enterprises; operational efficiency.*

У сучасних умовах цифрової трансформації транспортної галузі дослідження інтеграції навігаційних систем у логістичні процеси приватних автотранспортних підприємств набули особливої актуальності. Зростаюча конкуренція на ринку перевезень зумовлює потребу в ефективному управлінні автопарком, оптимізації маршрутів та зниженні витрат на пальне. Навігаційні системи виступають ключовим інструментом підвищення продуктивності та прозорості логістичних операцій, забезпечуючи контроль у реальному часі, скорочення простоїв і підвищення якості транспортних послуг.

За останні п'ять років наукові дослідження зосереджувалися на впровадженні GPS-моніторингу для відстеження руху транспортних засобів [1], RFID-технологій для автоматизованого контролю вантажів [2], застосуванні штучного інтелекту для прогнозування транспортних потоків та безпеки перевезень [3, 4] та IoT-рішень для інтеграції сенсорних систем у ланцюги постачання [5, 6]. Ці технології (табл. 1) забезпечили новий рівень керованості логістичних процесів, сприяли зниженню витрат, підвищенню точності доставки та формуванню екологічно орієнтованої моделі перевезень.

Таблиця 1 – Порівняння технологій покращення логістичних процесів

Напрям	Технології	Ефекти	Виклики
GPS + RFID	Моніторинг транспорту, автоматизоване зчитування вантажів	Скорочення часу доставки, зменшення помилок	Підтримка мережі, витрати на обслуговування
IoT	Сенсори, хмарна аналітика, GNSS	Зниження запасів, витрат, швидке відновлення	Високі капітальні витрати, слабка інфраструктура
AI	Машинне навчання, автономні системи	Оптимізація маршрутів, економія пального, безпека	Регуляторні бар'єри, суспільне прийняття

Напрям	Технології	Ефекти	Виклики
Організаційні умови	ERP-гармонізація, навчання персоналу	Підвищення ефективності впровадження	Нестача кадрів, правові прогалини

Важливим напрямом розвитку стало удосконалення організаційних умов – гармонізація ERP-систем, підготовка персоналу та адаптація нормативної бази до європейських стандартів [7, 8]. Інтеграція навігаційних технологій відповідає міжнародним екологічним вимогам і сприяє зменшенню викидів CO_2, що має особливе значення в контексті євроінтеграційних процесів України.

Попри значний прогрес у впровадженні навігаційних технологій у транспортну сферу, приватні автотранспортні підприємства України досі стикаються з низкою системних проблем, що обмежують ефективність їх використання у логістичних процесах [9]. Зокрема, відсутня комплексна модель інтеграції навігаційних систем із внутрішніми інформаційними платформами підприємств, що ускладнює оперативне управління перевезеннями, моніторинг технічного стану автопарку та контроль витрат. Недостатня стандартизація даних, слабка взаємодія між GPS-моніторингом, RFID-ідентифікацією та ERP-системами призводять до фрагментарності інформаційних потоків і зниження точності управлінських рішень.

Крім того, більшість малих і середніх перевізників не мають достатніх ресурсів для впровадження IoT- та AI-рішень, що обмежує можливості прогнозування маршрутів, оцінки ризиків і забезпечення екологічної ефективності. В умовах євроінтеграції України актуальним залишається питання гармонізації технічних стандартів навігаційних систем із вимогами ЄС та створення організаційно-правових механізмів їх адаптації до потреб приватного сектору.

Отже, проблема полягає у необхідності розроблення науково обґрунтованої моделі інтеграції навігаційних систем у логістичні процеси приватних автотранспортних підприємств, яка забезпечить підвищення ефективності управління перевезеннями, зниження витрат, екологічну стабільність та відповідність міжнародним стандартам цифрової логістики.

Сучасні навігаційні технології охоплюють глобальні супутникові системи (GPS, Galileo, ГЛОНАСС, BeiDou), електронні картографічні комплекси (ECDIS/ECS), а також інтегровані інформаційні платформи для управління транспортними потоками. Їхні функціональні можливості включають точне позиціонування, моніторинг руху, оптимізацію маршрутів, підвищення безпеки та екологічності перевезень.

Таблиця 2 – Можливості та сфера застосування сучасних навігаційних технологій

Технологія	Основні можливості	Сфера застосування
GNSS (GPS, Galileo, ГЛОНАСС, BeiDou)	Позиціонування, швидкість, курс, синхронізація часу	Автомобільний, авіаційний, морський транспорт
ECDIS/ECS	Електронні карти, прокладання маршруту, попередження про небезпеки	Морський транспорт, автомобільна логістика
Інтегровані системи (GNSS, датчики, телематика)	Оптимізація маршрутів, моніторинг стану ТЗ, прогнозування потоків	Приватні автотранспортні підприємства, «розумні міста»

GNSS забезпечують базову точність і глобальне покриття, ECDIS/ECS додають картографічну інтерпретацію та зручність управління маршрутами, інтегровані системи дозволяють комплексно управляти логістикою, знижувати витрати та підвищувати безпеку. Таким чином, сучасні навігаційні технології є ключовим інструментом модернізації транспортної діяльності приватних підприємств, особливо у сфері оптимізації перевезень та інтеграції у концепцію «Smart Mobility» [10].

Для інтеграції навігаційних систем у логістичні схеми приватних автотранспортних підприємств необхідно врахувати як організаційні, так і технічні умови. Це забезпечує не лише ефективність, а й стійкість системи у реальних умовах експлуатації.

Організаційні умови:

– стратегічне планування: визначення цілей інтеграції (зниження витрат, підвищення безпеки, екологічність);

– кадрове забезпечення: підготовка персоналу до роботи з навігаційними системами, навчання диспетчерів та водіїв;

– регламентування процесів: розробка внутрішніх стандартів використання GPS-моніторингу та цифрових карт;

– інтеграція у бізнес-процеси: включення навігаційних даних у систему управління перевезеннями, планування маршрутів та контролю виконання;

– фінансове забезпечення: інвестиції у обладнання, програмне забезпечення та технічну підтримку.

Технічні умови:

– інфраструктура: наявність стабільного інтернет-з'єднання та серверів для обробки навігаційних даних;

– обладнання: оснащення транспортних засобів GPS-трекерами, датчиками руху, телематичними модулями;

– програмне забезпечення: використання цифрових карт, систем диспетчерського контролю, алгоритмів оптимізації маршрутів;

– сумісність: інтеграція навігаційних систем із корпоративними ERP/CRM-платформами;

– безпека даних: захист навігаційної інформації від несанкціонованого доступу та кіберзагроз;

– технічна підтримка: регулярне оновлення картографічних даних, сервісне обслуговування обладнання.

Блок-діаграма процесу інтеграції навігаційних систем у логістичні схеми приватного підприємства (рис. 1) демонструє чотири ключові етапи: технологічний (GPS, RFID, IoT, AI), аналітичний (збір, хмарна обробка), оптимізаційний (розрахунок маршрутів, контроль транспорту), організаційний (ERP-системи, навчання персоналу). Результатами інтеграції є зниження витрат, екологічна ефективність, точність доставки та підвищення безпеки.

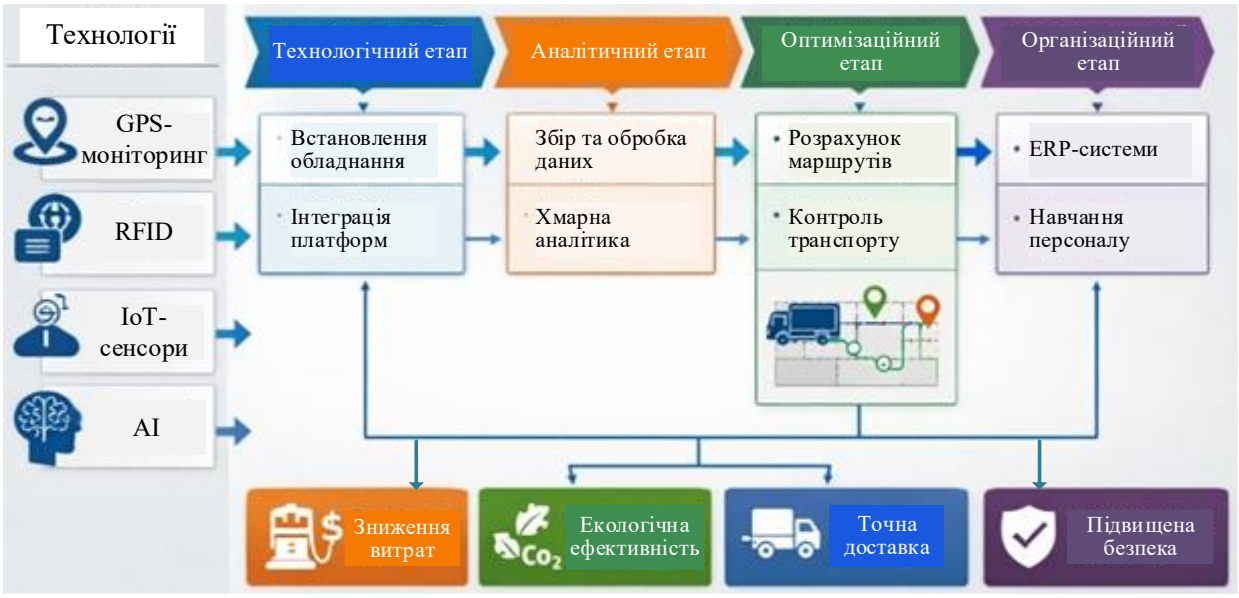


Рисунок 1 – Схема інтеграції навігаційних систем у логістичні процеси транспортних підприємств

Інтеграція навігаційних систем є стратегічно важливим напрямом модернізації транспортної діяльності, адже вона поєднує економічні та екологічні ефекти (табл. 3).

Таблиця 3 – Економічні та екологічні ефекти впровадження навігаційних систем у логістичні процеси приватних автотранспортних підприємств та перспективи «розумної логістики»

Ефекти	Ключові показники	Перспективи «розумної логістики»
Економічні	- Зниження витрат пального на 10–15 % - Скорочення довжини маршрутів на 8–12 % - Зменшення часу доставки на 2–3 хвилини*	- Інтеграція навігаційних систем із міськими цифровими платформами - Використання AI для прогнозування транспортних потоків - Автоматичне планування маршрутів з урахуванням трафіку
Екологічні	- Зменшення викидів CO_2	- Розвиток «зелених перевезень» у межах Smart City

Ефекти	Ключові показники	Перспективи «розумної логістики»
	- Раціональне використання ресурсів - Контроль технічного стану ТЗ	- Використання телематики для моніторингу екологічних показників - Формування єдиних інформаційних хабів для екологічного контролю

*Примітка: показник «зменшення часу доставки на 2–3 хвилини» стосується переважно міських умов із високою інтенсивністю руху та короткими маршрутами. У міжміських перевезеннях ефект може бути значно більшим – у межах 5–15 хвилин і більше, залежно від довжини маршруту, трафіку та організації логістичних процесів.

Перспективи розвитку «розумної логістики» полягають у застосуванні штучного інтелекту для прогнозування транспортних потоків, інтеграції навігаційних систем із міськими цифровими платформами, розвитку телематичних сервісів та створенні єдиних інформаційних хабів для взаємодії між перевізниками, клієнтами та муніципальними структурами. Це дозволяє формувати конкурентні переваги приватних підприємств і сприяє їхній інтеграції у концепцію «Smart Mobility».

Таким чином, навігаційні технології стають ключовим інструментом підвищення ефективності, безпеки та екологічності транспортної діяльності, а їхнє впровадження визначає новий етап розвитку сучасної логістики.

1. Буряк, В., & Кашканов, А. (2025). Інтелектуальні системи моніторингу в логістиці зернових: вплив на експлуатаційні витрати автомобільного транспорту. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, (28), 6–13. https://doi.org/10.30977/VEIT.2025.28.0.1

2. Woschank, M. (2024). RFID-Technologies in Warehousing: State of the Art and Future Prospectives. In 5th African conference on Industrial Engineering and Operations Management, South Africa, https://doi.org/10.46254/AF05.20240239

3. Mahale Y., Kolhar S., More A. S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions. Discover Applied Sciences. 2025, 7, 243. https://doi.org/10.1007/s42452-025-06681-3

4. Kashkanova, A., Rotshtein, A., Kashkanov, A., & Katelnikov, D. (2025). Intelligent model for reliability control and safety in urban transport systems. Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 15(4), 100–107. https://doi.org/10.35784/iapgos.8276

5. İnce, E. C. (2025). Mapping the path to sustainable urban mobility: A bibliometric analysis of global trends and innovations in transportation research. Sustainability, 17(4), 1480. https://doi.org/10.3390/su17041480

6. Gawande P.D. Integrating AI-Driven Predictive Maintenance with Telematics: A Data-Centric Approach. Sarcouncil Journal of Engineering and Computer Sciences. 2025, 4(7), P. 456-462. https://doi.org/10.5281/zenodo.15862327

7. Woźniakowski T, Jałowiecki P, Zmarzłowski K. (2018). ERP systems and warehouse management by WMS. Information System in Management. 7(2). 141-51.

8. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Intelligent Transport Systems (ITS) for Sustainable Mobility, Second Edition. Part of the WP.29 “How it works – How to join it “series. (2024). https://unece.org/sites/default/files/2024-06/ITS%20for%20sustainable%20Mobility_E_pdf_web.pdf

9. Кашканов А. А., Буряк В.В., Москалюк М.Л. Аспекти логістичного забезпечення виробничих процесів підприємств автомобільного транспорту України. Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 23-25 жовтня 2023 року: збірник наукових праць. Вінниця: ВНТУ. 2023, С. 154-156. https://atm.vntu.edu.ua/konf/Zbirnyk_STPR_AT_2023.pdf

10. Чернова, Н. (2025). Концептуальна еволюція та сутність розумного міста. Економіка та суспільство, (81). https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-81-75

КАШКАНОВ Андрій Альбертович – д.т.н., професор, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету, e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua

КАШКАНОВА Анастасія Андріївна – аспірант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету, e-mail: kashkanov9a@gmail.com

КОЗАЧУК Ганна Володимирівна – магістрант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету, e-mail: annakozachuk93@gmail.com

KASHKANOV Andrii, Doctor of Science in Engineering, Professor, Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua

KASHKANOVA Anastasiia, PhD student of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: kashkanov9a@gmail.com

KOZACHUK Hanna, master student of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: annakozachuk93@gmail.com

УДК 629.3.027.4

Е.С. Клімов
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна
А.П. Солтус
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЕЛАСТИЧНОГО КОЛЕСА З ВІДВЕДЕННЯМ

Моделювання робочого процесу еластичного колеса під час руху з відведенням дозволяє визначитись із величиною бічної сили та стабілізуючого моменту з урахуванням пружних та конструктивних особливостей шини, тиску повітря. Представлено результати досліджень існуючих моделей шини (щітка, напружена струна, напружена балка) та розробленої моделі цілісношітільної шини, яка розглядає шину у складі оболонки, наповненої повітрям. При цьому властивості шини формуються пружними та конструктивними параметрами оболонки та пружністю наповнювача, яка створюється тиском повітря. Установлено, що шину можна розглядати цілісним тілом, якщо коефіцієнт опору бічному відведенню є стабільною величиною під час руху з відведенням та по криволінійній траєкторії, що можливо за номінального тиску повітря.

Ключові слова: *шина, контактний відбиток, математична модель, коефіцієнт опору бічному відведенню, бічна сила, стабілізуючий момент.*

Modeling the working process of an elastic wheel during movement with slip allows determining the magnitude of the lateral force and self-aligning torque, taking into account the elastic and structural features of the tire, inflation pressure. The results of research on existing tire models (brush, stretched string, stretched beam) and the developed solid-body tire model are presented, which considers the tire as part of a shell filled with air. In this case, the properties of the tire are formed by the elastic and structural parameters of the shell and the elasticity of the filler, which is created by inflation pressure. It is established that the tire can be considered as a solid body if the cornering stiffness is a stable value during movement with slip and along a curved trajectory, which is possible at rated inflation pressure.

Keywords: *tire, contact patch, mathematical model, cornering stiffness, lateral force, self-aligning torque.*

Мета. Визначитись із достовірністю математичних моделей щодо розрахунку бічної сили та стабілізуючого моменту шини під час плоскопаралельного руху з відведенням.

Серед існуючих моделей шини заслуговують уваги три моделі шини: щітка, напружена струна, напружена балка. Модель «**Щітка**» [1–5] включає жорсткий каркас з брекером та еластичний протектор, який представлено еластичними щетинками (щіткою). Під час руху шини з бічним відведенням щетинки входять в контакт з опорною поверхнею, а за наявності сил зчеплення відхиляються у бічному напрямку. Контактний відбиток моделі має форму прямокутника довжиною $2a$. Нормальний тиск по довжині контактного відбитка розподіляється за параболічним законом з нульовими значеннями тиску на передній та задній границі контактного відбитка. Величина коефіцієнта зчеплення μ вважається сталою.

Пружність щетинок еквівалентна пружності боковин каркаса та протектора, яку характеризують бічною жорсткістю на одиницю довжини контактного відбитка $c_{ру}$. Під її величиною розуміють відношення бічної жорсткості шини до довжини контактного відбитка та визначають за виразом:

$$c_{ру} = \frac{c_{ш}}{2a}, \quad (1)$$

де $c_{ру}$ – бічна жорсткість шини на одиницю довжини контакту, Н/м^2; $c_{ш}$ – бічна жорсткість шини, Н/м; a – половина довжини контактного відбитка, м.

Бічну жорсткість шини $c_{ш}$ визначають за стаціонарних умов як відношення бічної сили, прикладеної до диска колеса, до його бічного переміщення:

$$c_{ш} = \frac{F_y}{\Delta}, \quad (2)$$

де F_y – бічна сила, прикладена до диска нерухомого колеса, Н; Δ – бічне переміщення диска, на який діє бічна сила F_y, м.

Бічна сила під час руху з відведенням визначається за виразом [1]:

$$F_y = \mu F_z (1 - \lambda^3), \quad (3)$$

де F_z – нормальне навантаження на шину, Н; μ – коефіцієнт зчеплення; λ – коефіцієнт, що у відносній величині визначає довжину зони зчеплення під час руху з відведенням, який визначається так:

$$\lambda = 1 - \frac{2a^2 c_{py}\,\delta}{3\mu F_z},$$

де δ – поточне значення кута відведення, рад.

Стабілізуючий момент шини під час руху з відведенням визначають за виразом [1]:

$$M_z = \mu F_z a \lambda^3 (1 - \lambda). \quad (4)$$

Залежності (3) та (4) дозволяють визначити силу та момент у межах кута відведення $0 < \delta \leq \delta_{max}$, де δ_{max} – граничний за зчепленням кут відведення, рад. Його величину визначають так:

$$\delta_{max} = \frac{3\mu F_z}{2c_{py}a^2}. \quad (5)$$

Якщо $\delta \geq \delta_{max}$, то $F_y = \mu F_z$.

У моделі «**Напружена струна»** [1, 2, 6] протекторний пояс шини, який включає протектор, брекер та бігову доріжку каркасу, представляє напружену струну, яка у бічному напрямку підтримується пружинами. Пружини моделюють боковини каркасу. Тиск повітря у шині, діючи на протекторний пояс, яким є струна, спричинює її розтягнення.

Модель характеризують пружністю, довжиною релаксації та довжиною контакту з опорною поверхнею, наявністю тільки сил зчеплення у контакті з опорною поверхнею та рівномірним розподілом тиску на опорну поверхню. Пружність моделі, еквівалентну шині, характеризують бічною жорсткістю на одиницю загальної довжини контакту і релаксації та визначають за виразом [2]:

$$c_{py} = \frac{\text{к}_\text{y}}{2(a+\sigma)^2},$$

де c_{py} – бічна жорсткість шини на одиницю загальної довжини релаксації та контакту, Н/м^2; k_y – коефіцієнт опору бічному відведенню шини, Н/рад; σ – довжина релаксації струни, яка згідно з [2] знаходиться у межах $(0{,}6 – 1)r_к$ ($r_к$ – радіус колеса), м; a – половина довжини контакту шини, м.

Бічну силу визначають за виразом:

$$F_y = 2c_{py}\delta(a + \sigma)^2, \quad (6)$$

де δ – поточне значення кута відведення, рад.

Стабілізуючий момент визначають так [2]:

$$M_z = 2c_{py}a\delta\left[\frac{a^2}{3} + \sigma(a + \sigma)\right]. \quad (7)$$

У залежностях (6) та (7) кут відведення змінюється у межах, коли у контакті з опорною поверхнею знаходяться зони зчеплення. На асфальтобетонній поверхні для шин вантажних автомобілів величина цього кута не перевищує 5°.

У моделі «**Напружена балка»** [2, 6 – 9] каркас шини та брекер представляють балкою, а боковини шини та протектор є пружною основою, на яку спирається балка. Наявність пружної основи, яка знаходиться між балкою та опорною поверхнею, призведе, при дії на шину бічної сили, до руху колеса з відведенням. Водночас відбудеться деформація балки від дії бічної сили. Тиск на опорну поверхню вздовж контактного відбитка розподіляється за параболічним законом при нульових значеннях у крайніх точках. Пружність моделі характеризують бічною жорсткістю $c_ш$. Контактний відбиток шини являє прямокутник довжиною $2a$ та шириною $2b$. Коефіцієнт зчеплення постійний у контактному відбитку. Дослідження проводяться у межах кута відведення, за якого бічна сила під час руху з відведенням не перевищує сили зчеплення. Балка характеризується жорсткістю на згин EJ_z, де E – модуль Юнга, Н/м^2; $J_z = \int z^2 dA$ – момент інерції перерізу відносно осі повороту балки, м^4.

Балка у моделі виконує функції каркасу та брекеру реальної шини, тому бічна сила та стабілізуючий момент будуть визначатися пружною основою, створеною протектором і боковинами. Траєкторія руху точки контакту складається із ділянки зчеплення, яка є прямою лінією, та ділянки ковзання, яка являє частину параболи з нульовими значеннями в початковій та кінцевій точках.

Загальну бічну силу визначають як суму сил у зоні зчеплення та ковзання за виразом:

$$F_y = \frac{\text{с}_\text{ш}\delta x_b^2}{4a} + \frac{3\mu F_z}{4a}\left(\frac{4\text{a}}{3} - \frac{x_b^2}{a} + \frac{x_b^3}{3a^2}\right), \quad (8)$$

де x_b – довжина зони зчеплення у контакті, яку визначають так:

$$x_b = 2a\left(1 - \frac{ac_{\text{ш}}\delta}{3\mu F_z}\right), \quad (9)$$

де δ – поточне значення кута відведення, рад.

Стабілізуючий момент шини визначають так:

$$M_z = \frac{c_ш \delta x_b^2}{2a}\left(\frac{x_b}{3} - \frac{a}{2}\right) + \frac{3\mu F_z x_b^2}{4a}\left(1 - \frac{x_b}{a} + \frac{x_b^2}{4a^2}\right) \quad (10)$$

Кут відведення змінюється у межах $0 < \delta \le \delta_{max}$. Кут δ_{max} визначають за виразом (5).

У моделі «**Ціліснотільна шина**» [10] прийнято шину розглядати у складі оболонки, наповненої пружним матеріалом, яким є стиснене повітря або азот. Оболонка включає каркас, брекер, боковини та протектор та контактує з одного боку з ободом колеса, а з іншого – з опорною поверхнею. Контакт з опорною поверхнею здійснюється по площадці, яка у реальній шині наближається до овалу або прямокутника. Останні приводяться до рівновеликого прямокутника з довжиною контакту $2a$ та шириною $2b$. Пружні властивості шини (коефіцієнт опору бічному відведенню, бічна та кутова жорсткість) формуються конструкцією і пружністю оболонки та пружністю наповнювача. Вважається, що тіло шини цілісне за умови стабільності коефіцієнта опору бічному відведенню під час руху з відведенням та по криволінійній траєкторії. Аналіз досліджень засвідчив, що стабільність цього коефіцієнта забезпечується номінальним тиском повітря у шині (пружністю наповнювача оболонки). Тиск на опорну поверхню характеризується коефіцієнтом розподілу тиску β, який є відношенням максимального тиску у контакті до середнього. Установлено, що його значення змінюється від одиниці, що відповідає рівномірному розподілу тиску, до 1,5 при параболічному законі розподілу тиску. При еліптичному законі $\beta = 1{,}27$, а при усіченій параболі або трапеції коефіцієнт залежить від параметра усічення, але не перевищує 1,5.

Стабілізуючий момент шини при русі з кутом відведення $0 \le \delta \le \delta_M$, де δ_M – кут відведення, при якому стабілізуючий момент досягає максимуму, визначається за виразом:

$$M_z = M_{zmax}\left[1 - \left(1 - \frac{\delta}{\delta_M}\right)^2\right], \quad (11)$$

де M_{zmax} – максимальний стабілізуючий момент шини, який виникає під час руху з кутом відведення δ_M.

При визначенні моменту M_{zmax} приймалось припущення, що у межах кута відведення $0 < \delta \le \delta_M$ коефіцієнт опору бічному відведенню k_y є стабільною величиною, а епюра залежності бічної сили від кута відведення являє прямокутний трикутник. У цьому випадку маємо:

$$M_{zmax} = \frac{k_y a \delta_M}{3\beta}, \quad (12)$$

де k_y – коефіцієнт опору бічному відведенню, Н/рад, β – коефіцієнт розподілу тиску; a – половина поздовжньої осі контактного відбитка, м.

Величину кута δ_M на опорній поверхні з високим коефіцієнтом зчеплення рекомендується приймати для шин вантажних автомобілів $\delta_M = 0{,}0872$ рад, а для шин легкових – 0,0698 рад.

Під час руху з кутом відведення $\delta_M \le \delta \le \delta_{max}$ стабілізуючий момент шини буде:

$$M_z = M_{zmax}\left[1 - \left(\frac{\delta - \delta_M}{\delta_{max} - \delta_M}\right)^2\right], \quad (13)$$

де δ_{max} – граничний за зчепленням кут відведення, при якому у контактному відбитку наявні тільки зони ковзання, а стабілізуючий момент дорівнює нулю. Цей кут визначається так:

$$\delta_{max} = \frac{2\beta\mu F_z}{k_y}. \quad (14)$$

Бічну силу будемо визначати, розділивши залежність $F_y = f(\delta)$ на дві ділянки: часткового ковзання та повного ковзання. Ділянка часткового ковзання буде при куті відведення $0 < \delta < \delta_{max}$, а бічну силу визначимо за виразом:

$$F_y = \frac{k_y \delta}{\beta}\left(1 - \frac{k_y \delta}{4\beta\mu F_z}\right). \quad (15)$$

Для ділянки повного ковзання при куті відведення $\delta \ge \delta_{max}$ у контактному відбитку наявні тільки зони ковзання, а бічна сила досягає максимального за зчепленням значення $F_{ymax} = \mu F_z$.

Для аналізу наведених залежностей як об'єкт досліджень використано автомобіль КрАЗ колісної формули 6х6, обладнаний широкопрофільними шинами розміру 1300х530-533 мод. ВИД-201 при номінальному тиску повітря 0,4 МПа та навантаженні на шину керованого колеса 27000 Н. Експериментально визначалась бічна жорсткість шини при прикладанні бічного зусилля до диска колеса у межах до $0{,}1F_y$ та бічне переміщення диска на асфальтобетонній поверхні з високим коефіцієнтом зчеплення. За такої умови у контактному відбитку умовно відсутні зони ковзання, а середнє значення бічної жорсткості шини склало $c_ш$ = 780900,2 Н/м. Половина поздовжньої осі контактного відбитка, приведеного до рівновеликого прямокутника, становила a = 0,145 м. Коефіцієнт опору бічному відведенню, враховуючи [10], визначався побічним методом за виразом: $k_y = c_ш a$. Після підстановки отримаємо: $k_y = 780900{,}2 \times 0{,}145 = 113230{,}5$ Н/рад.

Експериментально стабілізуючий момент шини визначався під час руху правого керованого колеса з кутом відведення δ, який при знятій поперечній тязі установлювався фіксацією правого керованого колеса спеціальним кронштейном. Кронштейн кріпився з одного боку до правого важеля кермової трапеції, а з іншого – до драбин кріплення правої ресори. Зміною довжини кронштейну задавався кут відведення. Лівим керованим колесом при знятій поперечній тязі задався прямолінійний рух автомобілю. Під час проведення досліджень клинами між балкою керованого моста та передніми ресорами установлювався нульовий кут поздовжнього нахилу шворня. Методом тензометрування кронштейну визначався стабілізуючий момент шини.

Розрахунки бічної сили та стабілізуючого моменту проведені за вихідними даними шини розміру 1300х530-533 мод. ВИД-201: p_w = 0,4МПа, F_z = 27000 Н, k_y =113230,5 Н/рад, a = 0,145 м, μ = 0,7, $r_к$ = 0,6 м, $\sigma = 0{,}6r_к$, δ_M = 5°. При розрахунку за моделями щітка та балка приймався параболічний закон розподілу тиску β = 1,5, а за моделями струна та ціліснотільна шина – рівномірний β = 1. За цими даними при рівномірному розподілі тиску $\delta_{max} = \frac{2x0{,}7x27000}{113230{,}5}$ = 0,334 рад, а при параболічному – $\delta_{max} = \frac{3x0{,}7x27000}{113230{,}5}$ = 0,5 рад. Результати розрахункових та експериментальних даних бічної сили та стабілізуючого моменту наведено на рис. 1 та рис. 2.

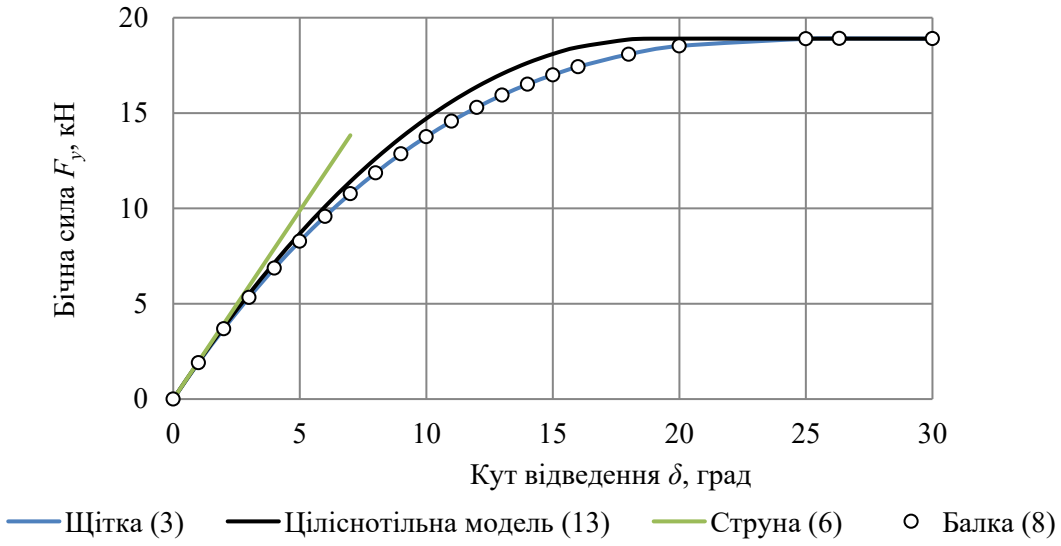


Рисунок 1 – Залежність $F_y = f(\delta)$

Із аналізу рис. 1 видно, що розрахункові значення бічної сили за моделями щітка, балка та ціліснотільна шина дають результати бічної сили, які відрізняються у межах до 7%. Водночас за моделлю струна розраховувати бічну силу можливо лише до кута відведення до 1°.

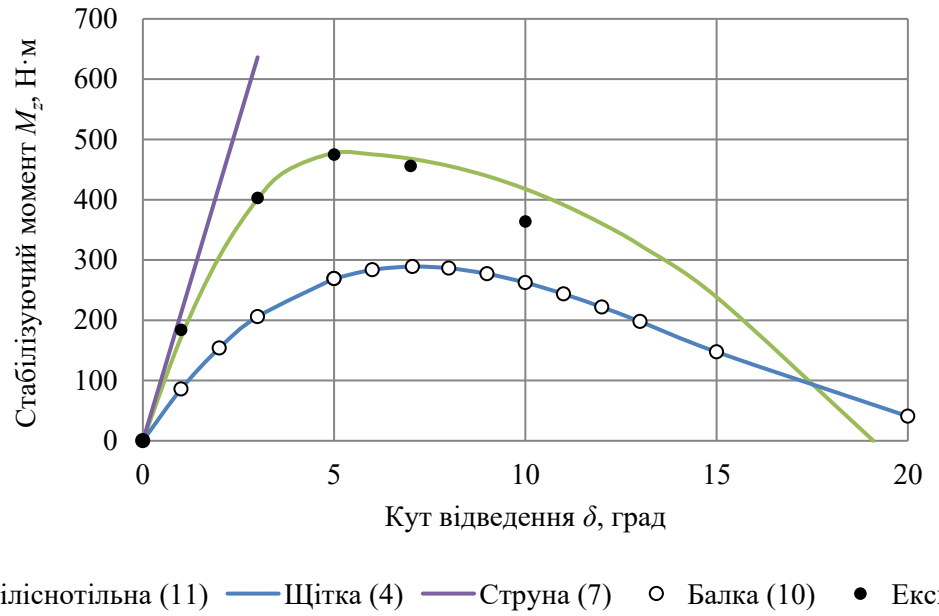


Рисунок 2 – Залежність $M_z = f(\delta)$

Із аналізу рис. 2 видно, що тільки ціліснотільна модель шини, в якій прийнято рівномірний розподіл тиску та приведений до рівновеликого прямокутника контактний відбиток, забезпечує відповідність розрахункових значень стабілізуючого моменту з експериментом. Розрахункові значення моменту за моделями щітка та балка повністю збігаються між собою, а за абсолютним значенням вони до двох разів занижені порівняно з експериментальними. Це пояснюється параболічним законом розподілу тиску у цих моделях. Щодо моделі струна, то стабілізуючий момент можливо розраховувати у межах кута відведення лише до 1°.

З аналізу наведених досліджень випливають наступні висновки:

1. Тільки ціліснотільна модель шини, що враховує реальний розподіл тиску у контакті з опорною поверхнею та його розміри, бічну жорсткість шини та її зміну залежно від кута відведення, дозволяє визначити реальні значення бічної сили та стабілізуючого моменту під час руху з відведенням.

2. Розрахункові значення бічної сили та стабілізуючого моменту за моделями щітка та балка однакові, що пояснюється параболічним законом розподілу тиску у контакті та пружністю, яка створюється протектором та боковинами шини. Водночас розрахований стабілізуючий момент відрізняється від експериментального, оскільки фактичний тиск у відбитку не відповідає параболічному, який закладено у цих моделях.

3. За моделлю струна можливо розраховувати бічну силу та стабілізуючий момент лише при куті відведення до 1°.

4. Розглядати шину цілісним тілом у складі оболонки та пружного наповнювача, яким є повітря або азот, можливо при відповідності конструктивних та пружних властивостей оболонки тиску повітря у шині. Водночас номінальний тиск повітря забезпечує стабільність коефіцієнта опору бічному відведенню під час руху з відведенням та по криволінійній траєкторії.

Перелік джерел посилання

1 Pacejka H.B. Tire and Vehicle Dynamics, 3rd ed.; Elsevier: Oxford, UK, 2012.

2 Nakajima Y. Advanced tire mechanics. Singapore: Springer Nature, 2019. 1265 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-5799-2.

3 Romano L., Bruzelius F., Jacobson B. Brush tyre models for large camber angles and steering speeds. *Vehicle System Dynamics.* 2022. 60(4), 1341–1392. https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1854320

4 Sorniotti A., Velardocchia M. Enhanced tire brush model for vehicle dynamics simulation. *SAE International Technical Paper.* 2008. 2008-01-0595. doi: 104171/2008-01-0595.

5 Stocco D., Biral F., Bertolazzi E. A physical tire model for real-time simulations. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2024. 223, 654-676.

6 Wong, J.Y. Theory of Ground Vehicles, 5th ed.; JohnWiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, 2022. 560p.

7 E. Fiala, Seitenkrafte am Rollenden Luftreifen. *VDI Zeitschrift.* 1954. 96. 973–979.

8 Sakai, H. Theoretical and experimental studies on the dynamic properties of tyres Part 1: Review of theories of rubber friction. *Int. J. Veh. Des*. 1981. 2. 78–110.

9 Sakai, H. Theoretical and experimental studies on the dynamic properties of tyres. Part 2: Experimental investigation of rubber friction and deformation of a tyre. *Int. J. Veh. Des*. 1981. 2. 182–226.

10. Солтус А.П, Клімов Е.С, Тарандушка Л.А. Визначення коефіцієнта опору бічному відведенню. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2025. № 2 (25). С. 273–283. DOI 10.36910/automash.v2i25.1937.

КЛІМОВ Едуард Сергійович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри автомобілів і тракторів, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: edward.klimov@gmail.com

СОЛТУС Анатолій Петрович – д.т.н., професор, професор кафедри автомобілів та технологій їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, e-mail: auto.soltus@gmail.com

УДК

А.В. Кологойда, О.О. Аксьонова
Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, Україна

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ВІДНОВЛЕННЯ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ МЕТОДАМИ 3D-ДРУКУ

У роботі проаналізовано параметри відновлення компонентів систем транспортних засобів методами адитивного виробництва. Наукова новизна полягає у встановленні впливу анізотропії композитних філаментів на герметичність деталей під робочим навантаженням. Запропоновано використання математичної моделі прогнозування руйнівного навантаження залежно від орієнтації шарів для розрахунку стінок з урахуванням пористості. Пропонується визначати економічну доцільність та переваги 3D-друку через модель витрат та інтегральну модель, при перевищенні критичного часу простою техніки. В подальшому результати можуть бути використані для розробки мобільних комплексів оперативного ремонту транспортних засобів, створення цифрових каталогів запасних частин.
***Ключові слова**: адитивні технології, 3D-друк, відновлення деталей, параметри друку, автомобільний транспорт, топологічна оптимізація.*

The paper analyzes the parameters of the restoration of vehicle system components using additive manufacturing methods. The scientific novelty lies in establishing the influence of the anisotropy of composite filaments on the tightness of parts under working load. It is proposed to use a mathematical model for predicting the destructive load depending on the orientation of the layers for calculating walls taking into account porosity. It is proposed to determine the economic feasibility and benefits of 3D printing through a cost model and an integral model when the critical downtime of the equipment is exceeded. In the future, the results can be used to develop mobile complexes for rapid vehicle repair and create digital spare parts catalogs.
***Key words**: additive technologies, 3D printing, part recovery, printing parameters, road transport, topological optimization.*

Сучасний розвиток автомобільного транспорту характеризується складністю конструкцій різних систем транспортних засобів, що працюють у режимах високих тисків та інтенсивних динамічних навантажень. Традиційний технічний сервіс передбачає відновлення працездатності таких вузлів шляхом заміни на нові оригінальні компоненти або використання класичних методів ремонту (наплавлення, механічна обробка). Проте глобальні логістичні виклики, дефіцит складських запасів для застарілих або ексклюзивних моделей автомобілів, а також висока вартість простою автопарку, створюють гостру потребу в альтернативних методах відновлення.

Адитивне виробництво (3D-друк) відкриває принципово нові можливості для оперативного відновлення функціональності компонентів різних систем автомобіля безпосередньо на місці експлуатації. Однак широке впровадження цієї технології стримується низкою невирішених науково-технічних суперечностей.

По-перше, анізотропна природа 3D-друкованих структур створює ризики втрати герметичності та непередбачуваного руйнування під дією високих тисків та інтенсивних динамічних навантажень.

По-друге, існуючі методики розрахунку міцності не враховують специфічну пористість та міжшарову адгезію композитних матеріалів.

Крім того, відсутній комплексний інструментарій, який би дозволяв фахівцю обґрунтувати вибір між купівлею нової деталі та її адитивним відновленням з урахуванням не лише собівартості, а й економічних показників життєвого циклу.

Таким чином, наукове обґрунтування параметрів адитивного відновлення, що поєднує фізико-механічну надійність та економічну доцільність, є актуальним завданням для розвитку науки в галузі автомобільного транспорту в умовах переходу до концепції Індустрії 4.0.

Аналіз сучасних наукових праць свідчить про стрімке зростання інтересу до адитивних технологій, проте дотепер питання їх безпосереднього впровадження у процеси технічного обслуговування транспортних засобів залишалося поза межами системного наукового розгляду. Більшість існуючих досліджень фокусуються на загальних властивостях матеріалів, тоді як технологічна інтеграція 3D-друку в цикли відновлення компонентів систем та розробка відповідних протоколів є практично невисвітленими. Це створює необхідність переходу від теоретичного

вивчення методу до формування науково обґрунтованих технологічних карт відновлення деталей безпосередньо в умовах сучасних підприємств.

Дослідження таких вчених, як Кушнірчук А.С., Ткачук В.П., Харжевський В.О. (проводять дослідження міцнісних характеристик деталей, отриманих за допомогою FDM друку із ABS 7 та COPET пластику, та описано конструкцію установки для дослідження на зносостійкість тіл, отриманих FDM друком) [1,2]. У роботах Ian Gibson [3] детально описано загальні принципи адитивного виробництва, проте питання відновлення компонентів систем транспортних засобів, які мають певне навантаження, залишається дискусійним. Проблема анізотропії властивостей 3D-друкованих виробів широко висвітлена в працях S. H. Ahn та ін. [4] та Armando Ramalho, Dino Freitas, Henrique Almeida та ін. [5], J.M. Chacón [6], де автори вказують на суттєву різницю в міцності матеріалу в повздовжньому та поперечному напрямках нанесення шарів.

Що стосується економічного аспекту, то праці T. Holmström та J. Partanen обґрунтовують перехід до «цифрових складів» (Digital Warehousing), доводячи перевагу локального виробництва над глобальними логістичними ланцюгами. Водночас у вітчизняній та світовій практиці недостатньо представлені комплексні математичні моделі, які б інтегрували технічний параметр анізотропної міцності з динамічними показниками логістичних втрат. Більшість існуючих підходів розглядає або суто інженерну, або суто економічну сторону, залишаючи без уваги створення єдиного інструменту, такого як модель Integrated Fuel Economy.

На відміну від односторонніх підходів, нами запропоновано аналітичний підхід, що базується на встановленні функціональної залежності між геометричними параметрами друку та здатністю деталі протистояти високим навантаженням і на стадії проєктування оцінити експлуатаційну надійність відновлювальної деталі. Математичним вираженням цього зв'язку виступає модель визначення граничного тиску руйнування P_{max}.

$$P_{\text{макс}} = f(\sigma_{material}, \alpha, \rho, k_{layer})$$

де:

$\sigma_{material}$ – межа міцності матеріалу;

α – кут орієнтації шарів відносно вектора головних напружень;

ρ – щільність заповнення;

k_{layer} – коефіцієнт адгезії між шарами.

Ця модель дозволяє адаптувати технологію під конкретні умови та робочі навантаження на відновлені компоненти систем транспортних засобів шляхом варіювання параметрів укладання філаменту. Ми розраховуємо таку орієнтацію деталі на столі принтера, при якій вектори навантаження будуть перпендикулярні до меж шарів, що мінімізує ризик розшарування.

Перехід від розрахунку міцності деталі, яка надрукована на 3D принтері, до оцінки її комерційної придатності потребує формування комплексної вартісної моделі. В умовах сучасного автосервісу, де швидкість відновлення працездатності транспортного засобу є критичним конкурентним чинником, традиційні методи калькуляції собівартості, що враховують лише прямі витрати, є недостатніми. Для повного відображення економічної переваги виробництва методом 3D друку нами запропоновано модель сукупних витрат, яка об'єднує виробничу собівартість та втрати від простою техніки.

$$C_{total} = C_{mat} \cdot m + E \cdot t_{print} + A \cdot t_{print} + L_{loss} \cdot T_{downtime}$$

де:

$C_{mat} \cdot m$ – вартість матеріалу масою m;

$E \cdot t_{print}$ – витрати на електроенергію за час друку;

$A \cdot t_{print}$ – амортизація обладнання;

$L_{loss} \cdot T_{downtime}$ – збитки від простою автомобіля (грн-год), помножені на час очікування запчастини.

Запропонована модель сукупних витрат дозволяє провести об'єктивне пряме порівняння між традиційною схемою закупівлі запчастини у офіційного представника та її миттєвим виготовленням за допомогою адитивних технологій. Особливого значення ця модель набуває для комерційного транспорту, де показник часу не просто впливає на зручність, а є ключовим фінансовим чинником. У ситуаціях, коли година простою вантажного автомобіля або спецтехніки може коштувати підприємству від декількох сотень до тисяч гривень, швидкість виготовлення деталі стає стратегічним пріоритетом, що значно переважає вартість самого матеріалу. Застосування цієї формули у поєднанні з розрахунком руйнівного навантаження дозволяє автоматизувати прийняття рішень. Якщо розраховане значення сукупних витрат для адитивного методу є нижчим за сумарну вартість покупки та втрат від очікування, рекомендовано друк деталі.

Аналіз сучасного стану експлуатації систем транспортних засобів підтвердив, що традиційні методи ремонту та стратегії заміни вузлів на нові оригінальні компоненти в умовах глобальних логістичних криз стають неефективними. Ситуація ускладнюється дефіцитом складських запасів для застарілих або ексклюзивних моделей транспортних засобів, де термін очікування необхідної деталі може тривати тижнями. Головною перешкодою для впровадження адитивних технологій у процес відновлення високонавантажених деталей є анізотропна природа FDM-структур та відсутність методик, що інтегрують інженерну надійність з економічними показниками. Перехід до концепції «цифрових складів» (Digital Warehousing) потребує створення єдиного наукового інструментарію, здатного прогнозувати поведінку деталі під високим навантаженням.

На основі аналізу фізико-механічних процесів, що відбуваються всередині надрукованої деталі, запропоновано багатофакторну математичну модель прогнозування руйнівного тиску. Шляхом математичного варіювання вектора укладання філаменту відносно головних напружень стає можливим цілеспрямовано перерозподілити навантаження. Замість того, щоб навантажувати найбільш вразливі зони – міжшарові з'єднання, вектор сили спрямовується на суцільні армовані волокна композиту. Це дозволяє радикально мінімізувати ризики передчасного розшарування та забезпечити цілісність деталі навіть при великих навантаженнях. Припущено, що шляхом варіювання вектора укладання філаменту відносно головних напружень можна перерозподілити навантаження з міжшарових з'єднань на суцільні волокна композиту, що мінімізує ризики розшарування.

Для підприємства технічна придатність деталі автомобіля повинна обов'язково корелювати з економічною ефективністю. Розроблено модель сукупних витрат, яка, на відміну від існуючих підходів, враховує не лише виробничу собівартість, а й динамічні логістичні втрати від простою техніки. Це дозволило реалізувати інтегральний підхід Integrated Fuel Economy, де швидкість виготовлення запчастини стає домінуючим фактором при прийнятті рішення.

Запропонований аналітичний підхід дозволяє автоматизувати процес прийняття інженерних рішень. Розроблений алгоритм порівнює розрахований технічний запас міцності та економічну вигоду, видаючи рекомендацію щодо доцільності друку. Це перетворює адитивне виробництво з експериментальної технології на надійний інструмент управління технічним станом автопарку в межах Індустрії 4.0.

1. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П., Харжевський В. О. Дослідження міцнісних характеристик деталей отриманих за допомогою FDM друку із ABS 7 та COPET пластику. Міжвузівський збірник наукових праць (за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки»). Луцьк. Випуск 76. 2023 С. 147–152.

2. Кушнірчук А. С. Установка для дослідження на зносостійкість тіл отриманих FDM друком. The 9th International scientific and practical conference "Modern research in world science", November 28-30, 2022. Lviv, Ukraine. 2022. pp. 506–-509. Описано конструкцію установки для дослідження на зносостійкість тіл отриманих FDM друком.

3. "Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing", 2nd Edition By Ian Gibson (Deakin University, Australia), David Rosen (Georgia Institute of Technology, USA) and Brent Stucker (University of Louisville, USA), Springer Science+Business Media, New York, USA, 2015, 498 pages, ISBN: 978-1-4939-2112-6;

4. Ahn S, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK (2002), "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS". Rapid Prototyping Journal, Vol. 8 No. 4 pp. 248–257, doi: https://doi.org/10.1108/13552540210441166;

5. Armando Ramalho, Dino Freitas, Henrique Almeida, The anisotropy and friction effect in the design of 3D printed PLA parts – A case study, Materials Today: Proceedings, 2023, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.196;

6. J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P.J. Núñez, Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, Materials & Design, Volume 124, 2017, Pages 143-157, ISSN 0264-1275, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065;

7. Holmström J, Partanen J (2014), Digital manufacturing-driven transformations of service supply chains for complex products. Supply Chain Management: An International Journal, Vol. 19 No. 4 pp. 421–430, doi: https://doi.org/10.1108/SCM-10-2013-0387.

УДК 629.3.014.5:007.52

В.М. Корендій, О.Ю. Качур, Р.Г. Літвін, Р.Б. Карпин, М.В. Пилип, А.В. Похмурська
Національний університет «Львівська політехніка», Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ НАЗЕМНОГО РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ НА ГУСЕНИЧНОМУ ШАСІ

У тезах обґрунтовано конструкцію та динаміку наземного роботизованого комплексу на гусеничному шасі з маніпулятором типу SCARA. Комплекс містить платформу з демпфованою установчою плитою, блок керування та 5-DOF маніпулятор. Наведено параметри робочої зони, отримані шляхом комп'ютерного моделювання. Висвітлено результати натурних випробувань на пересіченій місцевості зі швидкістю 8 км/год за допомогою датчика WitMotion BWT901CL. Пікові вертикальні прискорення досягають від –0,85g до +1g, що подвоює динамічне навантаження на схоплювач. Обґрунтовано необхідність сили утримання об'єкта масою 1 кг на рівні не менше 20 Н.
***Ключові слова**: наземний роботизований комплекс, гусеничне шасі, маніпулятор типу SCARA, робоча зона, вертикальні прискорення, захватний пристрій, експериментальна перевірка.*

The paper substantiates the design and dynamics of a ground robotic complex on a tracked chassis with a SCARA manipulator. The system comprises a platform with a damped mounting plate, a control unit, and a 5-DOF manipulator. Workspace parameters from computer simulations are presented. The results of field testing on rough terrain at 8 km/h using a WitMotion BWT901CL sensor are highlighted. Peak vertical accelerations reach from –0.85g to +1g, doubling the dynamic load on the gripper. The necessity of ensuring a gripping force of at least 20 N for a 1 kg object is justified.
***Key words**: ground robotic complex, tracked chassis, SCARA-type manipulator, workspace, vertical acceleration, gripping device, experimental verification.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Сучасний розвиток засобів автоматизації та робототехніки демонструє стійку тенденцію до розширення сфери застосування наземних роботизованих комплексів (НРК). Особливо гостро потреба у впровадженні таких систем виникає під час виконання транспортно-технологічних та пошуково-рятувальних операцій у середовищах, де безпосередня присутність людини пов'язана з підвищеним ризиком для її життя та здоров'я. До таких умов належать зони радіаційного, хімічного чи біологічного забруднення, місця ліквідації наслідків техногенних та природних катастроф, зони проведення військових місій, а також території, що потребують гуманітарного розмінування.

Для ефективної роботи у складних умовах довкілля мобільний робот повинен поєднувати в собі високі показники прохідності, стійкості під час подолання штучних і природних перешкод, а також здатність стабільно нести технологічне обладнання, зокрема маніпуляційні системи, забезпечуючи високу точність позиціювання їхніх робочих органів. З огляду на це, актуальним науково-прикладним завданням є створення та дослідження компактних вітчизняних наземних платформ на гусеничному шасі, які спроможні виконувати складні маніпуляційні та логістичні операції на пересіченій місцевості без втрати керованості, динамічної стійкості та загальної функціональності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематиці проєктування, моделювання та аналізу мобільних роботизованих платформ присвячено значну кількість сучасних наукових праць. Загальний огляд конструктивних схем, систем підвіски та рушіїв гусеничного типу, що застосовуються для наземних мобільних роботів, детально викладено у фундаментальних оглядових роботах [1]. Питання автономного планування траєкторій руху та алгоритмів навігації мобільних платформ у складних просторових умовах досліджено у праці [2]. Особливості динамічного моделювання та оптимізації конструкцій гусеничних комплексів спеціального призначення, зокрема для гуманітарного розмінування та переміщення нерівними опорними поверхнями, висвітлено у дослідженнях [3, 4].

Попередні етапи кінематичного аналізу мобільного гусеничного робота, оснащеного маніпулятором типу SCARA, були успішно реалізовані авторами у роботах [5, 6]. Водночас більшість існуючих публікацій обмежується теоретичним описом кінематики або чисельним моделюванням ідеалізованих умов руху. Наукова новизна пропонованого дослідження полягає у комплексному

поєднанні конструктивного аналізу компоновки НРК з експериментальною оцінкою реальних вертикальних прискорень під час руху пересіченою місцевістю. Такий підхід дає змогу сформувати обґрунтовану методику розрахунку та проєктування виконавчих елементів, зокрема силових параметрів захватного пристрою.

Виклад основного матеріалу дослідження. Досліджуваний наземний роботизований комплекс (рис. 1) інтегрує в собі три взаємопов'язані функціональні підсистеми: мобільну гусеничну платформу, електронний блок керування та маніпулятор типу SCARA. Вибір такої компоновки є конструктивно та технологічно доцільним для операцій із циліндричними об'єктами невеликої маси. Механізм SCARA забезпечує високу швидкість та точність переміщення робочого органа в горизонтальній площині, тоді як гусеничне шасі гарантує високу прохідність та можливість підведення маніпулятора безпосередньо до об'єкта маніпулювання.

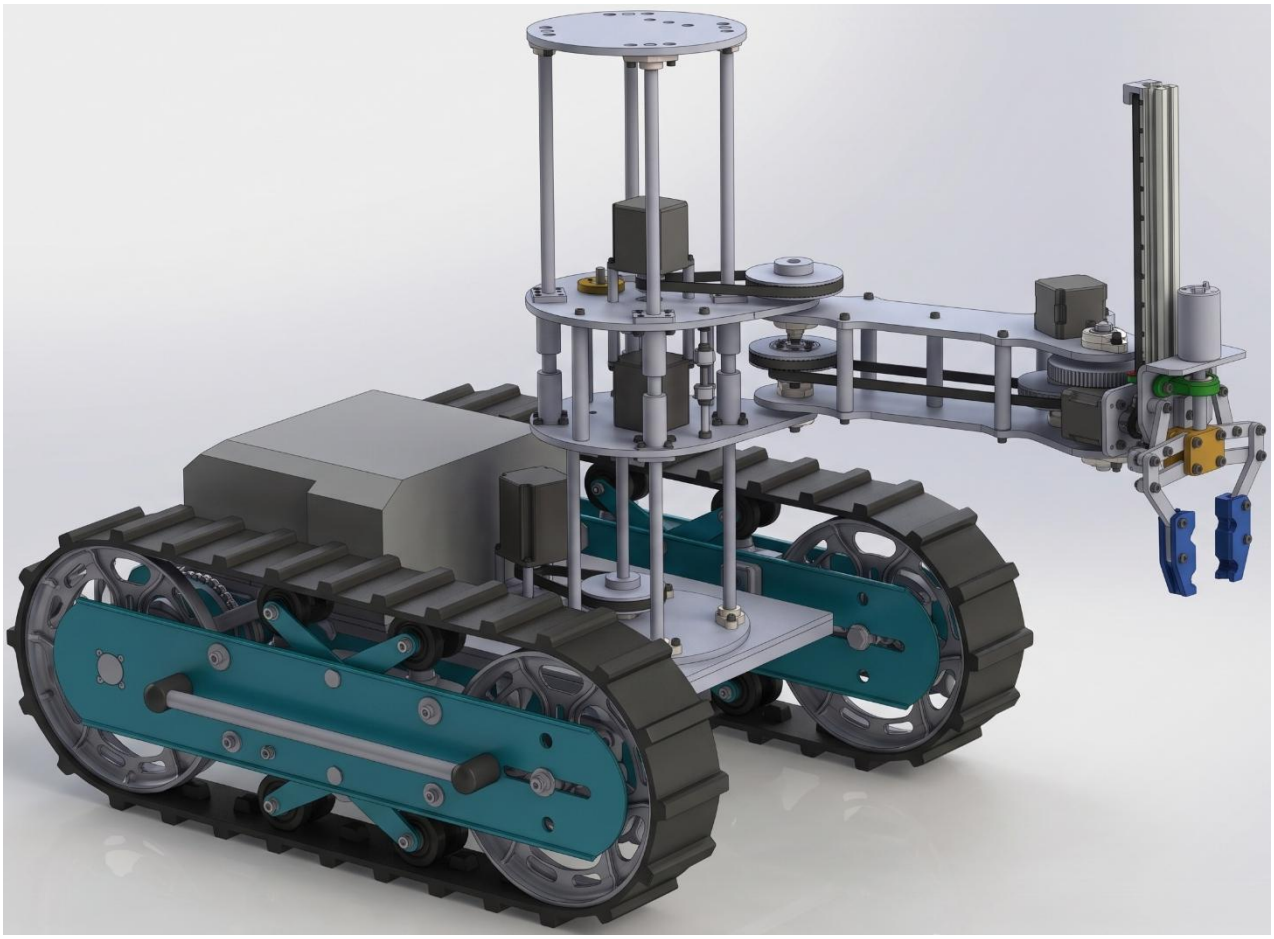


Рис. 1. Загальний вигляд досліджуваного роботизованого комплексу

Базою комплексу є двогусенична платформа з двома бортовими рушіями. Основним конструктивним рішенням для захисту прецизійного обладнання є те, що установча плита, на якій закріплено маніпулятор та блок електроніки, підвішена до гусеничних модулів через спеціалізовані гумові або поліуретанові демпфери. Це дозволяє суттєво мінімізувати ударні й коливальні впливи на несучу систему під час подолання мікропрофілю нерівностей. Передні колеса шасі є веденими й виконують функцію регулювання натягу гусеничних стрічок. Задні колеса є ведучими й приводяться в рух від мотор-редукторів через ланцюгові передачі. Для стабілізації просторового положення гусениць та підтримання оптимального натягу під час подолання перешкод у конструкції шасі реалізовано додаткові V-подібні важільні механізми.

Кожен бортовий привод НРК укомплектовано електродвигуном потужністю 100 Вт із номінальною напругою живлення 24 В. Передаточне число інтегрованого редуктора становить 20, що забезпечує номінальну вихідну частоту обертання 150 об/хв. З урахуванням передаточного числа ланцюгової передачі, яке дорівнює 1,5, розроблене шасі здатне розвивати лінійну швидкість руху в межах 8–10 км/год, упевнено долати поодинокі перешкоди заввишки до 0,3 м та працювати в автономному режимі не менше 2 годин.

Маніпулятор типу SCARA змонтовано на окремій плиті платформи. Його вертикальне переміщення (грубе позиціювання по висоті) здійснюється за допомогою гвинтової пари з пасовою передачею від електродвигуна. На рухомій платформі встановлено приводи повороту першої та другої ланок, які передають крутний момент через зубчасті пасові передачі. Поворот самого захватного вузла реалізовано через зубчастий сектор, а локальне високоточне коригування вертикального положення захвату вздовж напрямної забезпечується окремим малогабаритним приводом. Маніпулятор має 5 ступенів вільності (два поступальні переміщення і три обертальні пари). Геометричні параметри ланок становлять: базова стійка – 120 мм, послідовні ланки механізму – 300 мм, 300 мм та 87 мм відповідно.

Аналітичний опис положення захвату за допомогою узагальнених координат було верифіковано шляхом твердотільного моделювання у середовищі SolidWorks та чисельних розрахунків у MathCad. Результати моделювання визначили межі робочої зони: максимальне переміщення вздовж осі *Ox* становить близько 1300 мм; максимальне переміщення вздовж осі *Oy* становить близько 840 мм; вертикальні межі переміщення захвату становлять від –200 мм до +300 мм відносно плити кріплення.

Для експериментального підтвердження працездатності комплексу було створено повномасштабний лабораторний прототип (рис. 2) та проведено серію натурних випробувань під час руху пересіченою місцевістю зі швидкістю близько 8 км/год. Реєстрацію вертикальних прискорень корпусу в зоні кріплення маніпулятора (де формуються основні інерційні навантаження) здійснювали за допомогою високоточного датчика WitMotion BWT901CL. Дані передавалися на ПК через Bluetooth-інтерфейс та оброблялися в MathCad.

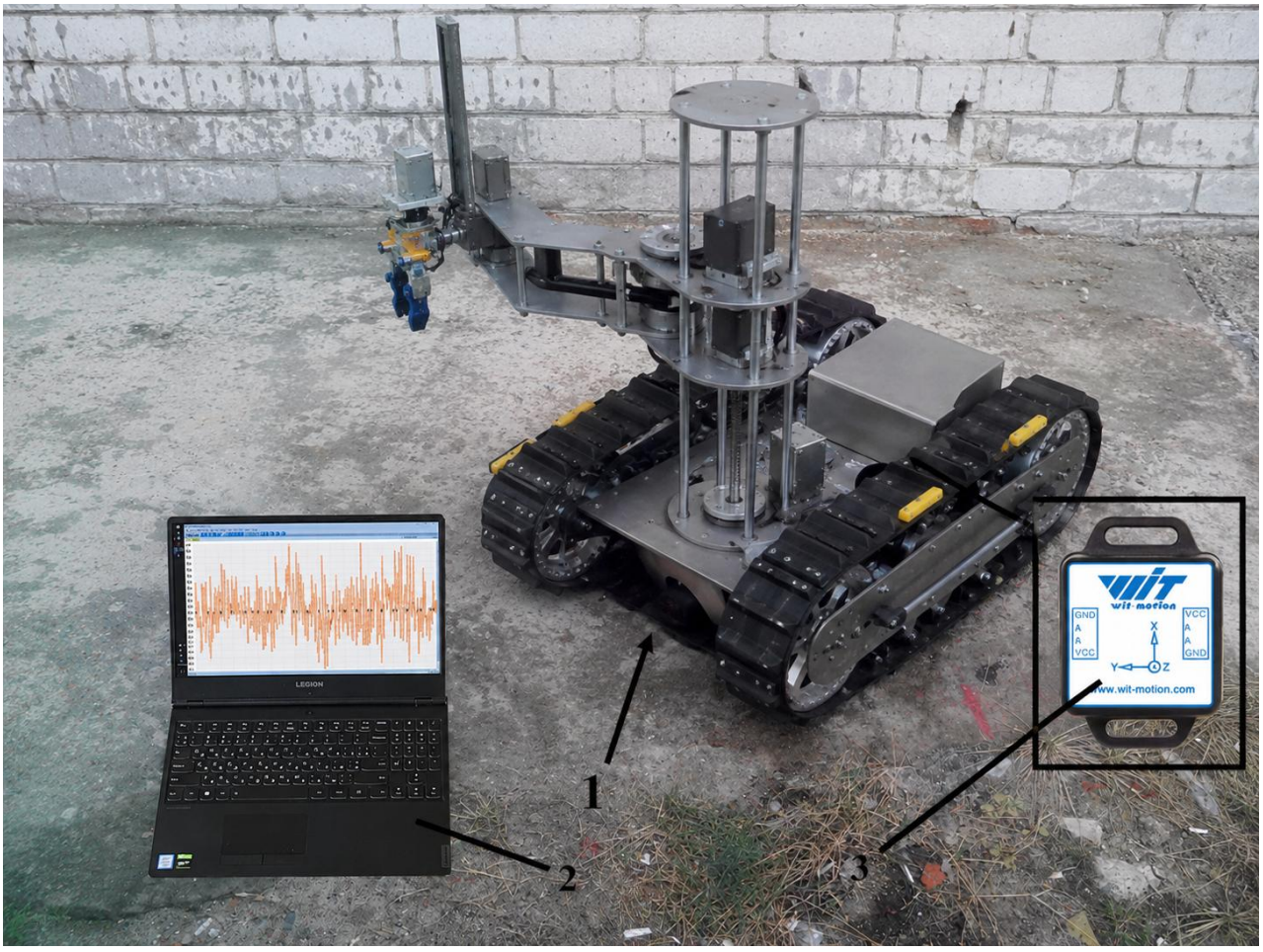


Рис. 2. Експериментальний зразок гусеничної платформи

Аналіз отриманих часових залежностей показав, що під час руху нерівним рельєфом корпус зазнає значних коливальних збурень: максимальне вертикальне прискорення в додатному напрямку досягало 1*g* (або 9,81 м/с²); максимальне прискорення у від'ємному напрямку становило 0,85*g* (або 8,34 м/с²). Це свідчить про те, що під час транспортування об'єкта масою до 1 кг у захваті виникають

динамічні перевантаження, які практично подвоюють розрахункове вертикальне навантаження на робочий орган. Отже, під час проєктування та силового розрахунку виконавчого органа (захвату) силу утримання об'єкта необхідно закладати на рівні не менше 20 Н.

Висновки. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі узагальнюючі висновки:

1. Запропонована конструктивна схема, що поєднує мобільну гусеничну платформу із демпфованою установчою плитою та маніпулятор типу SCARA, є ефективним компромісом між високою прохідністю комплексу та точністю виконання площинних технологічних операцій.

2. Проведені натурні експериментальні дослідження динаміки руху платформи пересіченою місцевістю зі швидкістю 8 км/год зафіксували пікові вертикальні прискорення на рівні від –0,85g до +1g. Це зумовлює виникнення значних інерційних навантажень, які майже вдвічі перевищують статичну вагу об'єкта маніпулювання.

3. На основі отриманих експериментальних даних встановлено, що для надійного утримання циліндричних деталей масою 1 кг в умовах руху нерівним рельєфом мінімальна зумовлена сила утримання захвату повинна становити 20 Н, із забезпеченням відповідного запасу міцності та жорсткості для шарнірних вузлів і приводів.

4. Результати дослідження формують вихідні передумови для подальшого вдосконалення підвіски шасі, оптимізації параметрів трансмісії та синтезу законів керування, спрямованих на компенсацію коливальних збурень маніпулятора під час руху.

Бібліографія

[1] Bruzzone L., Nodehi S. E., Fanghella P. Tracked locomotion systems for ground mobile robots: A review // Machines. – 2022. – Vol. 10, No. 8. – Art. 648.

[2] Qin H. Review of autonomous path planning algorithms for mobile robots / H. Qin, S. Shao, T. Wang, X. Yu, Y. Jiang, Z. Cao // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 3. – Art. 211.

[3] Petrişor S. M. Humanitarian demining serial-tracked robot: Design and dynamic modeling / S. M. Petrişor, M. Simion, G. Bârsan, O. Hancu // Machines. – 2023. – Vol. 11, No. 5. – Art. 548.

[4] Ugenti A. Analysis of an all-terrain tracked robot with innovative suspension system / A. Ugenti, R. Galati, G. Mantriota, G. Reina // Mechanism and Machine Theory. – 2023. – Vol. 182. – Art. 105237.

[5] Korendiy V. Analysis of kinematic characteristics of a mobile caterpillar robot with a SCARA-type manipulator / V. Korendiy, O. Kachur, M. Boikiv, Yu. Novitskyi, O. Yaniv // Transport Technologies. – 2023. – Vol. 4, No. 2. – P. 56–67.

[6] Корендій В. М., Качур О. Ю., Карпин Р. Б., Пилип М. В., Предко Р. Я. Загальна конструкція та експериментальна перевірка наземного роботизованого комплексу на гусеничному шасі з маніпулятором типу Scara // Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту : матеріали XIV Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (Вінниця, 14-16 квітня 2026 р.). – 2026. – С. 261–265.

[7] Корендій В. М., Качур О. Ю., Пилип М. В., Карпин Р. Б. Проблеми оцінювання пікових моментів і моделювання «стрес-траєкторій» маніпулятора TELEMAX EVO PLUS // Молода наука – роботизація і нанотехнології сучасного машинобудування : збірник наукових праць Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції (Краматорськ, 15–17 квітня 2026 р.). – 2026. – С. 221–227.

КОРЕНДІЙ Віталій Михайлович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: vitalii.m.korendii@lpnu.ua

КАЧУР Олександр Юрійович – д-р філософії, доцент кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: oleksandr.y.kachur@lpnu.ua

ЛІТВІН Роман Григорович – д-р філософії, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, НУ «Львівська політехніка», e-mail: roman.h.litvin@lpnu.ua

КАРПИН Роман Богданович – аспірант кафедри прикладної математики, НУ «Львівська політехніка», e-mail: roman.b.karpyn@lpnu.ua

ПИЛИП Михайло Васильович – аспірант кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: mykhailo.v.pylyp@lpnu.ua

ПОХМУРСЬКА Анна Володимирівна – к.т.н., асистент кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: anna.v.pokhmurska@lpnu.ua

УДК 621.43.068:629.33:620.91

В.М. Корендій, О.Й. Коцюмбас, Р.Г. Літвін, Л.С. Угрин, Н.О. Гембара, А.М. Кучеренко
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В СУЧАСНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ТА ТРАНСПОРТНО-ДОРОЖНІХ СИСТЕМАХ: ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ

У роботі проведено всебічний аналіз сучасних технологій рекуперації енергії в автомобільному транспорті. Досліджено системи рекуперативного гальмування (RBS), рекуперативної підвіски (RSS), утилізації відпрацьованого тепла (WHR) за допомогою термоелектричних генераторів (TEG) та органічного циклу Ренкіна (ORC), а також механічні маховики (KERS). Встановлено, що RBS забезпечує до 30% повернення енергії в міському циклі, тоді як RSS здатна генерувати понад 300 Вт потужності на нерівних покриттях. Визначено потенціал гібридних систем рекуперації, що підвищують загальну енергоефективність на 8–12%. Дослідження підкреслює критичну роль рекуперації для досягнення цілей щодо скорочення викидів CO_2 на понад 30% до 2035 року.
***Ключові слова**: рекуперація енергії, енергоефективність, рекуперативне гальмування, рекуперативна підвіска, термоелектричні генератори, органічний цикл Ренкіна, гібридні автомобілі.*

The paper provides a comprehensive analysis of modern energy recovery technologies in road transport. Systems of regenerative braking (RBS), regenerative suspension (RSS), waste heat recovery (WHR) using thermoelectric generators (TEG) and the organic Rankine cycle (ORC), and mechanical flywheels (KERS) are investigated. It is established that RBS provides up to 30% energy recovery in the urban cycle, while RSS is capable of generating over 300 W of power on uneven surfaces. The potential of hybrid recovery systems, which increase overall energy efficiency by 8–12%, is determined. The study highlights the critical role of recovery in achieving CO_2 emission reduction targets of over 30% by 2035.
***Key words**: energy recovery, energy efficiency, regenerative braking, regenerative suspension, thermoelectric generators, organic Rankine cycle, hybrid electric vehicles.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Сучасна парадигма розвитку автомобільної галузі визначається жорсткими вимогами до екологічної безпеки та енергетичної ефективності (рис. 1). Глобальні кліматичні зміни та вичерпність викопних енергоресурсів змушують світову спільноту переглядати підходи до проектування транспортних засобів. Згідно з актуальними регуляторними актами, викиди CO_2, що будуть зареєстровані до 2035 року, повинні бути скорочені на 37,5% для легкових авто та 31% для комерційного сегменту [1]. Така динаміка ставить перед інженерною думкою завдання не просто вдосконалення існуючих систем, а розробки принципово нових механізмів управління енергетичним балансом автомобіля.

Проблема енергоефективності в транспортному секторі є багатовекторною. Традиційний автомобіль з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ) є вкрай неефективною системою з погляду використання первинної енергії палива. Статистичні дані свідчать, що лише близько 20% хімічної енергії палива в кінцевому підсумку перетворюється на корисну механічну роботу, необхідну для руху транспортного засобу [2]. Решта енергії – понад дві третини – безповоротно втрачається у вигляді відпрацьованого тепла через вихлопну систему, радіатори охолодження, а також внаслідок механічного тертя та вібрацій [3]. Навіть у випадку з електромобілями (EV) та водневими транспортними засобами на паливних елементах (HPEV), де ККД перетворення енергії значно вищий, проблема обмеженого запасу ходу та деградації накопичувачів енергії залишається ключовим бар'єром для масового впровадження [4].

Рекуперація енергії, як процес повернення частини потужності, що традиційно розсіюється, назад у систему для повторного використання, є найбільш перспективним шляхом вирішення окреслених проблем. В автомобілі існують три основні домени, де енергія втрачається в значних обсягах: кінетична енергія під час гальмування, механічна енергія коливань підвіски при русі по нерівностях та теплова енергія відпрацьованих газів [5]. Кожен із цих доменів вимагає специфічних технологічних рішень для ефективного збору енергії.

Важливою частиною проблеми є також постійне зростання маси сучасних транспортних засобів. Прагнення виробників забезпечити високий рівень пасивної та активної безпеки (системи

ADAS), комфорту та інформаційної насиченості призводить до збільшення ваги шасі, кузовних елементів та електроніки. Наприклад, лише джгути електропроводки в сучасних автомобілях можуть важити близько 70 кг [6]. Збільшення маси, з одного боку, погіршує паливну економічність, але з іншого – створює більший потенціал для рекуперації кінетичної енергії гальмування, оскільки обсяг доступної для збору енергії прямо пропорційний масі автомобіля [7]. Це створює складну інженерну дилему, що вимагає багатокритеріальної оптимізації.

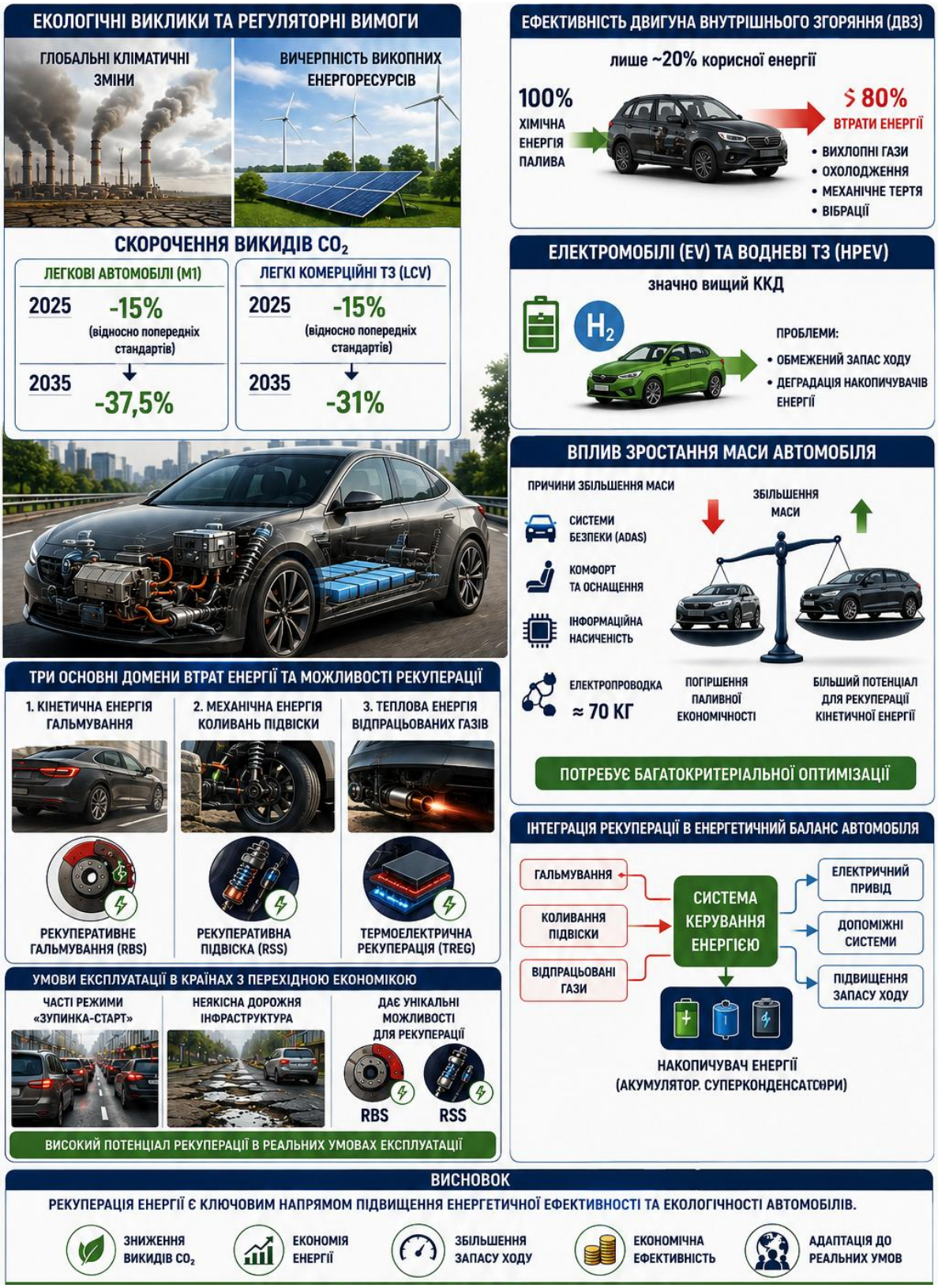


Рис. 1. Структура сучасної парадигми розвитку автомобільної галузі

Окремого розгляду потребує контекст країн з перехідною економікою та регіонів з недосконалою дорожньою інфраструктурою. В таких умовах автомобілі часто експлуатуються в режимах частих циклів «зупинка-старт» та зазнають значних вібраційних навантажень через нерівності покриття. Це створює унікальні можливості для використання систем рекуперативного гальмування (RBS) та рекуперативної підвіски (RSS), які зазвичай менш ефективні на ідеальних швидкісних магістралях розвинених країн [8]. Таким чином, дослідження можливостей рекуперації має не лише загальнотехнічне, а й глибоке прикладне значення для оптимізації транспорту в специфічних експлуатаційних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останнього десятиліття спостерігається інтенсифікація досліджень у сфері автомобільних енергозберігаючих технологій. Наукова література охоплює широкий спектр систем: від традиційних систем рекуперації кінетичної енергії (KERS) до складних термоелектричних перетворювачів на основі нанотехнологій [9].

Аналіз публікацій за період 2020–2025 років дозволяє виділити кілька ключових трендів. По-перше, значна частина робіт присвячена вдосконаленню систем рекуперативного гальмування (RBS) для електромобілів. Дослідники зосереджуються на розробці складних алгоритмів керування, таких як нечітка логіка (fuzzy control) та прогнозоване моделювання (MPC – model predictive control), з метою максимізації повернення енергії без шкоди для стабільності та безпеки руху [9]. Важливим аспектом останніх досліджень є вивчення впливу зовнішніх факторів на ефективність RBS. Зокрема, встановлено, що при низьких температурах навколишнього середовища ефективність рекуперації суттєво знижується через обмеження швидкості хімічних реакцій у літій-іонних батареях [9].

Другим важливим напрямком є дослідження рекуперативних систем підвіски (RSS). На відміну від RBS, які діють лише під час сповільнення, RSS здатні збирати енергію безперервно під час руху автомобіля [10]. Публікації останніх років класифікують такі системи за принципом дії на електромагнітні, гідравлічні та п’єзоелектричні [11]. Значний внесок у розуміння потенціалу RSS зробили праці, що пов’язують вихідну потужність системи з мікропрофілем дороги. Доведено, що потужність рекуперації зростає експоненціально залежно від класу нерівності покриття (від A до E за класифікацією ISO) [11].

Третій домен досліджень охоплює рекуперацію відпрацьованого тепла (WHR). Тут домінують дві технології: термоелектричні генератори (TEG) та органічний цикл Ренкіна (ORC). Дослідження в галузі матеріалознавства призвели до створення нових термоелектричних матеріалів, таких як скуттерудити та наноструктуровані сплави, які мають високий показник добротності (ZT) у діапазоні температур вихлопних газів [12]. Щодо ORC, останні роботи фокусуються на підборі оптимальних робочих тіл (фреонів та сумішей) та розробці малогабаритних розширювальних машин для інтеграції в легкові автомобілі [13].

Окрему увагу в сучасній літературі приділено гібридним системам рекуперації. Дослідники стверджують, що комбінування різних методів (наприклад, RBS та RSS) дозволяє досягти синергетичного ефекту, забезпечуючи як високу пікову потужність при гальмуванні, так і стабільне енергоживлення допоміжних систем під час рівномірного руху [10]. Це особливо актуально для водневих транспортних засобів (HPEV), де кожна одиниця збереженої енергії дозволяє суттєво розширити запас ходу та зменшити навантаження на дорогі паливні елементи [4].

Незважаючи на велику кількість робіт, залишаються дискусійними питання компромісу між масою системи рекуперації та її реальною енергетичною вигодою, а також проблеми надійності та довговічності складних електромеханічних вузлів у реальних умовах експлуатації. Саме на цих аспектах фокусується дане дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження можливостей рекуперації енергії в автомобілі вимагає детального аналізу кожної підсистеми окремо, а також їхньої взаємодії в межах єдиної енергетичної мережі транспортного засобу. Сучасний автомобіль слід розглядати як складну термодинамічну та механічну систему, в якій кожен вузол є потенційним джерелом енергії (рис. 2).

Система рекуперативного гальмування (RBS) на сьогодні є найбільш технологічно зрілою та широко впровадженою. Її робота базується на принципі оборотності електричних машин: тяговий електродвигун під час сповільнення переходить у режим генератора, перетворюючи кінетичну енергію руху в електричну. Отримана енергія через інвертор спрямовується до акумуляторної батареї або суперконденсаторів. Ефективність RBS у реальних умовах експлуатації залежить від циклу руху та стратегії керування. У міському циклі (наприклад, за методикою FTP75 або WLTC) спостерігається найбільша кількість циклів сповільнення, що робить RBS критично важливою для гібридів та

електромобілів. Для типового міського електромобіля рекуперація дозволяє повернути до 30% енергії, витраченої на розгін.

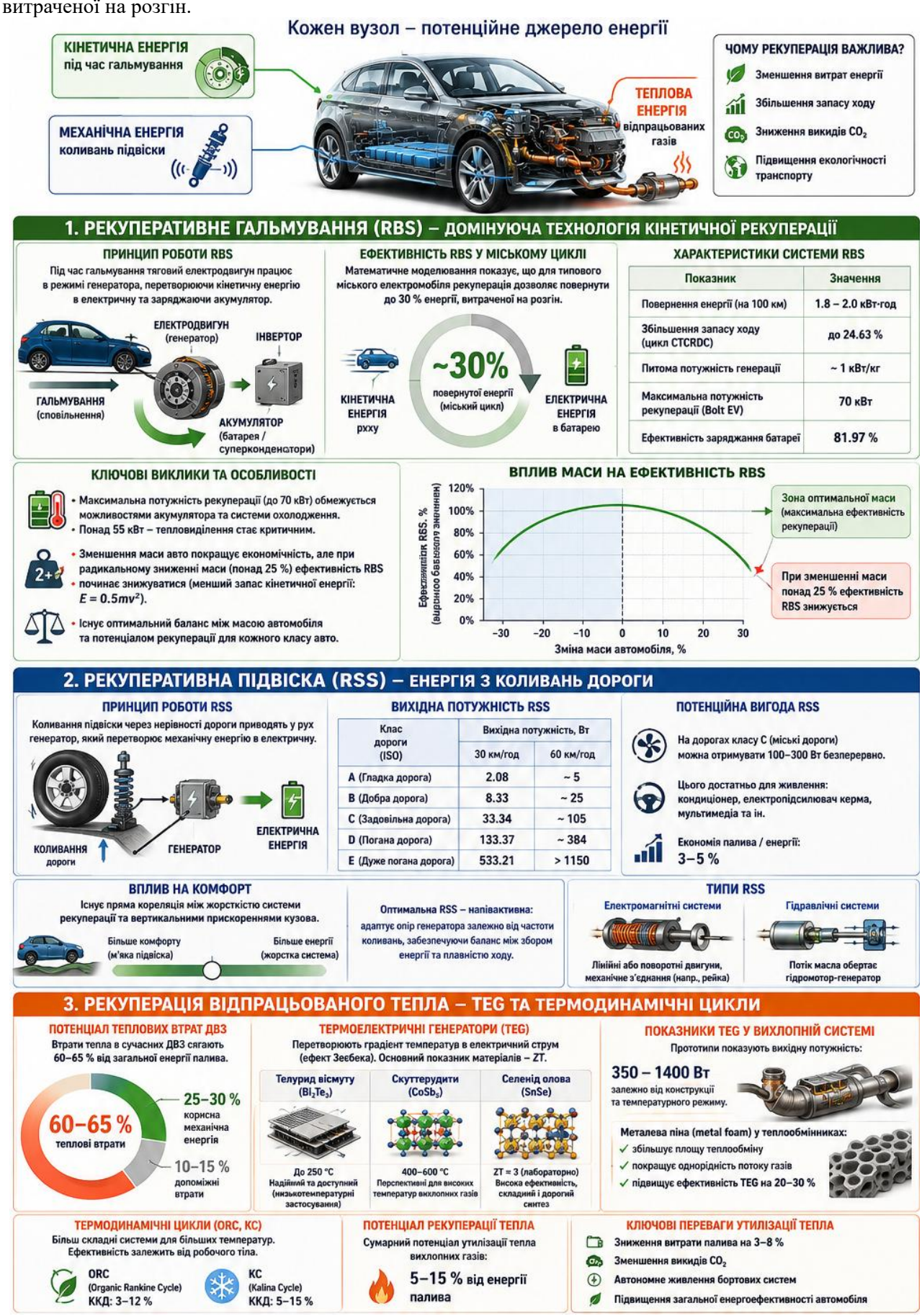


Рис. 2. Структура потенційних джерел енергії в автомобілі

Рекуперативна підвіска (RSS) є інноваційним рішенням, що дозволяє утилізувати механічну енергію, яка зазвичай витрачається на нагрівання робочої рідини в амортизаторах. У процесі руху колеса постійно здійснюють вертикальні коливання через мікронерівності дороги. Традиційна підвіска гасить ці коливання для забезпечення комфорту, тоді як RSS використовує цей рух для вироблення електроенергії [14]. Потужність генерації зростає експоненціально зі збільшенням шорсткості покриття та швидкості руху. Наприклад, на дорогах класу С (типові міські дороги) пасажирський автомобіль може генерувати близько 100-300 Вт енергії безперервно. Хоча це не порівнянно з потужністю двигуна, такої кількості енергії достатньо для живлення систем кондиціонування, електропідсилювача керма або мультимедійного комплексу, що в сукупності дає економію палива на рівні 3–5%.

Втрати тепла в сучасних ДВЗ досягають 60–65% від загальної енергії палива [15]. Утилізація цього тепла є одним із найскладніших інженерних завдань через низьку щільність теплової енергії та складність інтеграції теплообмінників у обмежений простір підкапотного відділення. Прототипи термоелектричних генераторів (TEG), інтегровані у вихлопну систему, показують вихідну потужність від 350 Вт до 1400 Вт залежно від конструкції та температурного режиму. Використання металевої піни (metal foam) у теплообмінниках дозволяє підвищити ефективність збору тепла на 283% порівняно з традиційними трубчастими конструкціями.

Для великих транспортних засобів, таких як магістральні вантажівки та автобуси, більш ефективною є технологія ORC (органічного циклу Ренкіна). Вона передбачає нагрівання робочої рідини теплом вихлопних газів до стану пари, яка потім обертає турбіну або поршневий розширювач. Незважаючи на високу теоретичну ефективність (піковий ККД циклу до 23,7%), системи ORC залишаються дорогими та масивними. Основним драйвером ринку ORC (обсяг якого у 2024 році оцінюється в 18,8 млрд доларів) є промисловий сектор, тоді як в автомобілебудуванні спостерігається стійкий інтерес з боку виробників важкої комерційної техніки, таких як Mitsubishi Heavy Industries.

Механічні системи рекуперації (KERS) використовують масивний маховик, що обертається з високою швидкістю (до 60000 об/хв) у вакуумному корпусі. Енергія під час гальмування передається на маховик через безступінчату трансмісію (CVT). Основною перевагою маховиків є їхня здатність приймати та віддавати велику потужність за дуже короткий час без деградації, властивої хімічним акумуляторам. Це робить їх ідеальними для спортивних автомобілів та міських автобусів. Дослідження показують, що механічний KERS може забезпечити до 39% економії палива в інтенсивних перехідних режимах руху. Маховик дозволяє скоротити час розгону 0–100 км/год на 18,25% та суттєво зменшує навантаження на основну батарею гібрида, подовжуючи її термін служби.

Найбільш перспективним напрямком є створення гібридних систем рекуперації, які об'єднують кілька джерел. Наприклад, комбінація RBS та RSS дозволяє компенсувати недоліки кожної системи. RBS забезпечує високі імпульси енергії при гальмуванні (до 2 кВт на піку в симуляторах), тоді як RSS дає безперервний потік (0,3 кВт·год/100 км), що в сумі покращує енергоефективність на 8–12%.

Висновки. За результатами проведеного дослідження можливостей рекуперації енергії в автомобілі можна зробити такі узагальнюючі висновки:

1. Рекуперативне гальмування (RBS) залишається найефективнішим методом збереження енергії, забезпечуючи до 25-30% економії палива в умовах міського циклу. Основним обмеженням для подальшого зростання ефективності RBS є термічна стабільність акумуляторних батарей при високих струмах заряду та зниження ефективності при від’ємних температурах.

2. Рекуперативна підвіска (RSS) має значний невикористаний потенціал, особливо для транспортних засобів, що експлуатуються на дорогах низької якості. Здатність генерувати до 300 Вт і більше на нерівному покритті дозволяє RSS стати автономним джерелом живлення для допоміжної електроніки, знімаючи це навантаження з тягової батареї.

3. Технології рекуперації відпрацьованого тепла (TEG та ORC) є критично важливими для підвищення ККД автомобілів з ДВЗ та гібридів. Впровадження нових напівпровідникових матеріалів, таких як скуттерудити, та оптимізація теплообмінників дозволяють отримувати понад 1 кВт корисної електричної потужності з тепла вихлопу.

4. Механічні маховики (KERS) демонструють найкращу ефективність у перехідних режимах (до 39% економії палива) і є оптимальним рішенням для інтенсивної експлуатації, оскільки вони не мають обмежень щодо циклів заряду-розряду, характерних для хімічних батарей.

5. Синергія різних методів рекуперації в межах одного транспортного засобу дозволяє досягти комплексного покращення енергоефективності на рівні 15-20 %. Майбутнє галузі належить інтелектуальним системам управління енергією, які використовують дані про дорожній профіль та стан трафіку для динамічної оптимізації процесів збору енергії.

Таким чином, детальний аналіз та впровадження розглянутих можливостей рекуперації є необхідною умовою для створення конкурентоспроможного, екологічного та енергоефективного транспорту наступного покоління, здатного відповідати викликам 2030-х років.

Бібліографія

[1] Candela A., Sandrini G., Gadola M., Chindamo D., Magri P. Lightweighting in the automotive industry as a measure for energy efficiency: Review of the main materials and methods // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, No. 8. – Article e29728.

[2] Regenerative braking and suspension system [Електронний ресурс]. – Режим доступу: Scribd document (дата звернення: 15.05.2026).

[3] Achiței L., Achiței G., Sachelarie D., Popescu A. Thermoelectric generators in automotive applications: a comprehensive review of concepts, materials, and integration strategies // Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine Constructions Section. – 2025. – Vol. 71(75), No. 4. – P. 103–114.

[4] Abe B. T., Fajuke I. D. A systematic review of energy recovery and regeneration systems in hydrogen-powered vehicles for deployment in developing nations // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 16. – Article 4412.

[5] Pan J., Song C., Zhang Y., Zhu Z., Dang T. A review of the overall efficiency of automotive energy recovery systems in extending travel range // Proceedings of the CONF-MCEE 2026 Symposium: Advances in Sustainable Aviation and Aerospace Vehicle Automation. – 2025. – URL: https://doi.org/10.54254/2755-2721/2026.KA27418 (дата звернення: 15.05.2026).

[6] Candela A., Sandrini G., Gadola M., Chindamo D., Magri P. Lightweighting in the automotive industry as a measure for energy efficiency: review of the main materials and methods // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, No. 8. – Article e29728.

[7] Liu J., Hu C., Qiu Q., Kang J., Peng X. Comparative evaluation of energy recovery systems for enhanced automotive overall efficiency // Proceedings of the CONF-MCEE 2026 Symposium: Advances in Sustainable Aviation and Aerospace Vehicle Automation. – 2025. – P. 83–96.

[8] Zu E.-H., Shu M.-H., Huang J.-C., Lin H.-T. Energy recovery decision of electric vehicles based on improved fuzzy control // Processes. – 2024. – Vol. 12, No. 12. – Article 2919.

[9] Szumska E. M. Regenerative braking systems in electric vehicles // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 10. – Article 2422.

[10] Rao S., Kumar P., Sharma R., Singh A. Comparative analysis of regenerative braking and suspension energy harvesting systems in electric vehicles // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2025. – Vol. 12, No. 11. – P. 1183–1188.

[11] Lv X., Ji Y., Zhao H., Zhang J., Zhang G., Zhang L. Research review of a vehicle energy-regenerative suspension system // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 2. – Article 441.

[12] Achiței L., Achiței G., Sachelarie D., Popescu A. Thermoelectric generators in automotive applications: a comprehensive review of concepts, materials, and integration strategies // Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine Constructions Section. – 2025. – Vol. 71(75), No. 4. – P. 103–114.

[13] Alharbi S. Balancing efficiency and economics in organic Rankine cycle waste heat recovery systems for marine applications // JMSE (Journal of Marine Science and Engineering). – 2026. – Vol. 14, No. 3. – Article 264.

[14] Demir V. G., Savran E. The role of regenerative suspension in energy-efficient and comfortable electric vehicle driving // Engineering Perspective. – 2026. – Vol. 6, No. 3. – P. 344–353.

[15] Khan M. A., Sharma R., Patel S. A review of thermoelectric generators for automotive waste heat recovery systems // TechRxiv. – 2025. – URL: https://doi.org/10.36227/techrxiv.173921139.97677264 (дата звернення: 15.05.2026).

КОРЕНДІЙ Віталій Михайлович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: vitalii.m.korendii@lpnu.ua

КОЦЮМБАС Олег Йосифович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, НУ «Львівська політехніка», e-mail: oleh.y.kotsiumbas@lpnu.ua

ЛІТВІН Роман Григорович – д-р філософії, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, НУ «Львівська політехніка», e-mail: roman.h.litvin@lpnu.ua

УГРИН Любомир Степанович – к.т.н., доцент, доцент кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: liubomyr.s.uhryn@lpnu.ua

ГЕМБАРА Наталія Олександрівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв, НУ «Львівська політехніка», e-mail: nataliia.o.hembara@lpnu.ua

КУЧЕРЕНКО Анастасія Миколаївна – асистент кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: anastasiia.m.kucherenko@lpnu.ua

УДК 656.01:005.932

В.І.Котенко
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

ЛОГІСТИЧНІ СТРАТЕГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛАНЦЮГІВ ПОСТАЧАННЯ

Розглянуто сучасні логістичні стратегії, що застосовуються для підвищення ефективності ланцюгів постачання. Акцентовано увагу на інтегрованому використанні Lean, Agile, Resilient, Green та Sustainable підходів. Визначено, що Lean-стратегія спрямована на скорочення витрат і втрат, Agile забезпечує гнучкість та швидку реакцію на зміни, Resilient підвищує стійкість до ризиків та збоїв, Green зменшує негативний екологічний вплив, а Sustainable формує основу довгострокового розвитку ланцюгів постачання.

Ключові слова: *логістичні стратегії, ланцюги постачання, Lean, Agile, Resilient, Green, Sustainable, ефективність логістики.*

Modern logistics strategies applied to improve the efficiency of supply chains are considered. Emphasis is placed on the integrated use of Lean, Agile, Resilient, Green, and Sustainable approaches. It is determined that the Lean strategy is aimed at reducing costs and waste, Agile ensures flexibility and rapid response to changes, Resilient increases resistance to risks and disruptions, Green reduces negative environmental impact, and Sustainable forms the basis for the long-term development of supply chains.

Key words: *logistics strategies, supply chains, Lean, Agile, Resilient, Green, Sustainable, logistics efficiency.*

У сучасних умовах ланцюги постачання функціонують під впливом нестабільності ринку, коливань попиту, зростання транспортних витрат, екологічних вимог і ризиків порушення поставок. При цьому традиційне управління, орієнтоване лише на мінімізацію витрат, не забезпечує достатньої ефективності. Підприємствам необхідно одночасно досягати економії ресурсів, швидко реагувати на зміни, зберігати стійкість до збоїв, зменшувати негативний екологічний вплив та забезпечувати довгострокову сталість функціонування.

Особливо актуальним це завдання є для ресурсних та глобальних ланцюгів постачання, де важливими чинниками є географічна доступність ресурсів, надійність транспортування, тривалість маршрутів та залежність від постачальників. Оскільки сировина є початковою ланкою виробничих процесів, тому оптимізація логістики має враховуватися вже на етапі планування ланцюгів постачання, а не лише на подальших виробничих стадіях [1].

Питання логістичних стратегій у ланцюгах постачання розглядається у працях міжнародних дослідників [1–3]. У дослідженні S. Trojahn [1] розкрито логістичні стратегії для ресурсних ланцюгів постачання. Автор наголошує, що вибір логістичної стратегії залежить від властивостей ресурсу, його доступності, можливості переробки, стратегічного значення та моделі постачання.

У дослідженні H. Sonar, A. Gunasekaran, S. Agrawal та M. Roy розглянуто інтеграцію Lean-, Agile-, Resilient-, Green- та Sustainable-підходів у контексті вибору постачальників. Автори підкреслюють, що сучасні підприємства повинні враховувати не лише традиційні критерії постачання, а й гнучкість, стійкість, екологічність і сталість. У дослідженні визначено 22 критерії вибору постачальників у межах LARGS-парадигми, серед яких важливими є географічне розташування, інноваційність, швидкість реагування, екологічний менеджмент і довгострокові відносини [2].

Систематизація сучасних підходів до управління ланцюгами постачання також представлена у роботі V. Sharma, R.D. Raut, S.K. Mangla та ін., де обґрунтовано необхідність інтеграції Lean-, Agile-, Resilient-, Green- та Sustainable-парадигм. Такий підхід відображає перехід від окремого використання логістичних інструментів до комплексного управління ефективністю, адаптивністю та стійкістю ланцюгів постачання [3].

Ефективність ланцюгів постачання доцільно розглядати як результат поєднання кількох взаємодоповнювальних логістичних стратегій. Кожна з них вирішує окремий аспект управління: скорочення витрат, підвищення гнучкості, забезпечення стійкості, зменшення екологічного впливу та формування довгострокової сталості.

Lean-стратегія спрямована на зниження витрат, скорочення втрат і підвищення операційної ефективності. Її основою є усунення непродуктивних дій, надлишкових запасів, зайвого транспортування, очікування, перевиробництва та нераціонального використання ресурсів. У межах ланцюга постачання ця стратегія дозволяє скоротити тривалість логістичних операцій, зменшити витрати та підвищити якість обслуговування [1].

Agile-стратегія орієнтована на гнучкість та швидку реакцію на зміни попиту. На відміну від Lean-підходу, який насамперед зосереджується на мінімізації втрат, Agile-стратегія забезпечує адаптивність ланцюга постачання до нестабільних умов ринку. Вона пов'язана зі швидкістю реагування, здатністю до інновацій, інформаційною інтеграцією та виробничою гнучкістю [2].

Resilient-стратегія забезпечує стійкість ланцюга постачання до ризиків, криз та непередбачуваних збоїв. Її значення особливо зросло після пандемії COVID-19, яка виявила вразливість багатьох глобальних ланцюгів постачання. Resilient-підхід передбачає диверсифікацію постачальників, створення резервів, розвиток альтернативних маршрутів і каналів постачання та формування партнерських мереж [2].

Green-стратегія спрямована на зменшення негативного впливу логістичної діяльності на довкілля. Вона охоплює скорочення транспортних викидів, оптимізацію маршрутів, зменшення відстаней перевезення, розвиток зворотної логістики, повторне використання ресурсів та впровадження систем екологічного менеджменту. У логістичному контексті Green-підхід може реалізовуватися через консолідацію вантажопотоків, застосування систем підтримки прийняття рішень до планування маршрутів та скорочення обсягів переміщення ресурсів [2; 4].

Sustainable-стратегія є інтегральним підходом до довгострокового розвитку ланцюгів постачання. Вона поєднує економічні, екологічні та соціальні цілі. У межах Sustainable-підходу важливим є не лише зниження витрат, а й відповідальне використання ресурсів, довгострокові партнерські відносини, екологічна безпека та соціальна відповідальність [1].

Поєднання цих стратегій дозволяє сформувати комплексний підхід до управління ланцюгами постачання, який забезпечує підвищення не лише поточної ефективності, а й конкурентоспроможності логістичної системи у перспективі.

Проведений аналіз показує, що ефективність сучасних ланцюгів постачання не може забезпечуватися лише однією логістичною стратегією. В умовах нестабільності, глобальних ризиків, зростання екологічних вимог та потреби у швидкій адаптації найбільш доцільним є інтегроване використання Lean-, Agile-, Resilient-, Green- та Sustainable-стратегій. Таким чином, інтеграція цих стратегій є важливою умовою підвищення ефективності, надійності та конкурентоспроможності сучасних ланцюгів постачання.

1. Trojahn S. Logistics strategies for resource supply chains. Transport and Telecommunication. 2018. Vol. 19, No. 3. P. 244–252. DOI: 10.2478/ttj-2018-0021.
2. Sonar H., Gunasekaran A., Agrawal S., Roy M. Role of lean, agile, resilient, green, and sustainable paradigm in supplier selection. Cleaner Logistics and Supply Chain. 2022. Vol. 4. Article 100059. DOI: 10.1016/j.clscn.2022.100059.
3. Sharma V., Raut R.D., Mangla S.K., Narkhede B.E., Luthra S., Gokhale R. A systematic literature review to integrate lean, agile, resilient, green and sustainable paradigms in the supply chain management. Business Strategy and the Environment. 2021. Vol. 30, No. 2. P. 1191–1212. DOI: 10.1002/bse.2679.
4. Йовченко, А. В. (2026). Lean & Green підходи в удосконаленні логістики транспортних підприємств. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, (13(44), 399–407. DOI: 10.32515/2664-262X.2026.13(44).399-407.

КОТЕНКО Вікторія Ігорівна – д.ф., доцент, доцент кафедри транспортної логістики, Луцький національний технічний університет, e-mail: viktoriia.kotenko@lutsk-ntu.com.ua.

KOTENKO Viktoriia Ihorivna – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Logistics, Lutsk National Technical University, e-mail: viktoriia.kotenko@lutsk-ntu.com.ua.

УДК 656.01

В.І.Котенко, А.Ю.Карпович
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

НАПРЯМИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ

Проаналізовано ключові напрями підвищення ефективності транспортно-логістичних систем, що забезпечують доставку вантажів у міжнародному сполученні. Особливу увагу приділено впровадженню мультимодальних та інтермодальних технологій перевезень, застосуванню крос-докінгу та посиленню взаємодії між учасниками ланцюга постачання. Обґрунтовано, що інтеграція різних видів транспорту та технологій швидкої обробки вантажів сприяє скороченню строків доставки, зниженню транспортних витрат, підвищенню надійності міжнародних перевезень та стійкості транспортно-логістичних систем.

Ключові слова: *транспортно-логістична система, міжнародні вантажні перевезення, мультимодальні перевезення, інтермодальні перевезення, крос-докінг, ланцюг постачання.*

Key directions for improving the efficiency of transport and logistics systems that ensure freight delivery in international traffic have been analyzed. Particular attention is paid to the implementation of multimodal and intermodal transportation technologies, the application of cross-docking, and the strengthening of interaction among supply chain participants. It is substantiated that the integration of different modes of transport and rapid cargo handling technologies contributes to reducing delivery times, lowering transportation costs, increasing the reliability of international freight transportation, and enhancing the resilience of transport and logistics systems.

Key words: *transport and logistics system, international freight transportation, multimodal transportation, intermodal transportation, cross-docking, supply chain.*

На сьогодні міжнародні вантажні перевезення функціонують під впливом зростання вартості транспортних послуг, нестабільності глобальних ланцюгів постачання, обмеженої пропускної спроможності окремих транспортних коридорів, ускладнення митних процедур та підвищення вимог до швидкості, надійності й екологічності доставки. Існуючі підходи до організації перевезень, що орієнтуються переважно на використання одного виду транспорту та окрему оптимізацію маршруту, не завжди забезпечують належний рівень ефективності. У зв'язку з цим актуальним є розвиток транспортно-логістичних систем, які поєднують різні види транспорту, складські технології та координацію між усіма учасниками міжнародної доставки.

Транспортно-логістичну систему доставки вантажів у міжнародному сполученні доцільно розглядати як інтегровану сукупність транспортних, складських, термінальних, інформаційних, організаційних і управлінських елементів, що забезпечують переміщення вантажів між країнами з урахуванням вартості, строків, надійності, безпеки, митного супроводу та якості логістичного сервісу [1]. До її складу входять вантажовідправники, вантажоодержувачі, перевізники, експедитори, логістичні оператори, митні органи, транспортні засоби, маршрути, термінали, склади, інформаційні системи та документообіг. Ефективність такої системи визначається не лише швидкістю перевезення, а й узгодженістю транспортних, складських та інформаційних процесів.

Проблеми розвитку транспортно-логістичних систем України досліджуються у працях вітчизняних науковців. Зокрема, Ю. С. Залознова та Н. В. Трушкіна зазначають, що функціонування транспортно-логістичної системи України ускладнюється недостатнім рівнем розвитку інфраструктури, зношеністю основних засобів, обмеженістю фінансування та недостатньо ефективним управлінням логістичною діяльністю [2]. У роботі У. Д. Лаптєвої та Л. М. Ачкасової узагальнено підходи до визначення транспортно-логістичної системи підприємства як складної системи, що включає транспорт, склади, інформацію, персонал, технології та управлінські процеси [1]. І. Мурований розглядає транспортно-логістичну систему підприємства через три основні підходи: як процес оптимізації транспортно-логістичних потоків, як сукупність логістичних функцій та як сукупність взаємопов'язаних елементів [3]. Це дає підстави розглядати міжнародну доставку вантажів не як окремий транспортний процес, а як комплексну систему взаємодії матеріальних, інформаційних і сервісних потоків.

Важливим напрямом удосконалення транспортно-логістичних систем є розвиток мультимодальних перевезень. Мультимодальні перевезення передбачають використання двох або більше видів транспорту в межах одного логістичного ланцюга. Їх перевага полягає у можливості поєднання сильних сторін різних видів транспорту. Так, наприклад, автомобільний транспорт забезпечує гнучкість та доставку «від дверей до дверей», залізничний є ефективним на великих відстанях та для масових вантажів, морський транспорт доцільний для контейнерних і великотоннажних перевезень, а авіаційний – для термінових і високовартісних вантажів. У дослідженні M. SteadieSeifi систематизовано підходи до планування мультимодальних вантажних перевезень і підкреслено значення вибору виду транспорту, маршруту, терміналів і графіків перевантаження для підвищення ефективності доставки [4].

Особливе значення для міжнародної доставки мають інтермодальні перевезення, які можна розглядати як різновид мультимодальних перевезень. Їх особливістю є переміщення вантажу в одній вантажній одиниці – контейнері, змінному кузові або напівпричепі – без перевантаження самого вантажу під час зміни виду транспорту. Такий підхід дає змогу скоротити час перевантажувальних операцій, зменшити ризик пошкодження вантажу, підвищити безпеку доставки та спростити організацію логістичного процесу. У працях C. Macharis та Y. M. Bontekoning, а також Y. M. Bontekoning, C. Macharis і J. J. Trip проаналізовано можливості застосування операційних досліджень в інтермодальному транспорті та визначено перспективність розвитку залізнично-автомобільних інтермодальних систем [5; 6]. A. Caris, C. Macharis і G. K. Janssens акцентують увагу на задачах планування в інтермодальних перевезеннях, серед яких важливими є вибір терміналів, маршрутизація, розподіл вантажопотоків та синхронізація транспортних операцій [7].

У міжнародному сполученні мультимодальні та інтермодальні технології дозволяють підвищити стійкість ланцюгів постачання. У разі перевантаження окремих автомобільних пунктів пропуску, зміни вартості пального, обмеження руху або порушення роботи певного транспортного коридору можливість перемикання між видами транспорту стає важливою конкурентною перевагою. Сучасні дослідження також пов’язують мультимодальну логістику з підвищенням екологічної ефективності та стійкості глобальних ланцюгів постачання, оскільки раціональне поєднання видів транспорту дає змогу зменшувати витрати та викиди, а також підвищувати адаптивність системи до кризових ситуацій [8].

Окремим напрямом удосконалення транспортно-логістичних систем є впровадження крос-докінгу. Крос-докінг передбачає мінімізацію або повне усунення тривалого складського зберігання вантажів шляхом їх оперативного приймання, сортування, консолідації та подальшого відправлення. У міжнародному сполученні така технологія є особливо доцільною для збірних вантажів, електронної комерції, швидкопсувної продукції, розподільчих центрів, прикордонних логістичних хабів і терміналів 3PL-операторів. У роботі J. Van Belle, P. Valckenaers і D. Cattrysse крос-докінг розглядається як технологія, що забезпечує скорочення складських операцій, прискорення руху вантажів і синхронізацію вхідних та вихідних потоків [9].

Використання крос-докінгу в міжнародних транспортно-логістичних системах дозволяє скоротити тривалість логістичного циклу, зменшити витрати на зберігання, підвищити оборотність вантажів і забезпечити більш гнучке реагування на потреби клієнтів. Особливо важливим є застосування цієї технології у випадках, коли вантажі надходять від кількох постачальників і мають бути швидко розподілені за різними міжнародними напрямами. У таких умовах крос-докінгові термінали виконують функцію вузлів консолідації, сортування та перенаправлення вантажопотоків.

Важливу роль в удосконаленні транспортно-логістичних систем відіграють логістичні оператори та PL-провайдери. У сучасних міжнародних ланцюгах постачання логістичні оператори виконують не лише функцію перевезення, а й забезпечують експедирування, складське обслуговування, консолідацію та розукрупнення відправлень, крос-докінг, митний супровід, трекінг, пакування, маркування й інформаційну підтримку. С. В. Свічинський зазначає, що розвиток постачальників транспортно-логістичних послуг пов’язаний із цифровізацією, впровадженням штучного інтелекту, Інтернету речей і розширенням функціоналу логістичних посередників [10]. Це свідчить про те, що ефективність міжнародної доставки дедалі більше залежить від рівня інтеграції логістичних операторів у транспортно-складські процеси.

Удосконалення транспортно-логістичних систем має також враховувати екологічну ефективність. Доцільним є скорочення порожніх пробігів, консолідація вантажопотоків, оптимізація маршрутів, раціональне використання складських та термінальних ресурсів, застосування енергоефективних видів транспорту та зменшення викидів [11].

Отже, удосконалення транспортно-логістичних систем доставки вантажів у міжнародному сполученні має здійснюватися комплексно. Основними напрямами такого удосконалення є розвиток мультимодальних та інтермодальних перевезень, впровадження крос-докінгових технологій, цифровізація логістичних процесів, розширення функцій логістичних операторів, оптимізація транспортно-складських операцій та підвищення екологічної ефективності. Поєднання цих напрямів дозволяє сформувати більш гнучкі, стійкі та конкурентоспроможні транспортно-логістичні системи, здатні забезпечувати надійну міжнародну доставку вантажів в умовах нестабільності ринку, зміни транспортних коридорів і зростання вимог до якості логістичного сервісу.

1. Залознова Ю. С., Трушкіна Н. В. Транспортно-логістична система України: проблеми та перспективи розвитку. Економічний вісник Донбасу. 2018. № 3(53). С. 113–119.
2. Лаптєва У. Д., Ачкасова Л. М. Поняття транспортно-логістичної системи підприємства. Логістичний та маркетинговий менеджмент. С. 386–389.
3. Мурований І. Удосконалення транспортно-логістичної системи підприємства. Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання: тези доповідей, Національний університет «Львівська політехніка», 25–26 березня 2021 р. Львів, 2021. С. 62–63.
4. SteadieSeifi M., Dellaert N.P., Nuijten W., Van Woensel T., Raoufi R. Multimodal freight transportation planning: A literature review. European Journal of Operational Research. 2014. Vol. 233, No. 1. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.06.055.
5. Macharis C., Bontekoning Y.M. Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. European Journal of Operational Research. 2004. Vol. 153, No. 2. P. 400–416. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00161-9.
6. Bontekoning Y.M., Macharis C., Trip J.J. Is a new applied transportation research field emerging? – A review of intermodal rail–truck freight transport literature. Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2004. Vol. 38, No. 1. P. 1–34. DOI: 10.1016/j.tra.2003.06.001.
7. Caris A., Macharis C., Janssens G.K. Planning problems in intermodal freight transport: accomplishments and prospects. Transportation Planning and Technology. 2008. Vol. 31, No. 3. P. 277–302. DOI: 10.1080/03081060802086397.
8. Kurniawan D. A. Multimodal Logistics for Resilient and Sustainable Global Supply Chains: Strategic Insights from Integrated Transport Systems. Sinergi International Journal of Logistics. 2024. Vol. 2, No. 4. P. 213–224.
9. Van Belle J., Valckenaers P., Cattrysse D. Cross-docking: State of the art. Omega. 2012. Vol. 40, No. 6. P. 827–846. DOI: 10.1016/j.omega.2012.01.005.
10. Свічинський С. В. Огляд можливостей сучасних постачальників транспортно-логістичних послуг в інтегрованих транспортних системах. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2023. № 1(20). С. 239–247. DOI: 10.36910/automash.v1i20.1053.
11. Йовченко А. В. Lean & Green підходи в удосконаленні логістики транспортних підприємств. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2026. Вип. 13(44). С. 399–407. DOI: 10.32515/2664-262X.2026.13(44).399-407.

КОТЕНКО Вікторія Ігорівна – д.ф., доцент, доцент кафедри транспортної логістики, Луцький національний технічний університет, e-mail: viktoriia.kotenko@lutsk-ntu.com.ua.
КАРПОВИЧ Аліна Юріївна – магістр І курсу кафедри транспортної логістики, Луцький національний технічний університет.

KOTENKO Viktoriia Ihorivna – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Logistics, Lutsk National Technical University, e-mail: viktoriia.kotenko@lutsk-ntu.com.ua.
KARPOVYCH Alina Yuriivna – first-year Master's student of the Department of Transport Logistics, Lutsk National Technical University.

УДК 656.01

В.І.Котенко, Д.С.Хринюк
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

НАПРЯМИ УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ МІЖНАРОДНИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Розглянуто основні напрями удосконалення процесу міжнародних пасажирських перевезень автомобільним транспортом. Приділено увагу оптимізації маршрутів і графіків руху, цифровізації сервісів бронювання та моніторингу, підвищенню комфорту й якості обслуговування пасажирів. Визначено, що використання методів машинного навчання та аналітики даних дає змогу прогнозувати попит і адаптувати транспортну пропозицію до змін пасажиропотоків, а оновлення рухомого складу та дотримання режимів праці й відпочинку водіїв сприяють підвищенню безпеки, екологічності та ефективності міжнародних перевезень.

***Ключові слова**: міжнародні пасажирські перевезення, оптимізація маршрутів, машинне навчання, пасажиропотік, якість обслуговування, безпека перевезень.*

The main directions for improving the process of international passenger road transportation are considered. Emphasis is placed on route and timetable optimization, digitalization of booking and monitoring services, and enhancement of passenger comfort and service quality. It is determined that the use of machine learning methods and data analytics makes it possible to forecast demand and adapt transport supply to changes in passenger flows, while fleet renewal and compliance with drivers' work and rest regimes contribute to improving the safety, environmental performance, and efficiency of international transportation.

***Key words:** international passenger transportation, route optimization, machine learning, passenger flow, service quality, transport safety.*

У сучасних умовах міжнародні пасажирські автомобільні перевезення відіграють важливу роль у забезпеченні мобільності населення, розвитку трудових, туристичних, освітніх та соціальних зв'язків між країнами. Для України цей вид перевезень має особливе значення, оскільки автобусне сполучення залишається одним із найбільш доступних і гнучких способів переміщення пасажирів у міжнародному напрямку. Водночас зростання попиту на перевезення, ускладнення прикордонних процедур, підвищення вимог до безпеки, комфорту та цифрового обслуговування зумовлюють необхідність удосконалення організації міжнародних пасажирських перевезень.

Проблема удосконалення міжнародних пасажирських перевезень має комплексний характер. Вона охоплює питання раціонального формування маршрутів, планування графіків руху, організації проходження кордону, забезпечення належного рівня сервісу, оновлення рухомого складу, дотримання режимів праці та відпочинку водіїв, а також впровадження цифрових технологій і методів аналітики даних. Особливої уваги потребує узгодження інтересів перевізника та пасажира: з одного боку, підприємство прагне зменшити експлуатаційні витрати й підвищити ефективність використання автобусів, з іншого – пасажири очікують пунктуальності, безпеки, зручності бронювання, комфортних умов поїздки та прозорої інформації щодо маршруту.

Питання організації автобусних пасажирських перевезень розглядається у працях багатьох дослідників. Зокрема, у роботі Н. Халіпової досліджено особливості формування параметрів міжнародних пасажирських маршрутів та наголошено на необхідності логістичного підходу до управління такими перевезеннями [1]. У праці O. J. Ibarra-Rojas, F. Delgado, R. Giesen та J. C. Muñoz систематизовано наукові підходи до планування, організації та оперативного управління автобусними транспортними системами, зокрема до побудови маршрутної мережі, планування графіків і контролю руху [2]. Це свідчить про те, що ефективність міжнародних пасажирських перевезень залежить не лише від технічного стану транспортних засобів, а й від якості управлінських рішень на стратегічному, тактичному та оперативному рівнях.

Також важливим удосконалення перевезень є оптимізація графіків руху з урахуванням пасажирського попиту. У роботі S. Liu запропоновано підхід до оптимізації розкладу автобусів, який враховує не тільки витрати перевізника, а й сприйняття пасажирами часу очікування та рівня завантаження автобуса [3]. Такий підхід є актуальним і для міжнародних рейсів, оскільки

нерівномірність попиту за днями тижня, сезонами та напрямками може призводити або до недостатнього завантаження автобусів, або до дефіциту місць у періоди пікового попиту.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділено якості транспортного обслуговування. У праці V. Van Acker та співавторів проаналізовано фактори, які впливають на вибір пасажирами автобусних перевезень. Автори зазначають, що для пасажирів важливими є не лише вартість і тривалість поїздки, а й комфорт, надійність, частота сполучення та якість сервісу [4]. Подібні висновки наведено у дослідженні L. Eboli та G. Mazzulla, де доведено зв'язок між якістю сервісу та загальною задоволеністю пасажирів [5]. Для міжнародних перевезень це має особливе значення, оскільки тривалість поїздки часто становить багато годин, а отже, комфорт салону, наявність кондиціонування, санітарних зупинок, Wi-Fi, зарядних пристроїв, зручних сидінь та зрозумілої інформації про маршрут прямо впливають на конкурентоспроможність перевізника.

Перспективним напрямом удосконалення є цифровізація процесу перевезень. У дослідженні S. Rahnama, A. Cortez та A. Monzon, присвяченому міжміським автобусним перевезенням на маршруті Madrid–Bilbao, встановлено, що інформаційні сервіси, такі як вебсайти та мобільні застосунки, позитивно впливають на задоволеність пасажирів [6]. Для міжнародних автобусних перевезень такі сервіси можуть охоплювати онлайн-бронювання квитків, електронну оплату, вибір місця, інформування про затримки, GPS-відстеження автобуса, автоматичне сповіщення про проходження кордону та можливість швидкого зв'язку з перевізником.

Ще одним важливим напрямом є застосування методів машинного навчання та аналітики даних. У дослідженні T. Alexandre та співавторів зазначено, що методи машинного навчання при пасажирських перевезеннях використовуються для прогнозування пасажиропотоків, часу прибуття, тривалості поїздки та підвищення надійності сервісу [7]. Інші дослідження також підтверджують, що прогнозування попиту на основі історичних даних, сезонності, календарних факторів і зовнішніх умов може бути використане для гнучкого планування кількості рейсів і вибору місткості транспортних засобів [8]. Для міжнародних пасажирських перевезень це може означати адаптацію графіків до періодів підвищеного попиту, наприклад перед святами, початком навчального року, туристичним сезоном тощо.

Суттєвим чинником, який впливає на якість міжнародних перевезень, є організація проходження державного кордону. Затримки на пунктах пропуску можуть порушувати графік руху, збільшувати тривалість поїздки, погіршувати комфорт пасажирів і створювати додаткові витрати для перевізника. У дослідженні L. Lin, Q. Wang та A. Sadek запропоновано підхід до прогнозування затримок на кордоні з використанням моделей масового обслуговування [9]. Отже, при плануванні міжнародних автобусних рейсів доцільно враховувати статистику завантаженості пунктів пропуску, час доби, день тижня, сезонність і можливість вибору альтернативних переходів.

Удосконалення міжнародних пасажирських перевезень також пов'язане з оновленням рухомого складу та дотриманням екологічних стандартів. Сучасні автобуси повинні відповідати вимогам безпеки, енергоефективності, екологічності та комфорту. У дослідженні E. Zhao, P. Walker та N. Surawski проведено порівняння життєвого циклу дизельних, гібридних та електричних автобусів, що підтверджує актуальність оцінювання екологічного впливу транспорту не лише під час експлуатації, а й на всіх етапах життєвого циклу [10]. Для міжнародних маршрутів, особливо в напрямку країн Європейського Союзу, важливим є використання автобусів високого екологічного класу, що дозволяє зменшити викиди, відповідати вимогам екологічних зон і підвищити імідж перевізника.

Не менш важливим є дотримання режимів праці та відпочинку водіїв. Міжнародні автобусні рейси часто характеризуються значною тривалістю, нічними переїздами, перетином кількох країн і потребою в чіткому плануванні екіпажу. У дослідженні S. Lee та співавторів встановлено зв'язок між змінними графіками роботи і ризиками безпеки під час керування автобусом [11]. Тому удосконалення режимів праці та відпочинку водіїв має розглядатися не лише як вимога законодавства, а й як один із ключових чинників безпеки пасажирських перевезень. Для тривалих міжнародних маршрутів доцільним є використання екіпажу з двох водіїв, планування місць відпочинку, врахування часу проходження кордону та контроль дотримання режиму роботи та відпочинку.

Таким чином, основними напрямами удосконалення процесу міжнародних пасажирських перевезень є оптимізація маршрутів і графіків руху, цифровізація сервісів бронювання та моніторингу, прогнозування попиту з використанням методів машинного навчання, покращення організації проходження кордону, підвищення комфорту та якості обслуговування пасажирів, оновлення рухомого складу та забезпечення раціональних режимів праці водіїв. Комплексне

поєднання цих напрямів дозволить підвищити ефективність роботи перевізників, зменшити вплив непередбачуваних затримок, покращити рівень безпеки та сформувати більш якісний пасажирський сервіс у міжнародному сполученні.

1. Халіпова, Н. В., Кузьменко, А. І., Черчата, А. О., & Гаврилюк, В. В. (2025). Логістичне управління формуванням параметрів маршрутів міжнародних пасажирських перевезень. Системи та технології, 69(1), 154-166. DOI: 10.32782/2521-6643-2025-1-69.19.
2. Ibarra-Rojas O.J., Delgado F., Giesen R., Muñoz J.C. Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. Transportation Research Part B: Methodological. 2015. Vol. 77. P. 38–75. DOI: 10.1016/j.trb.2015.03.002.
3. Liu S., Liu L., Pei D., Wang J. Bi-objective bus scheduling optimization with passenger perception in mind. Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Article 6102. DOI: 10.1038/s41598-023-32997-4.
4. Van Acker V., Kessels R., Palhazi Cuervo D., Lannoo S., Witlox F. Preferences for long-distance coach transport: Evidence from a discrete choice experiment. Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2020. Vol. 132. P. 759–779. DOI: 10.1016/j.tra.2019.11.028.
5. Eboli L., Mazzulla G. Service quality attributes affecting customer satisfaction for bus transit. Journal of Public Transportation. 2007. Vol. 10, No. 3. P. 21–34. DOI: 10.5038/2375-0901.10.3.2.
6. Rahnama S., Cortez A., Monzon A. Navigating passenger satisfaction: A structural equation modeling–artificial neural network approach to intercity bus services. Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 11. Article 4363. DOI: 10.3390/su16114363.
7. Alexandre T., Bernardini F., Viterbo J., Pantoja C.E. Machine learning applied to public transportation by bus: A systematic literature review. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2023. Vol. 2677, No. 7. P. 639–660. DOI: 10.1177/03611981231155189.
8. Rocco di Torrepadula F., Napolitano E.V., Di Martino S., Mazzocca N. Machine learning for public transportation demand prediction: A systematic literature review. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2024. Vol. 137, Part B. Article 109166. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.109166.
9. Lin L., Wang Q., Sadek A.W. Border crossing delay prediction using transient multi-server queueing models. Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2014. Vol. 64. P. 65–91. DOI: 10.1016/j.tra.2014.03.013.
10. Zhao E., Walker P.D., Surawski N.C. Emissions life cycle assessment of diesel, hybrid and electric buses. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2022. Vol. 236, No. 6. P. 1233–1245. DOI: 10.1177/09544070211034318.
11. Lee S., Kim H.-R., Byun J., Jang T.-W. Sleepiness while driving and shiftwork patterns among Korean bus drivers. Annals of Occupational and Environmental Medicine. 2017. Vol. 29. Article 48. DOI: 10.1186/s40557-017-0203-y.

КОТЕНКО Вікторія Ігорівна – д.ф., доцент, доцент кафедри транспортної логістики, Луцький національний технічний університет, e-mail: viktoriia.kotenko@lutsk-ntu.com.ua.
ХРИНЮК Дмитро Сергійович – магістр І курсу кафедри транспортної логістики, Луцький національний технічний університет.

KOTENKO Viktoriia Ihorivna – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Logistics, Lutsk National Technical University, e-mail: viktoriia.kotenko@lutsk-ntu.com.ua.
KHRYNIUK Dmytro Serhiiovych – first-year Master's student of the Department of Transport Logistics, Lutsk National Technical University.

УДК 629.3

Я.В. Кужельний, Д.С. Машковцев
Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, Україна

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МУЛЬТИМАРОЧНОГО СКАНЕРА LAUNCH CRP 239 ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ РІЗНИХ ТИПІВ

У роботі проведено дослідження можливостей використання портативного мультимарочного сканера Launch CRP 239 для комп'ютерної діагностики гібридних автомобілів різних типів. Для діагностування були прийняті автомобілі Toyota Prius (HEV) та Ford C-max Hybrid (PHEV). Визначено основні модулі, які прилад може продіагностувати, та кількість параметрів. Встановлено технічні можливості сканера та особливості його застосування при діагностуванні гібридних автомобілів різних типів.
Ключові слова: *діагностування, сканер Launch CRP 239, гібридні автомобілі, Toyota Prius, Ford C-max Hybrid.*

The paper research the possibilities of using the portable multi-brand scanner Launch CRP 239 for computer diagnostics of hybrid cars of various types. For diagnostics, Toyota Prius (HEV) and Ford C-max Hybrid (PHEV) cars were taken. The main modules that the device can diagnose and the number of parameters are determined. The technical capabilities of the scanner and the features of its application in diagnosing hybrid cars of various types have been established.
Keywords: *diagnostics, Launch CRP 239 scanner, hybrid cars, Toyota Prius, Ford C-max Hybrid.*

Глобальний екологічний напрямок, який спрямований на зменшення кількості та токсичності відпрацьованих газів у транспортних засобів, та поступова відмова від використання нафтових видів палив призводить до збільшення кількості автомобілів із альтернативними джерелами живлення. Одним із представників таких альтернативних автомобілів є гібридний автомобіль, який має достатньо велику присутність на дорогах України. Конструктивна особливість цих автомобілів полягає у поєднанні двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) та високовольтної електричної системи. Це створює нові вимоги до процесів технічного обслуговування та діагностики. Окрім цього, гібридні автомобілі мають різну конструкцію, системи керування та контролю. Тому для станцій технічного обслуговування є актуальне питання використання універсального та доступного діагностичного обладнання. Мультимарочний сканер Launch CRP 239 можна віднести до середнього сегменту такого виду обладнання. Проте залишається недостатньо вивченим питання можливості доступу до різноманітних систем та параметрів гібридних автомобілів різних типів та виробників.

Робота [1] присвячена аналізу конструкцій та застосування різних типів двигунів у автомобілі, в тому числі було розглянуто можливі конфігурації електромобілів, схеми компонування гібридних автомобілів. В статті [3] досліджуються сучасні методи діагностики електромобілів на прикладі Hyundai Kona Electric. Автори аналізують можливості мультимарочного сканера LAUNCH X-431 PRO 3S для зчитування кодів помилок, моніторингу параметрів у режимі реального часу та оцінки стану високовольтної акумуляторної батареї. Робота [4] присвячена розробці методу діагностування вбудованих електродвигунів електричних і гібридних автомобілів. У роботі автори досліджують можливість виявлення несправностей неінвазивним методом.

Гібридні автомобілі мають різну конструкцію та зазвичай поділяються за ступенем гібридизації та архітектурою побудови силової установки.

Розрізняють наступні основні різновиди гібридних автомобілів:

1. Повні гібриди (HEV). Вони можуть використовувати електродвигун, ДВЗ або одночасно два двигуна.

2. Плагін-гібриди (PHEV): Ці автомобілі комплектуються потужнішою батареєю та мають можливість заряджатися від мережі.

3. М'які гібриди (MHEV): У таких автомобілях електродвигун використовується як додатковий елемент до ДВЗ під час динамічних навантажень.

Для дослідження були прийняті одні із найпоширеніших гібридних автомобілів: Toyota Prius та Ford C-max Hybrid.

Toyota Prius (HEV) має послідовно-паралельну схему роботи. ДВЗ та електродвигун поєднуються за допомогою планетарного редуктора. Комплектується ДВЗ типом 2ZRFXE об'ємом 1,8 л потужністю 73 кВт, який працює за циклом Аткінсона.

Ford C-max Hybrid (PHEV) також працює за послідовно-паралельною схемою, проте відмінність полягає у компонуванні мотор-генераторів на одній осі. Встановлено ДВЗ об'ємом 2,0 л (iVCT), який також працює за циклом Аткінсона та має потужність 104 кВт.

Автомобільний сканер Launch CRP 239 є портативним мультимарочним сканером. Підтримує діагностику електронних систем управління автомобілів європейського, американського та азіатського виробництва. Для приєднання використовує OBDII роз'єм [2]. Зовнішній вигляд діагностичного приладу Launch CRP 239 наведено на рисунку 1. На рисунку 2 наведено головний екран приладу.



Рис. 1 – Зовнішній вигляд діагностичного приладу Launch CRP 239

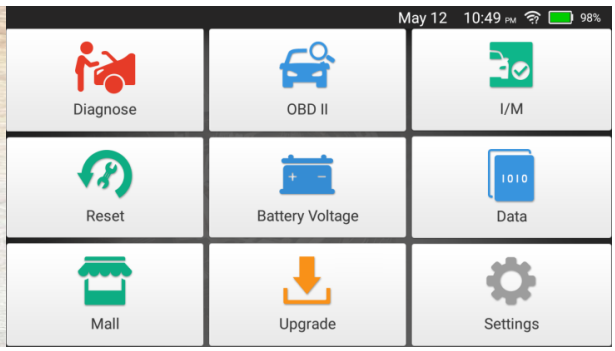


Рис. 2 – Головний екран приладу

Після приєднання приладу до автомобіля відбувається автоматичне зчитування VIN-коду та даних про автомобіль. Далі вибирається функція «Diagnose» (Діагностування) і відбувається автоматичне зчитування параметрів. Після підключення приладу до автомобіля Ford C-max Hybrid та зчитування даних сканер має доступ до наступних модулів (рис. 3): Anti-lock Braking System (ABS) (Антиблокувальна гальмівна система), Powertrain Control Module (PCM) (Модуль керування силовим агрегатом) та Restraint Control Module (RCM) (Модуль керування системами пасивної безпеки). Для зчитування даних силового агрегату заходимо у відповідний модуль та вибираємо функцію Read Data Stream (Читання потоку даних) (рис. 4).

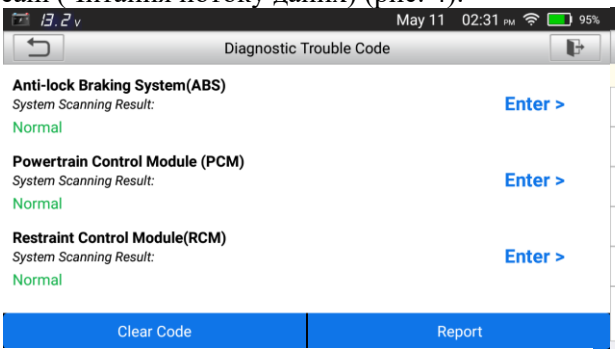


Рис. 3 – Доступ приладу Launch CRP 239 до модулів автомобіля Ford C-max Hybrid

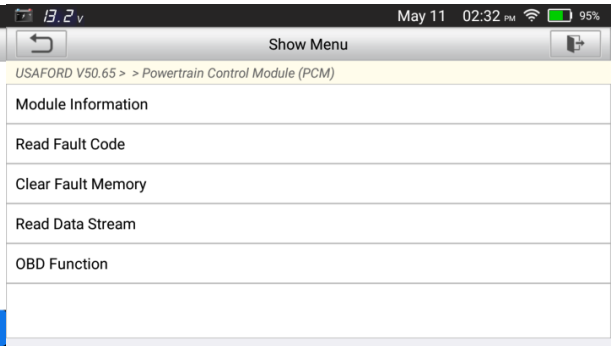


Рис. 4 – Список доступних функцій в модулі керування силовим агрегатом

Після цього з'являється список доступних параметрів для діагностування. Сканер Launch CRP 239 має можливість продіагностувати 245 параметрів (рис. 5). Для діагностування були прийняті одні із найважливіших параметрів: Mass Air Flow (MAF) (масова витрата повітря), Misfire Monitor Status (пропуски запалювання), Short/Long Term Fuel Trim (паливні корекції), Engine RPM (оберти двигуна за хвилину), Throttle Position (положення дросельної заслінки), Accelerator Pedal Position (положення педалі газу), Engine Coolant Temperature Status (температура охолоджуючої рідини), EGR Motor Control (контроль клапана EGR), Oxygen Sensor Monitor Evaluated (оцінка роботи датчика кисню), Battery Positive Voltage (позитивна напруга акумулятора), Vehicle Speed (швидкість автомобіля) та інші. На рисунку 6 наведено відображення поточних значень прийнятих параметрів в режимі реального часу.

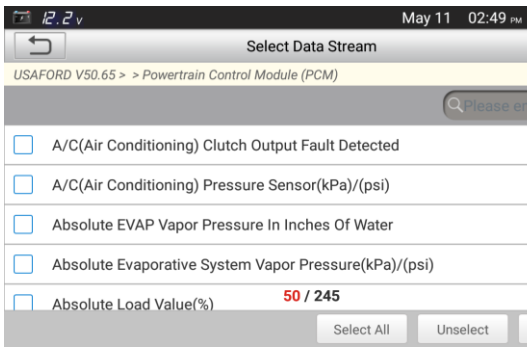


Рис. 5 – Список доступних параметрів для діагностування PCM

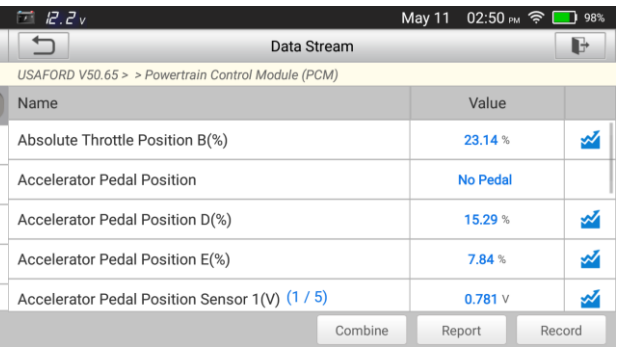


Рис. 6 – Відображення значень параметрів в режимі реального часу

Також було виконано діагностування параметрів модуля Anti-lock Braking System (ABS). Для цього було вибрано відповідний блок та у доступних функціях прийнято Read Data Stream (рис. 7). В цьому блоці для діагностування доступно 69 параметрів (рис. 8). Для діагностування були обрані наступні параметри: ABS, Brake Fluid Line Hydraulic Pressure (гідравлічний тиск гальмівної рідини в магістралі), Brake Pedal Position (положення педалі гальма), Hydraulic Pump Motor (двигун гідравлічного насоса), Master Cylinder Isolation Valve Calibration (калібрування запірного клапана головного циліндра), Left/Right Front Wheel Speed Sensor (датчик швидкості лівого/правого переднього колеса), Left/Right Rear Wheel Speed Sensor (датчик швидкості лівого/правого заднього колеса) та інші.

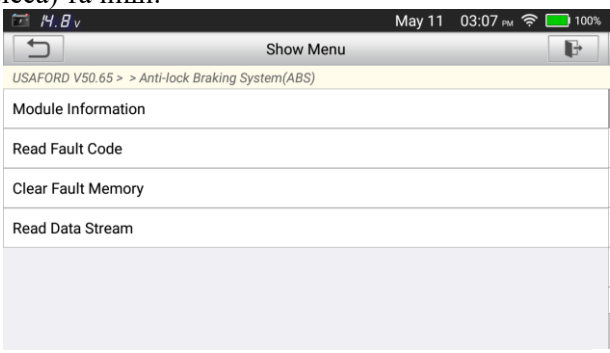


Рис. 7 – Список доступних функцій в модулі керування силовим агрегатом

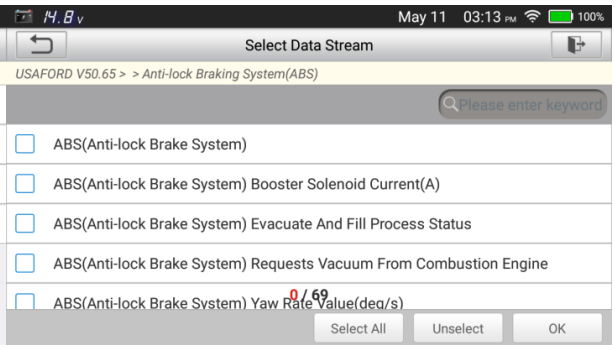


Рис. 8 – Список доступних параметрів для діагностування модуля ABS

Приєднавши діагностичний прилад до автомобіля Toyota Prius, сканер може діагностувати параметри наступних модулів (рис. 9): Anti-lock Braking System (ABS)/Vehicle Stability Control (VSC)/ Traction Control System (TRC) (Антиблокувальна гальмівна система / Система контролю стійкості автомобіля/Система контролю тяги), Supplemental Inflatable Restraint System (SRS) (Додаткова надувна система безпеки), Engine and ECT (ECMECT) (Модуль керування двигуном та трансмісією), Hybrid Control (HC) (Модуль керування гібридною системою), Transmission Control Module (TCM) (Модуль керування трансмісією).

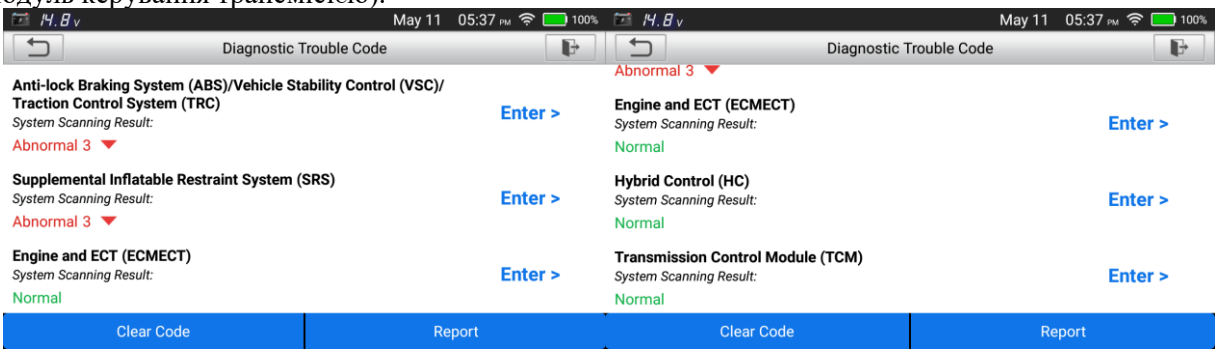


Рис. 9 – Доступ приладу Launch CRP 239 до модулів автомобіля Toyota Prius

Для діагностування параметрів модуля керування двигуном та трансмісією обираємо (ECMECT) та із можливих функцій приймаємо Read Data Stream (рис. 10). Далі на екрані з'являються параметри, які можна продіагностувати (рис. 11). Загальна кількість параметрів – 154.

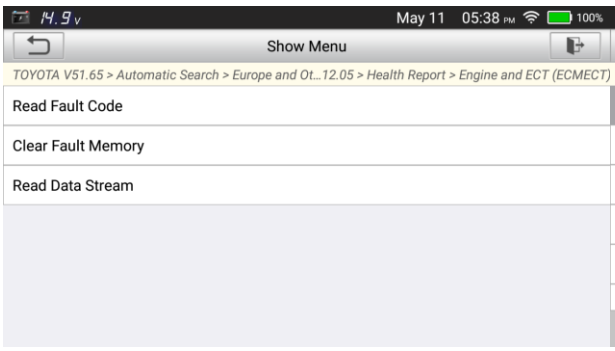


Рис. 10 – Список доступних функцій в модулі керування двигуном та трансмісією

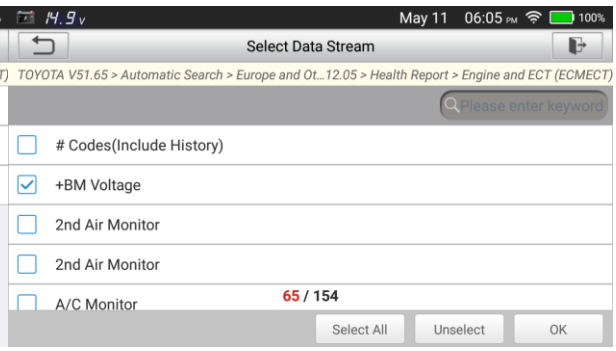


Рис. 11 – Список доступних параметрів для діагностування ECMECT

Для діагностування були прийняті аналогічні основні параметри, як і при діагностуванні автомобіля Ford. Відображення значень параметрів в режимі реального часу наведено на рисунку 12. У автомобіля Toyota Prius сканер має можливість провести діагностику і модуля керування гібридною системою (HC). Для цього було обрано відповідний блок. Перелік доступних функцій у цьому блоці наведено на рисунку 13.

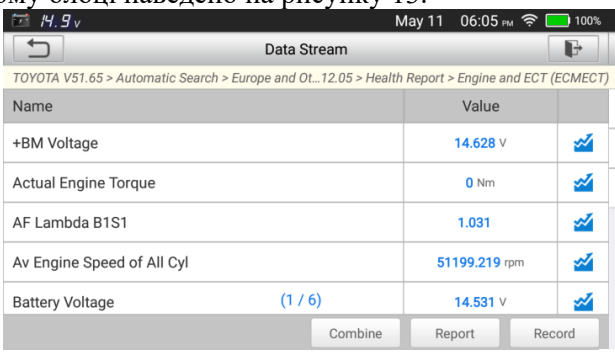


Рис. 12 – Відображення значень параметрів в режимі реального часу

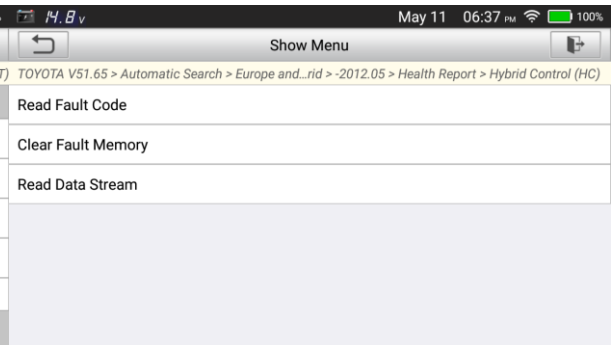


Рис. 13 – Список доступних функцій в модулі керування гібридною системою

Обираючи функцію Read Data Stream, з'являється перелік параметрів для діагностування (рис. 14). Загальна кількість доступних параметрів для сканування – 273. Для діагностування були обрані наступні параметри: +B (позитивна напруга акумулятора), Accel Pedal Pos (положення педалі газу), Auxiliary Battery Vol (напруга додаткового акумулятора), Battery Block Vol (напруга окремих блоків ВВБ), Delta SOC (різниця між рівнем заряду блоків ВВБ), Internal Resistance (внутрішній опір), Inverter Temp (температура інвертора), Temp of Batt (температура ВВБ), Throttle Position (положення дросельної заслінки), Vehicle SPD (швидкість автомобіля). Відображення поточних значень прийнятих параметрів в режимі реального часу наведено на рисунку 15.

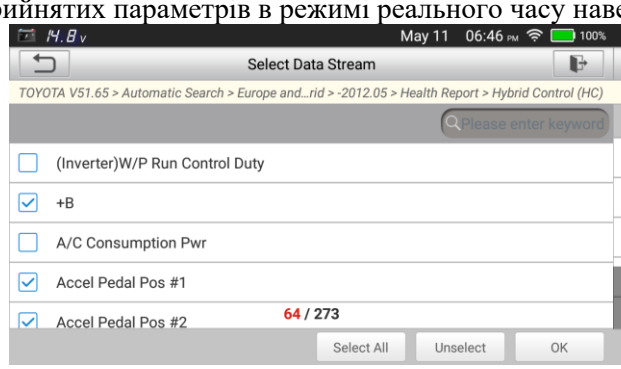


Рис. 14 – Список доступних параметрів для діагностування HC

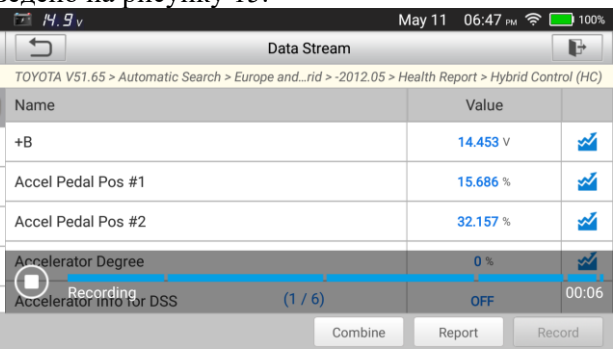


Рис. 15 – Відображення значень параметрів в режимі реального часу

При діагностуванні модуля Anti-lock Braking System (ABS)/Vehicle Stability Control (VSC)/ Traction Control System (TRC) прийняті схожі параметри, як і при діагностуванні автомобіля Ford. На рисунку 16 наведено перелік доступних параметрів для діагностування, а на рисунку 17 – відображення значень параметрів в режимі реального часу.

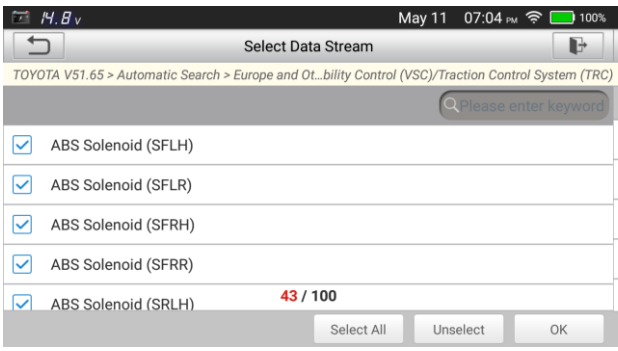


Рис. 16 – Список доступних параметрів для діагностування ABS/VSC/TRC

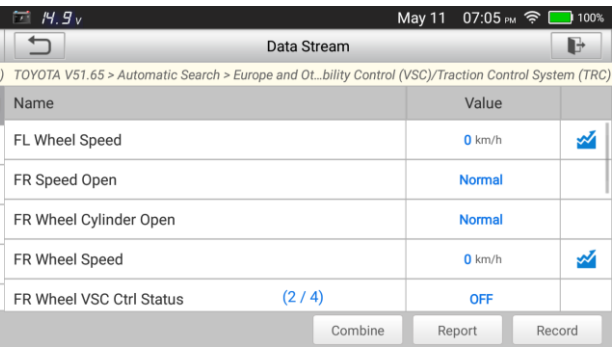


Рис. 17 – Відображення значень параметрів в режимі реального часу

Провівши діагностування гібридних автомобілів різних типів (Toyota Prius (HEV) та Ford C-max Hybrid (PHEV)) автомобільним мультимарочним сканером Launch CRP 239, можна зазначити, що прилад має більші можливості для діагностування автомобіля Toyota, аніж Ford. У Ford C-max Hybrid сканер може продіагностувати лише три модулі (Anti-lock Braking System (ABS), Powertrain Control Module (PCM) та Restraint Control Module (RCM)), а у Toyota Prius – 5 модулів (Anti-lock Braking System (ABS)/Vehicle Stability Control (VSC)/ Traction Control System (TRC), Supplemental Inflatable Restraint System (SRS), Engine and ECT (ECMECT), Hybrid Control (HC) та Transmission Control Module (TCM)). Окремо варто зазначити, що модуль керування гібридною системою можна продіагностувати лише в автомобіля Toyota. Сканер має можливість продіагностувати 273 параметра. Цей модуль є важливим елементом, оскільки відповідає за координацію та управління гібридною системою автомобіля. Порівнюючи можливості сканера при діагностуванні модуля керування силовим агрегатом, можна відзначити, що параметрів більше у автомобіля Ford C-max Hybrid (245), ніж у Toyota Prius (154). Щодо модуля антиблокувальної системи, то в цьому випадку параметрів для діагностування буде більше у Toyota (100), ніж у Ford (69). Проте варто врахувати, що у склад модуля антиблокувальної системи Toyota Prius входять система контролю стійкості автомобіля та система контролю тяги.

Можливостей автомобільного мультимарочного сканера Launch CRP 239 буде достатньо для діагностування автомобіля Toyota Prius. Прилад має можливість просканувати достатню кількість параметрів всіх основних модулів. При діагностуванні автомобіля Ford C-max Hybrid можливостей сканера буде недостатньо, оскільки у переліку доступних модулів відсутній модуль керування гібридною системою. В цьому випадку треба використовувати додаткове обладнання або інший сканер. Якщо необхідно продіагностувати лише модуль керування силовим агрегатом, то Launch CRP 239 впорається з цією задачею.

Бібліографія

1. Кужельний, Я. В., Венжега, В. І., Пасов, Г. В., & Клименко, В. І. (2023). Аналіз конструкцій та застосування різних типів двигунів у автомобілі. Автомобільний транспорт, (52), 89–97. https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2023.52.0.10

2. Автомобільний сканер LAUNCH CRP-239 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://launch.ua/crp-239/

3. Гнатов, А., Аргун, Щ., Ульянець, О., & Іванов, В. (2025). Особливості діагностики Hyundai Kona electric з використанням мультимарочного сканеру LAUNCH X-431 PRO 3S. Автомобільний транспорт, (57), 11–22. https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2025.57.0.02

4. Balázs Baráth, Márton Jagicza, Dávid Józsa, Gábor László Tóth. Development of a Diagnostic Procedure for Vehicle's Built-in Electric Motors. Eng. Proc. 2024, 79, 4 https://doi.org/10.3390/engproc2024079004

КУЖЕЛЬНИЙ Ярослав Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, НУ «Чернігівська політехніка», e-mail: kyzhelnuyitm@stu.cn.ua

МАШКОВЦЕВ Дмитро Сергійович – асистент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, НУ «Чернігівська політехніка», e-mail: mashkovtsevdmitro@gmail.com

KUZHELNYI Yaroslav – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Industrial Engineering, Chernihiv Polytechnic National University.

MASHKOVTSEV Dmytro – assistant of the Department of Automobile Transport and Industrial Engineering, Chernihiv Polytechnic National University.

УДК 629

Мачульський М. А.
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

ВПЛИВ СТИЛЮ ВОДІННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНУ ТА ПАЛИВНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ КАТЕГОРІЇ N3 У СЕРЕДОВИЩІ CRM-ПЛАТФОРМ

Анотація. У тезах досліджено вплив людського фактора на показники паливної та експлуатаційної ефективності важких комерційних автомобілів. Обґрунтовано обмеженість традиційних FMS-систем у формуванні культури еко-драйвінгу. Запропоновано використання CRM-платформ з інтегрованими модулями штучного інтелекту для розрахунку багатофакторного індексу стилю водіння, що дозволяє знизити витрати палива та оптимізувати ресурс вузлів автомобіля завдяки персоналізованій аналітиці.

***Ключові слова**: стиль водіння, паливна ефективність, вантажні автомобілі категорії N3, CRM-платформа, штучний інтелект, еко-драйвінг.*

Abstract. The abstracts investigate the influence of the human factor on the fuel and operational efficiency indicators of heavy commercial vehicles. The limitations of traditional FMS systems in shaping eco-driving culture are substantiated. The use of CRM platforms with integrated AI modules is proposed to calculate a multi-factor driving style index, enabling reduced fuel consumption and optimized vehicle component life through personalized analytics.

***Key words**: driving style, fuel efficiency, N3 category trucks, CRM platform, artificial intelligence, eco-driving.*

Постановка проблеми у загальному вигляді

Проблема мінімізації споживання пального та оптимізації загальних експлуатаційних витрат важкотоннажного транспорту набуває критичної ваги на тлі глобальних викликів логістичної галузі. Сучасні транспортні підприємства працюють в умовах постійного зростання вартості паливно-мастильних матеріалів, які в структурі загальної вартості володіння (Total Cost of Ownership, TCO) автомобілями категорії N3 можуть сягати 30-40% [9]. Водночас жорсткі екологічні норми Європейського Союзу (регламенти щодо викидів CO2 та інструмент VECTO) вимагають від перевізників невідкладного переходу до ресурсозберігаючих технологій [7]. Зважаючи на те, що конструктивні можливості модернізації та підвищення коефіцієнта корисної дії двигунів внутрішнього згоряння об'єктивно наближаються до фізичних меж, зумовлених законами термодинаміки [1], вектор інженерних та управлінських рішень неминуче зміщується у сферу оптимізації безпосередньо експлуатаційних процесів. Як свідчать профільні дослідження світових інституцій, ключовим та найменш стабільним ресурсом для зменшення енергозатрат є саме людський фактор. Різниця у стилі керування транспортним засобом здатна формувати від 10% до 15% відхилень у витратах палива для абсолютно ідентичних вантажівок, що виконують однакові логістичні завдання на однакових маршрутах [2].

Такий суттєвий вплив людського фактора пояснюється складністю керування автомобілем категорії N3, повна маса якого може перевищувати 40 тонн. Кожен необґрунтований розгін, неправильно обрана передача або несвоєчасне гальмування призводять до колосальних втрат кінетичної енергії, для відновлення якої витрачаються додаткові літри дизельного пального. Відповідно, формування стійкої культури еко-драйвінгу серед водіїв перетворюється з бажаної ініціативи на критичну умову виживання та конкурентоспроможності транспортної компанії на ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання впливу стилю водіння на ефективність експлуатації транспортних засобів широко висвітлено у працях як вітчизняних, так і закордонних науковців. У роботах А. І. Воркута закладено фундаментальні основи організації та проєктування транспортних процесів [4], проте сучасний етап цифровізації вимагає нових підходів. Закордонні дослідники, такі як M. Tideman, L. Guzzella та A. Sciarretta, переконливо доводять критичний вплив поведінкових характеристик водія на енергоефективність важких вантажівок [2, 3]. У їхніх роботах обґрунтовано математичні моделі втрат палива через нераціональні режими роботи двигуна.

Водночас на ринку існує велика кількість телематичних рішень (Fleet Management Systems – FMS), які пропонуються безпосередньо виробниками транспортних засобів (наприклад, Volvo Dynafleet або Scania Fleet Management) або сторонніми провайдерами. Однак, як відмічають дослідники у сфері автомобільної телематики, існуючі FMS здебільшого реалізують спрощений, реактивний підхід до оцінки дій водія. Вони налаштовані на реєстрацію жорстких порушень регламенту (наприклад, перевищення швидкості, перекручування обертів двигуна або екстрене гальмування). Їхня архітектура є закритою (явище vendor lock-in), що ускладнює роботу зі змішаними автопарками [6]. Як зазначають M. E. Porter та J. E. Heppelmann у дослідженнях розумних підключених продуктів, відсутність глибокої інтеграції потокових даних автомобіля з внутрішньокорпоративними управлінськими процесами (CRM/ERP системами) та програмами навчання персоналу робить такі ізольовані FMS-рішення недостатньо ефективними для системного покращення експлуатаційних показників [5].

Виклад основного матеріалу дослідження

Для розв'язання вищеописаної проблеми пропонується принципово новий методологічний підхід, а саме перенесення центру агрегації та інтелектуальної обробки телематичних даних у середовище хмарних CRM-систем, зокрема з використанням архітектури платформи Salesforce. Використання спеціалізованих модулів Salesforce IoT Cloud та інструментів безшовної інтеграції MuleSoft дозволяє створити єдиний інформаційний простір компанії. У такому середовищі телематичні дані, що надходять з CAN-шини вантажівки (згідно зі стандартом J1939) у режимі реального часу, поєднуються з операційними бізнес-даними, такими як маршрутні листи, електронні товарно-транспортні накладні (e-TTN) та індивідуальні профілі водіїв.

Така глибока інтеграція розрізнених масивів інформації дозволяє відмовитися від лінійного контролю швидкості на користь динамічного розрахунку багатофакторного коефіцієнта стилю водіння ($Kstyle$), який є невід'ємною складовою інтегрального показника ефективності експлуатації ($Eeff$):

$$Eeff = \frac{Qfact - Qnorm}{L * Kstyle} \quad (1)$$

де $Qfact$ та $Qnorm$ – фактична та динамічно розрахована нормативна витрата палива; L – коефіцієнт фактичного завантаження транспортного засобу. Коефіцієнт стилю водіння ($Kstyle$) у запропонованій моделі є результатом безперервного скорингу великих даних (Big Data Analytics). Він включає детальний аналіз таких критичних параметрів:

1. Ефективність використання холостого ходу (Idling Management). Система аналізує не лише час роботи двигуна без руху, а й контекст, чи був простій виправданим або це була нераціональна витрата ресурсу.

2. Майстерність використання інерції (Coasting). Оцінюється здатність водія прогнозувати дорожню ситуацію та використовувати кінетичну енергію 40-тонного автопоїзда для руху з нульовою витратою палива.

3. Дотримання оптимальних режимів двигуна (Green Band). Моніторинг утримання обертів у діапазоні максимального крутного моменту, де питома витрата пального є мінімальною.

4. Динамічна стабільність. Кількісний аналіз різких прискорень та гальмувань, що впливають на знос гальмівних систем та шин.

Особливе місце в архітектурі рішення посідає інтелектуальний модуль Salesforce Einstein AI. На відміну від стандартних звітів, ШІ-алгоритми здатні виявляти неочевидні кореляції: наприклад, пов'язувати специфічні маневри водія на певних ділянках маршруту зі зростанням ризику позапланового ремонту пневматичних систем. Застосування методів машинного навчання дозволяє системі працювати в режимі «Next Best Action». Для прикладу, якщо індекс $Kstyle$ стабільно знижується, CRM автоматично формує рекомендації для менеджера або призначає водієві інтерактивні модулі з еко-драйвінгу через мобільний додаток. Таким чином, система забезпечує перехід від жорсткого адміністративного контролю до проактивного розвитку компетенцій персоналу [8].

Висновки

1. Проаналізовано обмеження існуючих пропрієтарних FMS-систем та встановлено, що їхня закритість та ізольованість від бізнес-процесів підприємства не дозволяє повноцінно використовувати потенціал телематичних даних для навчання водіїв.

2. Обґрунтовано доцільність впровадження хмарних CRM-платформ як центрального вузла агрегації даних, що забезпечує синергію між технічними показниками вантажівки та економічними метриками логістичного процесу.

3. Запропоновано методологію формування багатофакторного коефіцієнта $Kstyle$, який дозволяє оцінювати стиль водіння через призму енергоефективності та ресурсозбереження.

4. Теоретично обґрунтовано, що використання предиктивної аналітики на базі штучного інтелекту (Salesforce Einstein AI) має значний потенціал для досягнення економії палива на рівні 10-15 %, а також сприятиме суттєвому підвищенню експлуатаційної надійності автомобілів категорії N3 завдяки персоналізованому коригуванню поведінки водіїв та предиктивному виявленню ризиків поломок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Leach F., Kalghatgi G., Stone R., Miles P. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. Transportation Engineering. 2020. Vol. 1. P. 100005.
2. Fuel Economy of Heavy-Duty Vehicles: Implications of Technology and Driver Behavior / M. Tideman et al. Washington, DC : ICCT, 2012.
3. Guzzella L., Sciarretta A. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization. Berlin : Springer, 2013. 346 p.
4. Воркут А. І. Проектування транспортних процесів. Київ : Транспорт, 2002. 432 с.
5. Porter M. E., Heppelmann J. E. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. Harvard Business Review. 2014. Vol. 92, No. 11. P. 64–88.
6. Kaiser C., Stocker A., Fellmann M. Monetizing Car Data: A Literature Review on Data-Driven Business Models. Proceedings of ECIS. Portsmouth, 2018.
7. Monitoring CO2 emissions from new heavy-duty vehicles in Europe / European Environment Agency. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023.
8. Zhu L., Yu F. R., Wang Y., Ning B., Tang T. Big Data Analytics in Intelligent Transportation Systems: A Survey. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20, No. 1. P. 383–398.
9. An Analysis of the Operational Costs of Trucking / American Transportation Research Institute (ATRI). Arlington, VA, 2023. 68 p.

МАЧУЛЬСЬКИЙ Михайло Андрійович – аспірант кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцький НТУ, e-mail: mykhailo.machulskyi@gmail.com.

MACHULSKYI Mykhailo – postgraduate student of the Department of Automobiles and Transport Technologies of Lutsk National Technical University, e-mail: mykhailo.machulskyi@gmail.com.

УДК 656
М.М. Маяк, В. І. Григоренко

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ У ВПРОВАДЖЕННІ ЕКОЛОГІЧНИХ СТАНДАРТІВ У ТРАНСПОРТНІЙ ЛОГІСТИЦІ

У роботі розглянуто основні світові тенденції впровадження екологічних стандартів у транспортній логістиці. Проаналізовано розвиток зеленої логістики, електрифікацію транспорту, використання альтернативних видів палива, цифровізацію логістичних процесів, мультимодальні перевезення та системи екологічного менеджменту. Визначено, що комплексне застосування екологічних і технологічних рішень сприяє зменшенню негативного впливу транспорту на довкілля та підвищенню ефективності логістичних процесів.

Ключові слова: транспортна логістика, екологічні стандарти, зелена логістика, декарбонізація, електрифікація транспорту, мультимодальні перевезення, цифровізація, екологічний менеджмент.

The paper examines the main global trends in the implementation of environmental standards in transport logistics. The development of green logistics, transport electrification, the use of alternative fuels, digitalization of logistics processes, multimodal transportation, and environmental management systems is analyzed. It is determined that the integrated application of environmental and technological solutions contributes to reducing the negative environmental impact of transport and improving the efficiency of logistics processes.
Keywords: transport logistics, environmental standards, green logistics, decarbonization, transport electrification, multimodal transportation, digitalization, environmental management.

Транспортна логістика сьогодні безпосередньо впливає на функціонування світової економіки, забезпечуючи переміщення сировини, комплектуючих, товарів і готової продукції між виробниками, постачальниками, торговельними мережами та кінцевими споживачами. Розвиток міжнародної торгівлі, глобалізація виробничих процесів, поширення електронної комерції та зростання вимог до швидкості доставки спричиняють подальше збільшення обсягів вантажних перевезень.

Водночас зі зростанням транспортної активності посилюється навантаження на довкілля. Воно проявляється у збільшенні викидів парникових газів і забруднювальних речовин, шумовому навантаженні та значному споживанні енергоресурсів. Транспортний сектор залишається одним із вагомих джерел викидів парникових газів, насамперед вуглекислого газу, що впливає на перебіг глобальних кліматичних змін. За даними International Transport Forum, транспорт формує близько 23 % світових енергетичних викидів CO_2, а подальше зростання попиту на перевезення без відповідних екологічних заходів може ускладнити досягнення кліматичних цілей [1]. Особливо актуальною ця проблема є для вантажних перевезень, оскільки логістичні ланцюги нерідко охоплюють великі відстані та передбачають використання кількох видів транспорту. Крім CO_2, транспорт є джерелом оксидів азоту, твердих частинок, вуглеводнів та інших шкідливих речовин, які погіршують якість повітря й негативно впливають на здоров'я людей та стан екосистем.

Саме тому транспортні та логістичні компанії дедалі активніше переходять до екологічних стандартів і практик. Їхнє основне завдання полягає у зменшенні негативного впливу транспортних і складських операцій на довкілля, підвищенні енергоефективності та раціональнішому використанні ресурсів. Йдеться не лише про застосування екологічніших транспортних засобів. Не менш важливими є організаційні рішення: оптимізація маршрутів, скорочення порожніх пробігів, розвиток мультимодальних перевезень, цифровий моніторинг викидів та вдосконалення управління логістичними процесами.

У цьому контексті дедалі ширше застосовується концепція «зеленої логістики». Її суть полягає у зменшенні негативного впливу логістичних операцій на довкілля на всіх етапах руху матеріальних потоків – від постачання сировини до доставки готової продукції кінцевому споживачеві. До основних напрямів зеленої логістики належать зниження викидів, раціональніше використання палива, оптимізація маршрутів, підвищення завантаженості транспортних засобів,

скорочення порожніх рейсів, використання екологічного пакування, підвищення енергоефективності складів та впровадження систем екологічного менеджменту. У науковій літературі зелена логістика розглядається не лише як інструмент зменшення екологічного навантаження, а й як один із чинників підвищення ефективності та конкурентоспроможності підприємств [2].

Темпи екологізації транспортної галузі значною мірою залежать і від державної політики. У країнах Європейського Союзу вона орієнтована на поступове скорочення транспортних викидів, розвиток сталої мобільності, підтримку екологічно чистого транспорту та перехід до низьковуглецевої економіки. Зокрема, Європейська комісія у Стратегії сталої та розумної мобільності визначила орієнтир щодо скорочення викидів від транспорту на 90 % до 2050 року [3]. Відповідно, для транспортних підприємств екологічні вимоги дедалі частіше стають не лише рекомендацією, а реальною умовою роботи та доступу до окремих ринків.

Ще одним помітним напрямом є інвестування у транспортні технології з меншим впливом на довкілля. Провідні виробники адаптуються до нових вимог і розширюють пропозицію електричних та гібридних вантажних автомобілів, автобусів, легких комерційних автомобілів і спеціалізованого транспорту. Так, Volvo Trucks повідомляє про серійне виробництво шести моделей електричних вантажівок і декларує ціль, щоб до 2030 року щонайменше 50 % глобальних продажів нових вантажівок компанії становили електричні моделі [4]. Такий приклад показує, що електрифікація поступово охоплює не лише легковий, а й вантажний та комерційний транспорт.

Паралельно змінюються й підходи до управління перевезеннями. Використання систем управління транспортом, GPS-моніторингу, алгоритмів оптимізації маршрутів, аналітики великих даних і штучного інтелекту дає можливість скорочувати пробіг транспортних засобів, уникати перевантажених ділянок дорожньої мережі, зменшувати час доставки та витрати палива. Завдяки точнішому плануванню маршрутів можна скоротити кількість порожніх рейсів, підвищити рівень використання вантажомісткості та раціональніше використовувати транспортний парк. Таким чином, цифровізація дає подвійний результат: зменшується екологічне навантаження і водночас скорочуються операційні витрати підприємства.

Зменшити екологічний вплив вантажних перевезень можна також завдяки ширшому використанню мультимодальних та інтермодальних схем доставки. Поєднання автомобільного, залізничного, морського та річкового транспорту дає змогу обирати більш раціональне співвідношення між швидкістю, вартістю та екологічністю перевезення. У багатьох випадках залізничний і водний транспорт характеризуються нижчим рівнем викидів на одиницю перевезеного вантажу порівняно з автомобільним, особливо на великих відстанях. Тому в міжнародній практиці частину вантажопотоків намагаються переносити з автомобільного транспорту на залізничний або водний. Крім скорочення викидів, це дає можливість зменшити навантаження на автомобільні дороги та підвищити ефективність логістичних ланцюгів. Основні напрями екологізації транспортної логістики та їх практичний ефект узагальнено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика основних тенденцій екологізації транспортної логістики

Напрям екологізації	Основний зміст	Очікуваний екологічний ефект	Практичне значення для логістики
Використання альтернативних палив	Перехід на електроенергію, водень, біопаливо, природний газ, гібридні силові установки	Зниження викидів CO_2, оксидів азоту та твердих частинок	Зменшення залежності від дизельного палива, підвищення енергоефективності перевезень
Електрифікація транспорту	Використання електричних вантажівок, автобусів і легких комерційних автомобілів	Скорочення локальних викидів у містах і логістичних центрах	Ефективне рішення для міської доставки, регіональних маршрутів і корпоративних автопарків
Оптимізація маршрутів	Використання GPS, TMS-систем, алгоритмів планування	Зменшення пробігу, витрат палива та порожніх рейсів	Скорочення операційних витрат і підвищення точності

	та цифрової аналітики		доставки
Мультимодальні перевезення	Поєднання автомобільного, залізничного, морського та річкового транспорту	Зниження викидів на одиницю перевезеного вантажу	Підвищення ефективності міжнародних і міжрегіональних перевезень
Енергоефективні склади	Використання LED-освітлення, сонячних панелей, електричної складської техніки, автоматизованих систем управління	Зменшення енергоспоживання та відходів	Підвищення екологічності всієї логістичної інфраструктури
Екологічний моніторинг	Облік і контроль викидів, ESG-звітність, екологічний аудит	Підвищення прозорості екологічного впливу підприємства	Відповідність міжнародним стандартам і вимогам партнерів

Крім технологічних змін, логістичні компанії все частіше впроваджують системи екологічного менеджменту та ESG-підходи. Міжнародні корпорації дедалі частіше очікують від постачальників і логістичних партнерів підтвердження екологічної відповідальності, прозорого обліку викидів та дотримання принципів сталого розвитку. Важливим орієнтиром у цьому напрямі є стандарт ISO 14001, який встановлює вимоги до систем екологічного менеджменту та може застосовуватися підприємствами різних сфер діяльності, зокрема транспортно-логістичними компаніями [5]. Для підприємства впровадження такого стандарту є способом систематизувати роботу з екологічними ризиками, контролювати використання ресурсів, планувати природоохоронні заходи та підтверджувати відповідність міжнародним вимогам.

Екологізація логістики може давати підприємствам не лише природоохоронний, а й економічний ефект. Зменшення витрат палива, ефективніше використання ресурсів і оптимізація логістичних процесів сприяють скороченню операційних витрат. Водночас екологічна відповідальність дедалі більше впливає на репутацію компаній і характер їхньої співпраці з партнерами, інвесторами та споживачами. Тому дотримання екологічних стандартів поступово стає частиною не лише екологічної, а й загальної корпоративної стратегії підприємства.

Отже, екологізація транспортної логістики вже не обмежується лише скороченням викидів транспортних засобів. Вона охоплює технології перевезень, цифрове управління, організацію маршрутів, складську інфраструктуру та екологічний менеджмент. Світова практика показує, що найбільш комплексний ефект забезпечує поєднання технічних та організаційних заходів. Це дає можливість одночасно зменшувати споживання ресурсів і негативний вплив на довкілля, оптимізувати витрати та підвищувати ефективність логістичних процесів.

Список використаних джерел

1. International Transport Forum. *ITF Transport Outlook 2023*. OECD Publishing, Paris, 2023. URL: https://www.oecd.org/en/publications/itf-transport-outlook-2023_b6cc9ad5-en.html
2. McKinnon A., Browne M., Whiteing A., Piecyk M. *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. Kogan Page, 2016. URL: https://www.koganpage.com/logistics-supplychain/green-logistics-9780749471859
3. European Commission. *Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future*. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy_en
4. Volvo Trucks. *Break-through: Volvo Trucks starts series production of heavy electric trucks*. 2022. URL: https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2022/sep/volvo-trucks-starts-series-production-of-heavy-electric-trucks.html
5. ISO. *ISO 14001 – Environmental management systems*. URL: https://www.iso.org/standard/14001.html

МАЯК Микола Михайлович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: mayak@lutsk-ntu.com.ua. https://orcid.org/0000-0002-8626-3084

ГРИГОРЕНКО Вікторія Ігорівна, здобувач вищої освіти, групи ТЛСмз-11, спеціальності J8 Автомобільний транспорт Луцького національного технічного університету, e-mail: grigorenkovika97@gmail.com

Mykola MAYAK, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: mayak@lutsk-ntu.com.ua. https://orcid.org/0000-0002-8626-3084

Viktoria HRYHORENKO, higher education student (group TLSmz-11, specialty J8 "Automobile Transport"), Lutsk National Technical University, e-mail: grigorenkovika97@gmail.com

УДК 656.078

І.С. Мурований, А. І. Лазарчук

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ДОСТАВКИ ДРІБНОПАРТІЙНИХ ВАНТАЖІВ У МІЖМІСЬКОМУ СПОЛУЧЕННІ

Розглянуто підходи до удосконалення доставки дрібнопартійних вантажів у міжміському сполученні. Обґрунтовано доцільність консолідації відправок, пулінгу, крос-докінгу, маршрутизації та цифрового моніторингу для зменшення витрат і підвищення якості обслуговування. Акцентовано увагу на проблемах координації учасників, нерівномірності попиту, часових обмеженнях і потребі прозорого відстеження вантажів. Запропоновано напрями підвищення ефективності через регіональні центри консолідації, автоматизацію складських операцій, гнучку тарифікацію та поєднання автомобільного транспорту з мультимодальними рішеннями для забезпечення своєчасності, збереження вантажів і стабільної конкурентоспроможності логістичних операторів на ринку в сучасних умовах розвитку.
Ключові слова: *дрібнопартійні вантажі, консолідація, крос-докінг, пулінг, маршрутизація, цифровізація, доставка.*

Approaches to improving the delivery of small-batch cargo in intercity traffic are considered. The feasibility of consolidating shipments, pooling, cross-docking, routing and digital monitoring is substantiated to reduce costs and improve service quality. Attention is focused on the problems of coordination of participants, uneven demand, time constraints and the need for transparent cargo tracking. Directions for increasing efficiency through regional consolidation centers, automation of warehouse operations, flexible pricing and combining road transport with multimodal solutions are proposed to ensure timeliness, cargo safety and stable competitiveness of logistics operators in the market in modern development conditions.
Keywords: *small-batch cargo, consolidation, cross-docking, pooling, routing, digitalization, delivery*

Розвиток електронної комерції, розширення мереж роздрібної торгівлі та зростання частки індивідуальних замовлень змінили структуру попиту на транспортні послуги. У міжміському сполученні дедалі частіше потрібно доставляти не повні автомобільні партії, а невеликі відправлення з різними строками, адресами, умовами обробки та вимогами до сервісу. Для перевізника це створює суперечність між потребою клієнта отримати швидку й прозору доставку та необхідністю забезпечити економічно доцільне використання рухомого складу, складських площ і трудових ресурсів.

Дрібнопартійні вантажі характеризуються невеликою масою або обсягом окремого відправлення, але значною кількістю замовлень, що потребують сортування, групування, проміжної обробки та контролю. Якщо такі вантажі перевозити окремими рейсами, собівартість доставки різко зростає, а коефіцієнт використання вантажомісткості транспортних засобів залишається низьким. Водночас надмірна консолідація може збільшити час очікування, ускладнити відстеження й погіршити якість сервісу. Саме тому актуальним є пошук збалансованої організації перевезень, у якій економія ресурсів не досягається за рахунок втрати надійності та своєчасності доставки.

Особливої ваги ця проблема набуває для міжміських маршрутів, де відстань перевезення є достатньо великою, а вантажопотоки між окремими пунктами можуть бути нерівномірними. У таких умовах ефективність залежить не лише від вибору автомобіля чи тарифу, а й від побудови мережі консолідаційних пунктів, графіків відправлення, алгоритмів маршрутизації, способів складської обробки та інформаційної взаємодії з клієнтом.

Проблематика доставки дрібнопартійних і збірних вантажів розглядається в українських дослідженнях переважно через питання підвищення ефективності транспортного обслуговування, оптимізації маршрутів і впорядкування процесів консолідації [1, 2].

Окремий напрям наукових пошуків пов'язаний із крос-докінгом і скороченням часу складської обробки [3]. Ефективність управління вантажними роботами із застосуванням алгоритмів нечіткої логіки, зокрема в умовах використання крос-докінгу [6]. Такі підходи показують, що проблема доставки дрібних партій вантажів не обмежується тільки маршрутом, а включає також організацію вантажних робіт і обробку інформації.

Для міжміського та міжнародного сполучення важливими є також дослідження комбінованих і мультимодальних технологій [4, 5].

Базовим підходом до організації доставки дрібнопартійних вантажів є консолідація, тобто об'єднання відправлень різних клієнтів у більші транспортні партії. Її головна перевага полягає у кращому використанні вантажомісткості автомобіля, зниженні питомих транспортних витрат і можливості формувати регулярні міжміські рейси. Водночас консолідація потребує точного планування часу приймання вантажів, сортування, накопичення достатнього обсягу відправок і подальшого розподілу за напрямками. Якщо ці процеси не узгоджені, економія на перевезенні може бути втрачена через затримки, додаткові складські операції та помилки у розподілі вантажів [1, 2].

Для підвищення ефективності консолідації доцільно формувати регіональні або локальні центри обробки дрібних відправлень. Такі центри можуть виконувати функції приймання, сортування, тимчасового накопичення, комплектування транспортних партій і передачі вантажів на міжміські маршрути. У межах регіону це дає змогу зменшити кількість малозавантажених рейсів, а на магістральних напрямках забезпечити стабільніші вантажопотоки. Важливо, щоб центри консолідації розміщувалися не лише за критерієм мінімальної відстані, а й з урахуванням густоти клієнтів, доступності транспортної інфраструктури, можливості швидкого перевантаження і прогнозованої нерівномірності попиту.

Пулінг дрібних відправок є близьким до консолідації, але більше орієнтується на спільне використання транспортного ресурсу декількома клієнтами або логістичними операторами. У міжміському сполученні така модель дає змогу об'єднувати вантажі на початковому етапі доставки, переміщувати їх одним рейсом до міста або регіону призначення, а потім розподіляти між кінцевими отримувачами. Перевагою пулінгу є зменшення дублювання маршрутів і можливість скорочення порожніх пробігів. Основними обмеженнями залишаються різні часові вимоги клієнтів, неоднорідність вантажів, потреба в узгодженні тарифів і підвищені вимоги до інформаційної прозорості. Крос-докінг доцільно застосовувати тоді, коли вантаж не потребує тривалого зберігання, а основним завданням є швидке переформування партій. У цій моделі відправлення прибувають на проміжний термінал, сортуються за напрямками й майже одразу завантажуються на інші транспортні засоби. Для дрібнопартійних вантажів це дозволяє зменшити складські запаси, скоротити час перебування вантажу в логістичній системі та пришвидшити доставку.

Проте ефективність крос-докінгу залежить від точності графіків прибуття, готовності персоналу, пропускної спроможності зон навантаження та інформаційної синхронізації між відправниками, перевізниками й одержувачами [3, 6].

Маршрутизація є одним із ключових інструментів удосконалення міжміської доставки. Для простих випадків може застосовуватися пошук найкоротшого шляху, однак у реальній роботі з дрібними партіями вантажів потрібно враховувати кілька пунктів забору й доставки, часові вікна, черговість обслуговування, вантажомісткість автомобіля, обмеження щодо сумісності вантажів і стан дорожньої мережі. Тому більш придатними є моделі задачі маршрутизації транспортних засобів, задачі комівояжера, евристичні алгоритми та інструменти оптимізації, які дозволяють отримувати прийнятні рішення для великих масивів замовлень без надмірних витрат часу.

Цифрові технології суттєво змінюють можливості управління дрібнопартійними перевезеннями. Системи управління транспортом, GPS-моніторинг, електронні заявки, автоматизоване формування маршрутних листів, штрих-кодування та клієнтські онлайн-портали забезпечують більшу прозорість логістичного процесу. Для клієнта це означає можливість бачити статус відправлення, прогнозований час прибуття та повідомлення про відхилення. Для перевізника цифровізація дає змогу аналізувати завантаження автомобілів, частоту затримок, ефективність маршрутів, роботу складів і якість виконання замовлень.

Важливою умовою ефективності є автоматизація вантажних робіт і застосування засобів пакетування. Дрібні відправлення часто потребують багаторазового переміщення, сортування та тимчасового групування, тому ручна обробка збільшує ризик помилок і пошкоджень. Використання палетування, контейнерів, маркованої тари, ручних і електричних візків, конвеєрних ліній, автоматичних стрейч-обмотувачів та систем сортування скорочує час обробки й підвищує збереженість вантажів. При цьому засоби пакетування мають відповідати фізичним властивостям вантажу, способу перевезення та вимогам до його ідентифікації.

Мультимодальні рішення можуть бути доцільними для довших міжміських або міжнародних напрямків, де автомобільний транспорт не завжди є найвигіднішим на всій довжині маршруту. Поєднання автомобільного, залізничного або контрейлерного перевезення дозволяє знизити витрати

на магістральній ділянці, зберігши гнучкість автомобільної доставки на першій і останній милі. Для дрібнопартійних вантажів така модель потребує ретельного узгодження терміналів, графіків, тарифів і відповідальності учасників, але може підвищити стійкість логістичної системи та зменшити залежність від одного виду транспорту [4].

Економічний ефект від удосконалення доставки дрібнопартійних вантажів доцільно оцінювати не лише через зменшення витрат на один кілометр. Важливими показниками є коефіцієнт використання вантажомісткості автомобіля, частка порожнього пробігу, середній час обробки одного відправлення, час перебування вантажу на складі, кількість помилок сортування, своєчасність доставки та рівень клієнтських претензій. Такий набір показників дозволяє побачити реальну ефективність системи, адже низька вартість перевезення може супроводжуватися затримками, пошкодженнями або втратою довіри клієнтів.

Суттєве значення має тарифна політика, оскільки саме вона впливає на поведінку клієнтів і можливість формування стабільних вантажопотоків. Якщо тариф не враховує час доставки, габарити, масу, потребу в додатковому пакуванні, терміновість і складність останньої милі, перевізник може отримувати економічно невигідні замовлення. Гнучка тарифікація дає змогу стимулювати клієнтів до вибору консолідованої доставки, заохочувати попереднє планування відправлень і встановлювати вищу плату за термінові або нестандартні послуги. У результаті тариф стає не лише інструментом покриття витрат, а й засобом керування попитом.

Окремої уваги потребує якість сервісу, адже для дрібнопартійних вантажів клієнт часто оцінює не тільки факт доставки, а й зручність оформлення, швидкість отримання інформації, точність прогнозу прибуття та можливість оперативно змінити адресу або час отримання. Тому логістична компанія повинна формувати стандарти обслуговування: допустимий час відповіді на запит, частоту оновлення статусу відправлення, порядок повідомлення про затримку, правила компенсації у разі пошкодження чи втрати вантажу. Такі стандарти підвищують довіру клієнтів і дозволяють порівнювати якість роботи різних підрозділів.

Ризики під час доставки дрібнопартійних вантажів виникають через велику кількість операцій з кожним відправленням. Найпоширенішими є помилки маркування, неправильне сортування, змішування вантажів різних клієнтів, пошкодження під час перевантаження, затримки через очікування комплектування партії та недостатня комунікація між складом і водієм. Для зменшення таких ризиків доцільно застосовувати уніфіковане маркування, електронну ідентифікацію відправлень, контрольні сканування на кожному етапі руху, фотофіксацію пошкоджень і чіткий розподіл відповідальності між працівниками терміналу, диспетчерами та водіями.

Поетапне впровадження удосконалень може передбачати спочатку аудит наявної системи доставки, потім визначення проблемних напрямків, формування центрів консолідації, запровадження цифрового обліку, оптимізацію маршрутів і перегляд тарифної політики. На першому етапі достатньо зібрати дані про кількість відправлень, середню масу, габарити, час обробки, частоту затримок і рівень завантаження автомобілів. На наступному етапі ці дані можна використати для вибору раціональних графіків відправлення, розрахунку потреби у складських площах і визначення доцільності крос-докінгу або пулінгу.

Для підприємств, які працюють у міжміському сполученні, важливо також розділяти магістральну та розвізну частини доставки. Магістральний рейс має бути максимально завантаженим і виконуватися за стабільним графіком, тоді як розвізна частина повинна бути гнучкою та враховувати щільність адрес, часові вікна клієнтів і доступність міської інфраструктури. Такий поділ дозволяє точніше оцінювати витрати, уникати змішування різних типів операцій і будувати систему управління, у якій кожна ділянка маршруту має власні показники ефективності.

Практичне удосконалення системи доставки має ґрунтуватися на комбінуванні методів. Консолідація забезпечує економію транспортного ресурсу, пулінг зменшує дублювання рейсів, крос-докінг прискорює перерозподіл вантажів, цифрові системи підвищують прозорість, а оптимізаційні алгоритми допомагають обирати раціональні маршрути. Однак жоден із цих методів не є універсальним. Для стабільних напрямків доцільні регулярні консолідовані рейси, для нерівномірного попиту – гнучка тарифікація і пулінг, для швидких відправлень – крос-докінг, а для великих відстаней – мультимодальні схеми.

Висновки. Доставка дрібнопартійних вантажів у міжміському сполученні є складним логістичним процесом, у якому ефективність залежить від узгодження транспортних, складських, інформаційних та сервісних операцій. Основними проблемами залишаються нерівномірність попиту, різні часові

вимоги клієнтів, недостатнє завантаження автомобілів, складність сортування, ризик затримок і потреба в прозорому відстеженні кожного відправлення.

Найбільш перспективними напрямами удосконалення є розвиток регіональних центрів консолідації, застосування пулінгу, впровадження крос-докінгу, автоматизація вантажних робіт, використання цифрових систем моніторингу та оптимізація маршрутів з урахуванням часових і технологічних обмежень. Поєднання цих підходів дає змогу зменшити питомі витрати, підвищити рівень використання рухомого складу, скоротити час обробки вантажів і забезпечити кращу якість обслуговування клієнтів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення моделей вибору раціональної схеми доставки залежно від обсягів відправлень, структури вантажопотоків і вимог до строків перевезення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сковрон І. Я., Дорош А. С., Демченко Є. Б., Болвановська Т. В., Малашкін В. В. Підвищення ефективності доставки збірних вантажів автомобільним транспортом. Транспортні системи та технології перевезень. 2020. DOI: https://doi.org/10.15802/tstt2020/217400
2. Ситенько А. Ю., Процик О. П. Сучасний стан та проблематика доставки консолідованих вантажів. Транспортні системи та технології перевезень. 2019. DOI: https://doi.org/10.15802/tstt2019/178216
3. Калініченко О. П., Севідова В. В. Підвищення ефективності операцій крос-докінгу для міжнародних автомобільних перевезень на основі розроблення спільних операційних графіків. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2025. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336554
4. Вернигора Р. В., Журавель І. Л., Єльнікова Л. О. Дослідження ефективності застосування контрейлерної технології перевезення вантажів в Україні. Транспортні системи та технології перевезень. 2021. DOI: https://doi.org/10.15802/tstt2021/247884
5. Погрібняк О. М., Дорош А. С., Демченко Є. Б. Сучасні умови та особливості правового регулювання перевезень вантажів автомобільним транспортом України. Транспортні системи та технології перевезень. 2018. DOI: https://doi.org/10.15802/tstt2018/164070
6. Пістунов І., Лущан А. Підвищення ефективності управління вантажними роботами на базі алгоритмів нечіткої логіки. Економіка та суспільство. 2020. URL: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/54

МУРОВАНИЙ Ігор Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету транспорту та механічної інженерії Луцького національного технічного університету, e-mail: igor_lntu@ukr.net. https://orcid.org/0000-0002-9749-980X

ЛАЗАРЧУК Анна Ігорівна, здобувач вищої освіти, групи ТЛСмз-11, спеціальності J8 Автомобільний транспорт Луцького національного технічного університету, e-mail: annalazarchuk2@gmail.com

Igor MUROVANYI, PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Dean of the Faculty of Transport and Mechanical Engineering, Lutsk National Technical University, e-mail: igor_lntu@ukr.net. https://orcid.org/0000-0002-9749-980X

Anna LAZARCHUK, higher education student, group TLSmz-11, specialty J8 Motor Transport, Lutsk National Technical University, e-mail: annalazarchuk2@gmail.com

УДК 629.356

І.С. Мурований, С. Л. Слюсар

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

БЕЗПЕКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НАФТОПРОДУКТІВ АВТОЦИСТЕРНАМИ

Розглянуто особливості організації автомобільних перевезень нафтопродуктів автоцистернами з урахуванням вимог безпеки, технічного стану рухомого складу, маршрутизації та екологічного захисту. Акцентовано увагу на ризиках, що виникають під час завантаження, руху й розвантаження легкозаймистих вантажів. Узагальнено вимоги до цистерн, водіїв, документального супроводу та контролю перевізного процесу. Запропоновано напрями підвищення безпеки перевезень через технічний моніторинг, планування маршрутів, підготовку персоналу та цифровий контроль операцій у сучасних умовах функціонування транспортних підприємств та системне оновлення внутрішніх інструкцій підприємств відповідно до чинних правил і практики.

Ключові слова: *нафтопродукти, автоцистерна, небезпечні вантажі, безпека, маршрут, ризик, екологія.*

The features of the organization of road transportation of petroleum products by tanker trucks are considered, taking into account safety requirements, technical condition of rolling stock, routing and environmental protection. Attention is focused on the risks that arise during loading, movement and unloading of flammable cargo. The requirements for tankers, drivers, documentary support and control of the transportation process are summarized. Directions for improving transportation safety through technical monitoring, route planning, personnel training and digital control of operations in modern conditions of operation of transport enterprises and systematic updating of internal instructions of enterprises in accordance with current rules and practices are proposed.
Keywords*: petroleum products, tanker truck, dangerous goods, safety, route, risk, ecology.*

Автомобільні перевезення нафтопродуктів є важливою складовою забезпечення паливом промисловості, аграрного сектору, будівельних підприємств, автозаправних станцій та інших споживачів. Водночас такі перевезення належать до підвищено небезпечних, оскільки бензин, дизельне паливо, мазут, бітум та інші нафтопродукти мають властивості, що можуть спричинити пожежу, вибух, токсичне забруднення або значні екологічні втрати. Тому організація транспортного процесу не може зводитися лише до вибору найкоротшого маршруту чи мінімізації витрат. Вона повинна охоплювати технічну справність автоцистерни, підготовку водія, відповідність документів, вибір безпечного маршруту, контроль операцій завантаження і розвантаження, а також готовність до реагування у разі аварійної ситуації [1, 2].

Актуальність теми посилюється тим, що автомобільний транспорт часто забезпечує доставку нафтопродуктів на короткі та середні відстані, зокрема до об'єктів, які не мають прямого залізничного або трубопровідного сполучення. У таких умовах автоцистерна стає гнучким, але водночас ризикованим елементом логістичного ланцюга. Особливої уваги потребують перевезення в межах населених пунктів, біля об'єктів критичної інфраструктури, мостів, шляхопроводів, місць із високою інтенсивністю руху та ділянок доріг зі складними геометричними параметрами. Невдала організація рейсу може створити загрозу не лише для перевізника, а й для населення та довкілля.

Законодавство України визначає небезпечні вантажі як речовини, матеріали або вироби, що через свої властивості за певних умов можуть спричинити шкоду життю і здоров'ю людей, об'єктам інфраструктури, транспортним засобам та навколишньому середовищу [1]. Для нафтопродуктів ця характеристика є принциповою, адже їхня небезпека проявляється не тільки під час дорожньо-транспортної пригоди, а й у процесі наливу, зливу, зберігання в цистерні, випаровування та контакту з джерелами займання. Саме тому дослідження особливостей перевезення нафтопродуктів автомобілями-цистернами має практичне значення для транспортних підприємств, експедиторських компаній, служб безпеки руху та органів контролю.

Питання безпечного транспортування небезпечних вантажів в Україні досліджується в роботах, присвячених нормативному забезпеченню, організації перевізного процесу, класифікації ризиків і впливу дорожніх умов на стан водія [4 – 8].

Нормативною основою організації таких перевезень є Закон України «Про перевезення небезпечних вантажів», наказ МВС України щодо убезпечення перевезення небезпечних вантажів автомобільним транспортом, а також положення Європейської угоди про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ДОПНВ) [1, 2, 3]. Ці документи визначають вимоги до транспортних засобів, водіїв, маркування, документації, допуску до перевезень, підготовки учасників процесу та контролю за дотриманням правил. Водночас у наукових працях залишається потреба в більш прикладному узагальненні саме для перевезення нафтопродуктів автоцистернами, де одночасно діють технічні, логістичні, екологічні та безпекові обмеження.

Автомобіль-цистерна для перевезення нафтопродуктів повинен забезпечувати герметичність, стійкість до корозії, механічну міцність і захист від утворення іскор та статичної електрики. Особливе значення мають справність запірної арматури, дихальних клапанів, люків, наливно-зливних пристроїв, заземлення, протипожежного обладнання та засобів аварійної локалізації витоку. Для перевезення небезпечних вантажів транспортний засіб має відповідати вимогам допуску, а його конструктивні характеристики повинні бути підтверджені відповідним свідоцтвом [2, 3]. У практичному аспекті це означає, що перед рейсом необхідно перевіряти не лише загальний технічний стан автомобіля, а й функціонування спеціального обладнання цистерни.

Стійкість автоцистерни є одним із ключових чинників безпеки. На відміну від твердих вантажів, рідкий вантаж здатний переміщуватися всередині резервуара під час розгону, гальмування, маневрування та руху на поворотах. Це змінює положення центра мас і може погіршувати поперечну стійкість транспортного засобу. Найбільш небезпечними є режими часткового заповнення, коли виникає інтенсивне перетікання рідини, а інерційні сили діють на стінки цистерни нерівномірно. Для зменшення цього ефекту застосовують внутрішні перегородки, хвилерізи та секційне виконання резервуара. Вони не усувають ризик повністю, але зменшують амплітуду коливань рідини, підвищують керованість і знижують імовірність перекидання (рис. 1).



Рисунок 1 – Схема впливу часткового заповнення цистерни на поперечну стійкість автоцистерни

Процес завантаження нафтопродуктів має виконуватися на спеціально обладнаних майданчиках із протипожежними засобами, системами заземлення, контролем герметичності та можливістю збору аварійних розливів. Перед наливом потрібно перевірити сумісність залишків попереднього вантажу з новим продуктом, стан внутрішньої поверхні цистерни, справність люків і з'єднань. Під час наливу важливо не допускати переповнення, оскільки температурне розширення рідини може спричинити підвищення тиску і витік. Після завершення операції необхідно перевірити щільність закриття арматури, наявність маркування, пломбування та комплектність перевізних документів.

Розвантаження також потребує регламентованої послідовності дій. Насамперед автоцистерна повинна бути встановлена на безпечному майданчику, загальмована, заземлена та віддалена від джерел відкритого полум'я. Злив нафтопродуктів має відбуватися через справні герметичні рукави і з'єднання, а персонал повинен контролювати тиск, швидкість зливу та можливі ознаки витоку. У разі перевезення в'язких нафтопродуктів, наприклад мазуту або бітуму, додатково враховують температуру вантажу та технологічну готовність приймальної ємності. Недотримання цих умов може призвести до втрат продукту, пошкодження обладнання, забруднення території або створення пожежонебезпечної ситуації.

Важливою складовою організації перевезення є маршрутизація. Для звичайних вантажів маршрут часто обирається за критеріями відстані, часу або вартості, однак для нафтопродуктів

пріоритет має безпека. Доцільно обмежувати рух через густонаселені райони, тунелі, ділянки з великими заторами, аварійно небезпечні перехрестя, дороги з різкими ухилами, недостатньою шириною проїзної частини або незадовільним покриттям. Якщо уникнути таких ділянок неможливо, маршрут має супроводжуватися додатковими організаційними заходами: уточненням часу руху, вибором менш завантажених періодів, інструктажем водія, контролем швидкісного режиму та постійним зв'язком із диспетчером.

Людський чинник у перевезеннях небезпечних вантажів має не менше значення, ніж технічний стан автоцистерни. Водій повинен мати відповідну підготовку, знати властивості вантажу, порядок дій у разі витоку, пожежі, дорожньо-транспортної пригоди або вимушеної зупинки. Дослідження функціонального стану водіїв показують, що складні дорожні умови, напруженість руху та відповідальність за небезпечний вантаж підвищують психоемоційне навантаження [7, 8]. Тому планування рейсу має враховувати не лише технічну можливість виконання доставки, а й реальний режим праці та відпочинку водія, тривалість перебування за кермом, якість стоянок і можливість безпечного відновлення працездатності.

Документальне забезпечення перевезення нафтопродуктів охоплює перевізні документи, інформацію про вантаж, інструкції на випадок аварійної ситуації, підтвердження допуску транспортного засобу, документи водія та інші матеріали, передбачені правилами перевезення небезпечних вантажів [1, 2]. Їх наявність не є формальністю, оскільки у випадку аварії саме документи дають змогу швидко ідентифікувати речовину, клас небезпеки, можливі наслідки контакту з довкіллям та рекомендовані дії аварійних служб. Неповний або неправильно оформлений пакет документів ускладнює контроль і підвищує ризик помилкових дій під час надзвичайної ситуації.

Екологічний аспект перевезення нафтопродуктів пов'язаний із можливістю забруднення ґрунтів, водних об'єктів і повітря. Навіть незначний витік палива може мати довготривалі наслідки, якщо він потрапляє до зливової каналізації, відкритих водойм або на сільськогосподарські землі. Тому транспортні підприємства повинні мати не лише справні автоцистерни, а й алгоритми локалізації розливів, комплекти сорбентів, первинні засоби пожежогасіння та процедури повідомлення відповідальних служб. Екологічна безпека в цьому випадку є частиною загальної транспортної безпеки, а не окремим другорядним напрямом.

Сучасним напрямом удосконалення перевезень є використання цифрових інструментів контролю. GPS-моніторинг, датчики рівня палива, контроль відкриття люків, електронні чек-листи передрейсової перевірки, фотофіксація стану пломб і цифровий обмін документами можуть зменшити кількість організаційних помилок. Для перевізника це створює можливість відстежувати відхилення від маршруту, несанкціоновані зупинки, різкі гальмування, перевищення швидкості та інші події, які підвищують ризик аварії. Водночас цифровізація не замінює професійної підготовки персоналу, а лише підсилює контрольованість процесу.

З практичної точки зору систему безпеки перевезення нафтопродуктів автоцистернами доцільно будувати як послідовність взаємопов'язаних етапів: підготовка транспортного засобу, перевірка документації, підготовка водія, безпечне завантаження, контроль руху на маршруті, безпечне розвантаження і післярейсовий огляд. Кожен із цих етапів має власні ризики, але найбільшу загрозу створює їх поєднання. Наприклад, технічно справна цистерна не гарантує безпеки за неправильного маршруту, а досвідчений водій не може повністю компенсувати несправність запірної арматури чи відсутність аварійного комплекту.

Для транспортного підприємства корисним є запровадження внутрішньої матриці ризиків, у якій кожен рейс оцінюється за кількома групами чинників: властивості вантажу, технічний стан автоцистерни, складність маршруту, погодні умови, інтенсивність руху, досвід водія та готовність пунктів наливу і зливу. Така оцінка не потребує надмірно складної методики, однак дає змогу заздалегідь визначити рейси, які потребують додаткового контролю. Наприклад, перевезення в нічний час, рух через складні міські ділянки або транспортування частково заповненої цистерни мають отримувати вищий рівень уваги диспетчера та відповідальної особи з безпеки.

Показниками ефективності організації перевезень нафтопродуктів можуть бути не лише своєчасність доставки чи транспортні витрати, а й кількість виявлених передрейсових несправностей, частота відхилень від маршруту, дотримання швидкісного режиму, кількість несанкціонованих зупинок, повнота документального супроводу, відсутність втрат вантажу та порушень під час наливно-зливних операцій. Такий підхід зміщує акцент із реагування на вже здійснену аварію до профілактики небезпечних подій. Він також відповідає сучасному розумінню транспортної безпеки,

де результатом є не лише виконаний рейс, а й контрольований рівень ризику на всіх етапах перевізного процесу [5, 6].

Отже, удосконалення автомобільних перевезень нафтопродуктів автоцистернами має базуватися на поєднанні нормативної дисципліни, технічного контролю та управлінських рішень. Перевізник повинен мати чіткі інструкції для типових і нестандартних ситуацій, регулярно оновлювати їх відповідно до змін у правилах, проводити інструктаж персоналу та аналізувати кожне відхилення від встановленої процедури. Саме накопичення таких даних створює основу для подальшого вдосконалення маршрутів, графіків руху, вимог до рухомого складу і системи навчання водіїв.

Висновки. Перевезення нафтопродуктів автомобілями-цистернами є складним транспортно-логістичним процесом, у якому поєднуються вимоги до небезпечних вантажів, технічного стану спеціалізованого рухомого складу, кваліфікації водія, маршрутизації, документального супроводу та екологічного захисту. Нафтопродукти не можна розглядати як звичайний рідкий вантаж, адже їхні фізико-хімічні властивості формують підвищений рівень пожежної, вибухової та екологічної небезпеки. Основними напрямами підвищення безпеки є використання справних і допущених до перевезення автоцистерн, контроль ступеня заповнення резервуара, застосування внутрішніх перегородок і хвилерізів, ретельна організація наливу та зливу, вибір маршруту з урахуванням ризиків, дотримання режимів праці водія, наявність повного пакета документів і впровадження цифрового моніторингу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісну оцінку ризиків на окремих маршрутах, розроблення критеріїв вибору безпечного шляху руху та інтеграцію даних технічного моніторингу автоцистерн у системи управління перевезеннями.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Закон України «Про перевезення небезпечних вантажів» від 06.04.2000 № 1644-III. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1644-14
2. Про убезпечення перевезення небезпечних вантажів автомобільним транспортом : наказ МВС України від 21.03.2008 № 130. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0309-08
3. Європейська угода про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ДОПНВ). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_217
4. Терещенко О. П., Ванюта О. Р. Огляд стану автомобільних перевезень небезпечних вантажів. Репозитарій ВНТУ. 2019. URL: http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/27354
5. Тарельник Н. В. Класифікація ризиків під час вантажних перевезень автомобільним транспортом. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. № 4. URL: http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/36893
6. Марисюк В. О., Березюк О. В. Movement aspects of dangerous cargo by special vehicles. Репозитарій ВНТУ. 2024. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/43171
7. Гейзеровський В. В. Закономірності зміни функціонального стану водія вантажного автомобіля під час перевезення небезпечних вантажів : кваліфікаційна робота магістра. Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2024. URL: https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/66952
8. Афонін М. Вплив умов руху на функціональний стан водіїв при перевезенні небезпечних вантажів. Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання : тези доповідей III Всеукраїнської науково-теоретичної конференції. Львів, 2019. С. 125-126. URL: https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/45849

МУРОВАНИЙ Ігор Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету транспорту та механічної інженерії Луцького національного технічного університету, e-mail: igor_lntu@ukr.net. https://orcid.org/0000-0002-9749-980X

СЛЮСАР Сергій Леонідович, здобувач вищої освіти, групи ТЛСм-11, спеціальності J8 Автомобільний транспорт Луцького національного технічного університету, e-mail: serhii.sliusar@wog.ua

Igor MUROVANYI, PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Dean of the Faculty of Transport and Mechanical Engineering, Lutsk National Technical University, e-mail: igor_lntu@ukr.net. https://orcid.org/0000-0002-9749-980X

Serhiy SLYUSAR, higher education student, group TLSm-11, specialty J8 Motor Transport, Lutsk National Technical University, e-mail: serhii.sliusar@wog.ua

УДК 656.025.4:519.872

В.П. Онищук
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВАЛОСТІ ЧЕРГИ НА МИТНИЦІ ПРИ ВИКОНАННІ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Пункт пропуску на спільному автомобільному кордоні розглянуто як тандемну систему масового обслуговування з послідовними фазами контролю, нейтральною зоною скінченної місткості та блокуванням каналів після обслуговування. Показано, чому класична модель M/M/c систематично недооцінює хвіст розподілу часу очікування вантажного автомобіля. Запропоновано поєднання аналітичної оцінки, дискретно-подійної імітації та прогнозу на часових рядах. На умовних параметрах проілюстровано вплив додаткового каналу, розширення нейтральної зони, слотового режиму прибуття та режимних збоїв на середнє значення і 90-й процентиль часу очікування.

Ключові слова: пункт пропуску, міжнародні перевезення, система масового обслуговування, тандемна черга, блокування, імітаційне моделювання, єЧерга.

A road border crossing point shared by two states is treated as a tandem queueing system with consecutive control phases, a neutral zone of finite capacity and blocking-after-service of control lanes. It is shown why the classical M/M/c model systematically underestimates the tail of the truck waiting-time distribution. A combination of an analytical approximation, discrete-event simulation and time-series forecasting is proposed. Using conditional parameters, the effects of an extra lane, a larger neutral zone, slotted (e-queue) arrivals and operational disruptions on the mean and the 90th percentile of waiting time are illustrated.

Key words: border crossing point, international road haulage, queueing system, tandem queue, blocking, discrete-event simulation, e-queue.

Постановка проблеми. У міжнародних автомобільних перевезеннях час проходження пункту пропуску (у професійному вжитку – «митниці», хоча митний контроль є лише однією з фаз технологічної схеми пропуску) становить окрему складову тривалості рейсу, яка, на відміну від часу руху, погано піддається плануванню. На українсько-польську ділянку припадає близько третини вантажного автомобільного потоку через державний кордон, причому чотири з п'яти пунктів пропуску для вантажного транспорту працюють у режимі стійкого перевантаження [1], а час очікування в чергах нерідко перевищує 8–12 год [5]. Після запровадження єЧерги фізична черга значною мірою перетворилась на віртуальну, проте сумарний час очікування від цього не скоротився.

Для оперативного планування рейсів потрібна оцінка часу очікування для заданого моменту прибуття до пункту пропуску, а модель типу M/M/*c*, яку найчастіше застосовують для таких задач, не відповідає передумовам об'єкта. Мета роботи – обґрунтувати структуру моделі тривалості очікування на пункті пропуску, яка відтворює реальні механізми формування черги, та на ілюстративному прикладі оцінити порівняльну ефективність керівних впливів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняні дослідження пункту пропуску як системи масового обслуговування мають уже доволі довгу історію. У [2] пропускна спроможність автомобільного пункту пропуску моделювалась класичним апаратом СМО, у [3] встановлено причинно-наслідкові зв'язки між типами черг перед пунктами пропуску та їх кількісними характеристиками, в [4] для прогнозування інтенсивності роботи пунктів пропуску застосовано нейро-нечітку модель. Більшість цих робіт виконано до запровадження єЧерги, тобто для іншого режиму функціонування кордону.

Із нещодавніх публікацій показовою є [5], де митний пункт пропуску описано моделлю M/M/*c* з пуассонівським вхідним потоком та експоненційним обслуговуванням і показано, що збільшення кількості каналів з двох до п'яти скорочує очікування з 4,1 до 1,2 год. Отриманий результат є правдоподібним, однак передумови моделі не відповідають об'єкту: вхідний потік на кордоні нестаціонарний, час контролю не має експоненційного розподілу, а канали не є незалежними від стану суміжної сторони.

Закордонні роботи здебільшого стосуються американо-канадського та американо-мексиканського кордонів. У [6] для прогнозування затримки на пункті пропуску Peace Bridge

використано перехідні (нестаціонарні) розв'язки багатоканальних СМО типу $M/E_k/n$ та BMAP/PH/n, валідовані за мікроскопічною імітаційною моделлю; у [7] за даними про черги побудовано модель планування чисельності персоналу, а пізніші роботи додали до цього методи машинного навчання для прогнозу часу очікування. Спільна риса цих робіт – вони працюють з одностороннім пунктом пропуску, де вся технологія контролю зосереджена в одній юрисдикції. На українсько-польському кордоні контроль здійснюють дві сторони послідовно, і це має бути відображено в структурі моделі.

Нормативна основа єЧерги для вантажівок закладена експериментальним проєктом на Ягодині [8] та правилами 2025 року, що впровадили пріоритетні категорії (швидкопсувні вантажі, AEO, транзит за T1 і Carnet TIR) й обмежили перенесення броні [9] – для моделі це кілька класів заявок і некласична дисципліна черги.

Виклад основного матеріалу. *Структурна модель.* Пункт пропуску на спільному кордоні двох держав природно описується тандемною (багатофазною) СМО (рис. 1). Автомобіль послідовно проходить фазу контролю української сторони – прикордонний, митний, за потреби ваговий, фіто- чи ветеринарний, – потрапляє в нейтральну зону скінченної місткості K і далі в дзеркальну фазу контролю суміжної сторони. Ключовим механізмом є блокування після обслуговування: коли нейтральна зона заповнена, автомобіль, що завершив український контроль, не може звільнити канал, і канал залишається зайнятим без виконання обслуговування. Саме блокування переносить чергу «вгору за течією» і породжує важкі хвости розподілу часу очікування, яких моделі з незалежними фазами не відтворюють.

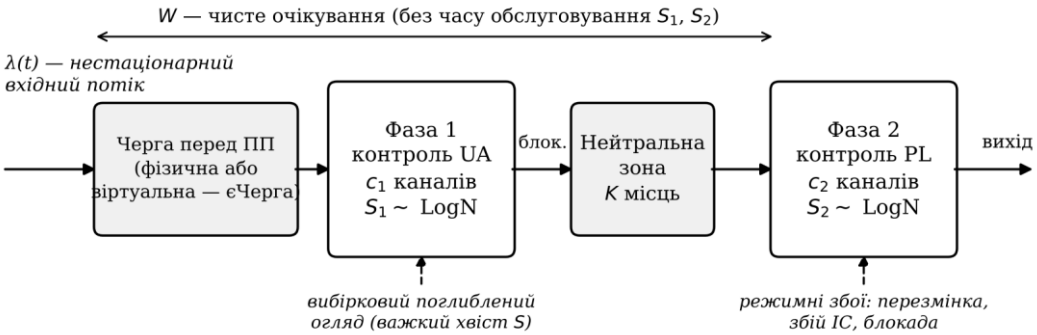


Рис. 1. Структурна схема пункту пропуску як тандемної СМО з блокуванням

Вхідний потік $\lambda(t)$. Він нестаціонарний – добовий цикл, тижневий, сезонність, – і для його опису у вільному режимі прибуття прийнятний неоднорідний пуассонівський процес. Але в режимі єЧерги потік перестає бути пуассонівським: система видає слоти з майже сталим темпом, автомобілі прибувають у межах слота з певним розкидом і з деякою часткою неявок. Час очікування при цьому не зникає – він переходить у віртуальну чергу, яку модель має враховувати як окрему компоненту.

Час обслуговування S. Технологічні схеми ДПСУ встановлюють граничну тривалість контролю для вантажного автомобіля, та фактичний час – величина з правосторонньою асиметрією: типове оформлення триває десятки хвилин, а вибірковий поглиблений огляд – години. Логнормальний розподіл з домішкою «важкого» компонента описує це краще за експоненційний, а коефіцієнт варіації S є одним з головних чинників довжини черги.

Режимні перемикання. Перезмінка, збій інформаційної системи, посилення контролю, блокада з того боку – усе це зупиняє або звужує одну з фаз на час, порівнянний з інтервалом обслуговування. У моделі це двостановий (чи багатостановий) процес, який керує кількістю активних каналів.

Інструменти. Аналітична оцінка для багатоканальної фази з довільними розподілами – через апроксимацію Аллена–Кунена [10] для фази з c каналами, коефіцієнтом завантаження ρ та коефіцієнтами варіації інтервалів прибуття c_a і обслуговування c_s:

$$W_q \approx \rho^{\sqrt{2(c+1)}-1} / (c(1-\rho)) \cdot (c_a^2 + c_s^2) / 2 \cdot \mathrm{E}[S], \quad (1)$$

дає порядок величини й чутливість до c_s, але не бачить ні блокування, ні перемикань. Дискретно-подійна імітація (SimPy, AnyLogic) відтворює обидва ефекти й дає повний розподіл W, а не тільки середнє. Прогноз на часових рядах (градієнтний бустинг, рекурентні мережі) придатний для оперативного планування рейсів, але не розкриває механізму формування черги і тому не замінює структурної моделі при проєктуванні пункту пропуску.

Ілюстративний розрахунок. Щоб показати, як працює модель, побудовано дискретно-подійну

імітацію тандемної СМО з блокуванням на умовних параметрах (табл. 1). Параметри не калібровано за даними конкретного пункту пропуску, тому наведені значення ілюструють механізми, а не є прогнозом.

Таблиця 1 – Параметри ілюстративної імітаційної моделі (умовні)

Параметр	Позначення	Значення
Середня інтенсивність прибуття; амплітуда добового / тижневого циклу λ(*t*)	λ	6,6 авт./год; 0,35 / 0,25
Кількість каналів контролю UA / PL	c_1 / c_2	4 / 4
Середній час контролю UA / PL	E[S_1] / E[S_2]	24 / 29 хв
Коефіцієнт варіації S_1 / S_2 (логнормальний)	c_s	0,45 / 0,55
Частка поглиблених оглядів / їх середня тривалість	p / E[S_d]	6 % / 55 хв
Місткість нейтральної зони	K	12 авт.
Збої на боці PL: середній інтервал / тривалість	–	14 год / 1,3 год (працює 1 канал)
Слотовий режим: частка неявок / розкид прибуття	–	8 % / σ = 20 хв

Розглянуто п'ять сценаріїв: S0 – базовий; S1 – додатковий канал на суміжній (вузькій) фазі; S2 – удвічі більша нейтральна зона; S3 – слотовий режим прибуття з тим самим реалізованим потоком, що й у S0; S4 – базовий, але без режимних збоїв. Горизонт – 30 діб із трьома добами розігріву, 12 реплікацій; очікування *W* рахується чистим, без часу обслуговування. Результати зведено у табл. 2 і на рис. 2.

Таблиця 2 – Характеристики часу очікування *W* за сценаріями (середнє за 12 реплікаціями)

Сценарій	Середнє *W*, год	Медіана, год	*p*90, год	*W* > 6 год, %	Блокування UA, % часу
S0 – базовий	5,5 ± 2,0	4,9	11,4	38	15
S1 – +1 канал PL	1,2 ± 0,2	0,7	3,3	2	3
S2 – нейтральна зона ×2	4,8 ± 0,8	4,2	10,3	33	11
S3 – слотовий потік	1,9 ± 1,0	1,4	4,4	6	9
S4 – без режимних збоїв	2,2 ± 0,4	1,8	5,3	7	7

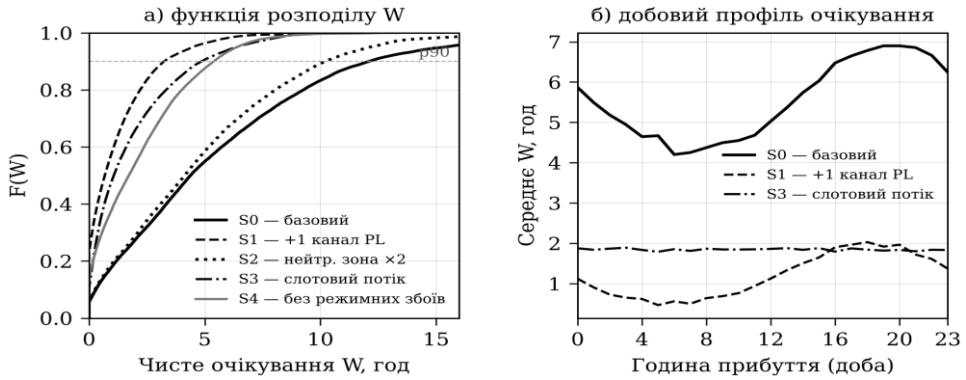


Рис. 2. Функція розподілу *W* (а) та середнє *W* залежно від години прибуття (б)

Аналіз результатів дає підстави для таких тверджень.

По-перше, у базовому сценарії близько 75 % чистого очікування припадає на фазу перед українським контролем, хоча вузьким місцем є суміжна фаза (ρ_{PL} = 0,89 проти ρ_{UA} = 0,75): черга формується вгору за течією від вузького місця, оскільки канали першої фази 15 % часу заблоковані заповненою нейтральною зоною. Розкид між реплікаціями (± 2,0 год) свідчить про нестійкість системи за ρ ≈ 0,9.

По-друге, розширення нейтральної зони (S2) дає незначний ефект – середнє *W* зменшується з 5,5 до 4,8 год, а 90-й процентиль перевищує 10 год. Буфер перерозподіляє чергу між фазами, не змінюючи пропускної здатності системи.

По-третє, режимні збої (S0 проти S4) впливають на очікування непропорційно до втраченої

пропускної здатності. За канало-часом вони становлять близько 6 % пропускної здатності суміжної фази (збій тривалістю ~1,3 год раз на 14 год, під час якого з чотирьох каналів діє один), проте збільшують середнє очікування у 2,5 раза, а частку автомобілів з очікуванням понад 6 год – із 7 до 38 %. Додатковий канал (S1) дає сильніший ефект (5,5 → 1,2 год), але означає збільшення пропускної здатності на 25 % з відповідними капітальними та кадровими витратами; у розрахунку на одиницю пропускної здатності режимні збої є найвагомішим з розглянутих чинників, і їх статистика має входити до моделі нарівні з кількістю каналів.

По-четверте, слотовий режим прибуття (S3) за того самого потоку скорочує фізичне очікування майже втричі. Проте модель не враховує очікування у віртуальній черзі між бронюванням і слотом, яке для перевізника є таким самим простоєм; коректне порівняння потребує об'єднаної моделі віртуальної та фізичної черги, що є завданням наступного етапу.

Обмеження. Головне обмеження пов'язане з даними. У відкритому доступі є довжина черги й орієнтовний час очікування за пунктами пропуску, але відсутні пофазна тривалість контролю, місткість нейтральних зон і статистика режимних збоїв. Параметри моделі доведеться відновлювати розв'язанням зворотної задачі – за умовою відтворення спостережуваного розподілу W, – проте така ідентифікація не є однозначною: одну й ту саму чергу можна пояснити і повільним обслуговуванням, і частими збоями. Розрізнити ці чинники дозволять натурні хронометражні спостереження на пункті пропуску або дані журналів єЧерги.

Висновки. 1. Пункт пропуску на спільному кордоні слід моделювати як тандемну СМО з нестаціонарним вхідним потоком, логнормальним обслуговуванням, нейтральною зоною скінченної місткості та блокуванням після обслуговування; модель M/M/c для цього об'єкта систематично занижує хвіст розподілу часу очікування.

2. Ілюстративна імітація показала, що черга формується вгору за течією від вузького місця, розширення нейтральної зони не змінює пропускної здатності, а найсильніший важіль – додатковий канал на вузькій фазі; режимні збої при цьому впливають на очікування непропорційно до втраченої ними пропускної здатності (близько 6 % канало-часу дають 2,5-кратне зростання середнього очікування).

3. Слотовий режим прибуття скорочує фізичну чергу, але переносить очікування у віртуальну; подальша робота – побудова об'єднаної моделі віртуальної та фізичної черги з класами пріоритету і калібрування за даними конкретного пункту пропуску.

Список використаних джерел

1. Максименко А. Аналіз обсягу вантажних потоків через українсько-польську ділянку державного кордону. *Економіка та суспільство.* 2023. № 47. DOI: 10.32782/2524-0072/2023-47-25.

2. Пасічник А. М., Шуть С. П., Клен О. М. Моделювання та дослідження пропускної спроможності автомобільних пунктів пропуску. *Вісник Академії митної служби України. Сер.: Технічні науки.* 2013. № 1(49). С. 5–11.

3. Дмитренко О., Боровик О. Причинно-наслідкові зв'язки між типами черг автотранспортних засобів перед автомобільними пунктами пропуску та їх кількісними характеристиками. *Збірник наукових праць НАДПСУ. Сер.: Військові та технічні науки.* 2013. № 1(59). С. 97–108.

4. Андрушко В. З. Методика прогнозування інтенсивності роботи пунктів пропуску із застосуванням нейро-нечіткої моделі. *Збірник наукових праць НАДПСУ. Сер.: Військові та технічні науки.* 2014. № 2. С. 6–20.

5. Хомяк А. Е., Баранов І. О., Кіріцева О. В. Підвищення ефективності міжнародних перевезень деревини автомобільним транспортом. *Наука та виробництво.* 2025. Вип. 30. С. 207–217. DOI: 10.31498/2522-9990302025347249.

6. Lin L., Wang Q., Sadek A. W. Border crossing delay prediction using transient multi-server queueing models. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2014. Vol. 64. P. 65–91. DOI: 10.1016/j.tra.2014.03.013.

7. Yu M., Ding Y., Lindsey R., Shi C. A data-driven approach to manpower planning at U.S.–Canada border crossings. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2016. Vol. 91. P. 34–47.

8. Про особливості реалізації експериментального проекту з організації управління чергами вантажних автомобілів перед МПП «Ягодин – Дорогуськ» за допомогою електронної системи: Постанова КМУ від 02.12.2022 № 1349.

9. єЧерга для вантажівок: затверджено нові правила функціонування системи. Урядовий портал. 2025. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/yecherha-dlia-vantazhivok-zatverdzheno-novi-pravyla-funktsionuvannia-systemy

10. Gross D., Shortle J. F., Thompson J. M., Harris C. M. Fundamentals of Queueing Theory. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2018. 576 p.

ОНИЩУК Василь Петрович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри транспортної логістики, Луцький національний технічний університет, e-mail: v.onyshchuk@lntu.edu.ua
Vasyl ONYSHCHUK – Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Transport Logistics, Lutsk National Technical University, e-mail: v.onyshchuk@lntu.edu.ua

УДК 629.33:621.362:004.94

В.І. Павлюк, Ю.В. Булік
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ У СИСТЕМАХ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Розглянуто особливості застосування термоелектричних модулів типу TEG (Thermoelectric Generator) і TEC (Thermoelectric Cooler) у системах автомобільного транспорту. Проаналізовано основні напрями використання термоелектричних модулів для утилізації теплових втрат, термостабілізації електронних компонентів та підтримання температурних режимів окремих систем транспортного засобу. Застосовано підходи до моделювання теплових та електричних процесів роботи термоелектричних модулів із використанням експериментальних досліджень, цифрових моделей і комп'ютерної симуляції. Визначено перспективи застосування TEG і TEC у системах автомобільного транспорту в умовах підвищення вимог до енергоефективності та розвитку електромобільності.

Ключові слова: *термоелектричний модуль, TEG, TEC, автомобільний транспорт, комп'ютерне моделювання, цифрова модель, енергоефективність, теплові процеси*

The features of applying thermoelectric modules of the TEG (Thermoelectric Generator) and TEC (Thermoelectric Cooler) types in automotive transport systems are considered. The main areas of thermoelectric module application for waste heat recovery, thermal stabilization of electronic components, cooling, and maintaining temperature conditions of individual vehicle systems are analyzed. Approaches to modeling thermal and electrical processes of thermoelectric module operation using experimental studies, digital models, and computer simulation are applied. The prospects for the application of TEG and TEC in automotive transport systems under increasing energy efficiency requirements and the development of electric mobility are determined.

Key words: *thermoelectric module, TEG, TEC, automotive transport, computer modeling, digital model, energy efficiency, thermal processes*

Постановка проблеми у загальному вигляді

Актуальність застосування термоелектричних модулів в автомобільному транспорті зумовлена передусім підвищенням вимог до енергоефективності. Особливістю застосування термоелектричних модулів є потреба у компактних системах. Термоелектричні генератори TEG (Thermoelectric Generator) використовуються для утилізації теплових втрат шляхом їх перетворення в електричну енергію, а модулі типу TEC (Thermoelectric Cooler) – для систем терморегулювання локальних об'єктів. Доцільність використання термоелектричних генераторів на транспортних засобах з двигунами внутрішнього згоряння обумовлена значними тепловими втратами (понад третину) навіть і на автомобілях, обладнаних енергоефективними системами з високим коефіцієнтом корисної дії. Сьогодні, в умовах широкого застосування гібридних систем та інтенсивного розвитку електромобілів, термоелектричні модулі знайшли свою нішу через потребу термостабілізації електрокомпонентів, терморегулювання для керування мікрокліматом тощо. Основною властивістю термогенератора є перетворення теплової енергії в електричну (ефект Зеєбека), а термоелектричного охолоджувача – відведення тепла від об'єкта з використанням електричної енергії (ефект Пельтьє). Крім того, важливою особливістю є зворотність процесів термоелектричних модулів, що дозволяє реалізовувати термостабілізацію локальним охолодженням та нагріванням, здійснюючи керування електроживленням модульного елемента. Основним недоліком, що стримує широке впровадження термоелектричних модулів, на сьогодні лишається низький коефіцієнт корисної дії модулів. Дослідження пристроїв і установок, що містять термоелектричні модулі TEG та TEC, ефективно здійснюються із використанням спеціалізованих програмних комплексів комп'ютерного моделювання та симуляції. Такі програмні середовища містять математичні й цифрові моделі термоелектричних модулів, а окремі з них – бібліотеки поширених типів модулів із закладеними електричними, тепловими та експлуатаційними характеристиками. У деяких випадках програмне забезпечення дозволяє коригувати параметри наявних моделей або задавати власні характеристики для моделювання нових чи експериментальних конструкцій. Разом із тим фактичні характеристики

роботи термоелектричних модулів у реальних умовах експлуатації можуть відрізнятися від даних, наведених виробником у технічній документації. Це пов'язано з особливостями теплообміну, режимами навантаження, якістю теплового контакту, нестабільністю температурного перепаду, а також конструктивними та технологічними відхиленнями конкретних модулів. У зв'язку з цим для підвищення точності комп'ютерного моделювання та достовірності результатів симуляції на початкових етапах розробки доцільно проводити експериментальні дослідження термоелектричних модулів з метою уточнення їх реальних характеристик і параметрів, що надалі використовуватимуться у цифрових моделях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Використання моделей термоелектричних модулів у складі цифрових компоновок і віртуальних прототипів розроблюваних пристроїв дає можливість отримувати характеристики їх роботи, аналізувати теплові та електричні процеси, визначати розподіл температурних зон, оцінювати режими навантаження та ефективність теплообміну [1, 2]. Це створює передумови для створення альтернативних систем транспортних засобів [2–4], систем цифрової трансформації автомобільного транспорту [5–7], оптимізації конструкції обладнання та удосконалення параметрів функціонування термоелектричних систем і підвищення енергоефективності транспортних засобів [3–5].

У дослідженнях роботи систем з термоелектричними модулями використовується підхід до моделювання теплових та електричних процесів із проведенням експериментальних досліджень, використанням цифрових моделей і здійсненням комп'ютерної симуляції. Для підвищення точності комп'ютерного моделювання користувач інколи має можливість коригувати характеристики за результатами експериментальних досліджень [2], однак під час використання модулів з бібліотеки частина параметрів зазвичай є фіксованою відповідно до datasheet виробника. Для прикладу (рис. 1) наведено характеристики максимальної теплової потужності від температури. Максимальна теплова

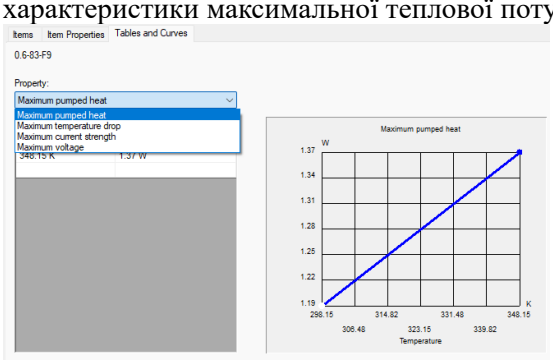


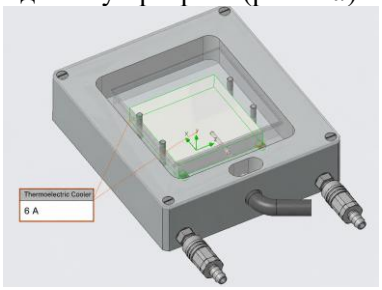
Рисунок 1 – Характеристика максимальної теплової потужності термоелектричного модуля залежно від температури

потужність є однією з характеристик бібліотечного термоелектричного модуля.

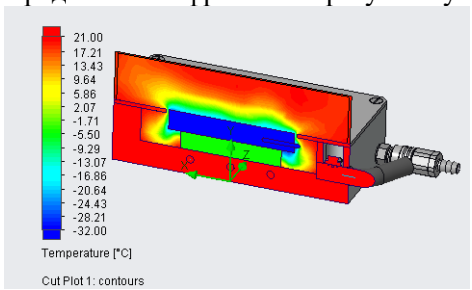
Виклад основного матеріалу дослідження

У роботі проведено дослідження з моделюванням роботи термоелектричного модуля TEC типу за допомогою комп'ютерної симуляції та експериментально визначено характеристики електрорушійної сили (EPC) модуля типу TEG.

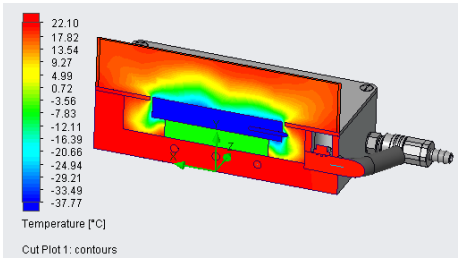
Комп'ютерну симуляцію проведено у середовищі Creo 12. Приклад моделювання роботи термоелектричного модуля TEC (MCPK2-19808AC-S) наведено на рисунку 2 для різних значень сили струму, заданих у програмі (рис. 2 *а*). На рисунках 2 *б–г* представлено фрагменти результату



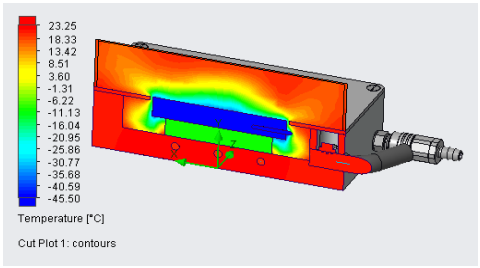
а



б



в



г

Рисунок 2 – Симуляція роботи ТЕС на моделі: інтерфейс встановлення струму живлення (*а*) для відповідних значень струму 3,5А (*б*), 4,5А (*в*), 6А (*г*)

комп'ютерного моделювання температурного поля термоелектричної системи, де відображено розподіл температур у процесі роботи пристрою з термоелектричним модулем в основі.

Крім того, досліджені характеристики впливу різниці температур на поверхнях модуля (температурного перепаду) в інтервалі ΔT=10–80 °C без електричного навантаження на характеристики роботи термоелектричних модулів TEG (SP1848-27145). Слід відзначити високу чутливість системи до зміни температури та стабільність лінійної характеристики ЕРС. Отримані результати добре узгоджуються з наведеними характеристиками у джерелі [8], а для окремих значень різниці температур, наприклад ΔT= 60°C та 80 °C, мають стабільнішу характеристику.

Висновки з цього дослідження

На даному етапі дослідження за допомогою комп'ютерної симуляції проведено моделювання роботи термоелектричних модулів охолодження. Створено модель та отримано характеристики температурного поля термоелектричної системи у інтервалі значень сили струму 3,5–6А.

Досліджено експериментально характеристику електрорушійної сили модуля термогенератора від різниці температур його поверхонь в інтервалі 10–80°C та підтверджено стабільність та лінійність характеристики.

Постійне удосконалення технологій призводить до покращення параметрів і характеристик термоелектричних модулів, появи нових більш ефективних зразків, а масове виробництво сприятиме урізноманітненню сфер їх застосування у системах автомобільного транспорту.

Отримані результати можуть бути використані для уточнення параметрів цифрових моделей термоелектричних систем транспортних засобів.

1. Bringing Thermoelectricity into Reality. Edited by Patricia Aranguren. www.intechopen.com. URL: https://www.intechopen.com/books/6575

2. Павлюк В.І., Булік Ю.В., Дубицький О.С. Моделювання роботи обладнання з термоелектричними модулями в основі. Матеріали XIII-ої Міжнародної науково-технічної інтернетконференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 15-17 квітня 2025 року : збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.] – Вінниця: ВНТУ, 2025. – (PDF, 415 с.) – С. 267–268. / URL : https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/materialy_transport_04_2025.pdf

3. Dolatiasl K. Electric Power Generation Using a Thermoelectric Generator from Coolant Fluid of Internal Combustion Engine of Cars. SIGMA. 2019; 37(2) : 415–22. URL : https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2030503

4. A Thermoelectric Generator Replacing Radiator for Internal Combustion Engine Vehicles. TELKOMNIKA, Vol.9, No.3, December 2011, pp. 523–530. URL : http://doi.org/10.12928/telkomnika.v9i3.744

5. Optimization of energy flow – in thermal management of electric vehicles based on real vehicle testing and digital twin simulation. URL: https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104607

6. Fuller, A., Fan, Z., Day, C. and Barlow, C. (2020) Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. IEEE Access, 8, 108952-108971. URL : https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358

7. Булік Ю. В., Павлюк В. І., Онищук В. П., Куць Н. Г. Поліпшення цифрових моделей систем транспортних засобів, обладнаних термоелектричними модулями. Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 20-22 жовтня 2025 року: збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – (PDF, 536 с.). – С. 97–99.

8. SP1848-27145 4.8V Seebeck Thermoelectric Power Generator TEG Peltier Module. URL: https://uploads.envistiamall.com/repository/assets/Envistia_Mall_SP1848_Seebeck_TEG_Peltier_Module_EM-ECOMP-0076.pdf?utm_source=chatgpt.com

ПАВЛЮК Василь Іванович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, ЛНТУ, e-mail: v.pavliuk@lutsk-ntu.com.ua

БУЛІК Юрій Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, ЛНТУ, e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua

PAVLIUK Vasyl – PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Automobiles Transport Department, LNTU, e-mail: v.pavliuk@lutsk-ntu.com.ua

BULIK Yurii – PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Automobiles Transport Department, LNTU, e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua

УДК 656.051

Ю.Я. Ройко, Ю.Ю. Євчук, Д.Ю. Сидоров
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ПРОБЛЕМИ В РУСІ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ У ЦЕНТРАЛЬНИХ ЧАСТИНАХ МІСТ ТА СПОСОБИ ЇХ РОЗВ'ЯЗАННЯ

У великих та особливо великих містах їх центральні частини вирізняються високою щільністю вулично-дорожньої мережі та значною інтенсивністю транспортних потоків, особливо якщо такі міста мають радіально-кільцеву конфігурацію мережі вулиць. До того ж, центральні частини таких міст часто є діловими та адміністративними центрами, де розміщені великі пункти притягання загальноміського та регіонального значення. За існуючих рівнів автомобілізації та автомобілекористування мешканців такі особливості є причиною виникнення цілого ряду транспортних проблем, зокрема високого рівня завантаження вулиць, значних затримок руху транспортних і пішохідних потоків. Тут часто виникає необхідність застосування світлофорного регулювання з метою зменшення кількості та ступеня небезпеки конфліктних напрямків, надання пріоритету для певного способу пересування учасників дорожнього руху. Як правило, резерви пропускної здатності у цих частинах міст є вичерпаними.

Ключові слова: *вулично-дорожня мережа, транспортний потік, світлофорне регулювання, інтенсивність руху, пропускна здатність, учасники дорожнього руху, громадський транспорт.*

In large and especially large cities, their central areas are characterized by a high density of the street network and significant traffic intensity, particularly if the city has a radial-ring street network configuration. Moreover, the central parts of such cities are often business and administrative hubs, home to major attractions of citywide and regional significance. Given current levels of car ownership and vehicle use among residents, these characteristics give rise to a range of traffic problems, including high street congestion and significant delays in both vehicular and pedestrian traffic. Here, there is often a need for traffic signal control to reduce the number and severity of conflicting traffic directions and to give priority to a specific mode of travel for road users. As a rule, capacity reserves in these parts of cities are exhausted.

Keywords: *street and road network, traffic flow, traffic light regulation, traffic volume, capacity, road users, public transport.*

Для сучасних великих та особливо великих міст з радіально-кільцевою конфігурацією вулично-дорожньої мережі є ряд транспортних проблем, які мають притаманні лише їм особливості формування потоків учасників дорожнього руху, закономірності формування цих потоків та загальні риси мобільності мешканців. Слід відзначити, що можливості перерозподілу обсягів руху також тут є обмеженими через цілий ряд чинників, як транспортних, так і містобудівних.

Проаналізуємо існуючі проблеми, які виникають під час пересування учасників дорожнього руху для таких типів міст, та чинники, що їх спричиняють. Головним завданням та основною метою є розв'язання проблем із затримками в русі під час пересування транспортних та пішохідних потоків, а також забезпечення достатньої та зручної інфраструктури для немоторизованих пересувань. Основними чинниками, які можуть формувати проблеми, що впливають на ефективність функціонування міської транспортної системи, є [1]:

– конфігурація вулично-дорожньої мережі;
– потенційні можливості для формування резервів пропускної здатності у різних районах міста;
– конфігурація маршрутної мережі громадського транспорту;
– розселення мешканців територією міста та специфіка утворення транспортних районів;
– специфіка життєдіяльності мешканців, що пов'язано з характером та функціями міста;
– рівень розвитку транспортної інфраструктури та її інтеграції в єдину транспортну систему;
– географічні особливості.

Проаналізуємо детальніше кожен з чинників з прив'язкою до центральних частин міста. У містах з радіально-кільцевою конфігурацією вулично-дорожньої мережі основні магістральні вулиці, які забезпечують зв'язок між транспортними районами в центральній частині міста, середмісті та периферії і здатні пропускати найбільші за обсягами транспортні потоки, сходяться у центрі міста. Відповідно тут спостерігається висока щільність вулично-дорожньої мережі, ключові вузли якої –

регульовані перехрестя з гранично високою інтенсивністю руху з усіх підходів. Це, у свою чергу, потребує введення багатофазного світлофорного регулювання з метою зменшення кількості та ступеня небезпеки конфліктних точок та конфліктних зон під час почергового пропуску різних груп учасників дорожнього руху. Багатофазне (3-4 фази) світлофорне регулювання потребує введення світлофорних циклів великої тривалості (80–120 с). За іншого випадку, тобто при меншій тривалості світлофорного циклу, а відтак і малих тривалостях фаз, суттєво зменшується ефективна тривалість самої фази регулювання через зростання частки тривалості стартової затримки. З іншого боку, фази з тривалим дозвільним сигналом (понад 20 с) у певній фазі регулювання пропорційно спричиняють тривалі заборонні сигнали на конфліктуючих напрямках. В умовах високої інтенсивності прибуття транспортних засобів до стоп-лінії (понад 500 од./год) за великої тривалості заборонного сигналу значно зростають транспортні черги. Враховуючи високу щільність вулично-дорожньої мережі, коли відстань між стоп-лініями є відносно невеликою (іноді менше 100 м), накопичувальна здатність умовного прогону (ділянки вулиці між суміжними стоп-лініями) є вкрай низькою і такі черги здатні «заблокувати» суміжне перехрестя. Досить часто ці радіальні магістральні вулиці є такими лише за призначенням, але не за геометричними параметрами, що робить проблеми в русі транспортних потоків критичними. Основним напрямком вирішення цього завдання для центральних зон є впровадження інтелектуальних транспортних систем управління дорожнім рухом та облаштування вулиць з одностороннім рухом.

Щодо потенційних можливостей ефективного забезпечення пересування мешканців та функціонування транспортної системи важливим є наявність або відсутність резервів пропускної здатності та можливості для розвитку інфраструктури для забезпечення альтернативних способів пересування мешканців. З погляду затримки руху слід відзначити, що у заторах простоює не лише приватний автомобільний транспорт, але й міський громадський. Враховуючи, що сучасні міста прагнуть забезпечити сталу міську мобільність, одним з ключових аспектів якої є зменшення пересувань моторизованим транспортом, то збільшення привабливості громадського транспорту є одним із першочергових завдань, оскільки він здатний переміщати велику кількість людей на значні відстані у будь-яку пору, що не притаманно пішим пересуванням (в межах одного або кількох суміжних транспортних районів) або пересуванням з використанням засобів мікромобільності (велосипеди, самокати тощо), які не є масові та піддаються впливу погодних умов. Відтак, втрати часу громадського транспорту у заторах – це не є питанням покращення його привабливості. Оскільки у центральних частинах міст, особливо історичних, де вулично-дорожня мережа формувалась століттями, фактично немає можливості змінити геометричні параметри вулиць з метою збільшення їх пропускної здатності або для облаштування інфраструктури для забезпечення альтернативних (від автомобільного) способів пересування, тому доводиться вводити різноманітні системи пріоритизації для певного способу пересування або для певних типів транспортних засобів. Такі рішення потребують запровадження обмежень у часі та просторі з метою вирівнювання складу транспортного потоку та зменшення пікового навантаження на окремих ділянках вулиць чи зонах. Поряд з обмеженнями забезпечують часову або просторову пріоритизацію для громадського транспорту. Для центральних частин міст актуальним рішенням є одночасне впровадження обох способів, коли рухомому складу громадського транспорту облаштовують виділені смуги, рух якими управляється адаптивними режимами роботи світлофорної сигналізації або за алгоритмом пошуку розривів у транспортному потоці, або ж за алгоритмом пошуку конкретного типу транспортного засобу у потоці (до прикладу, автобуса, тролейбуса або ж трамвая). Не слід забувати, що центральні частини міст – це території з найбільшими за обсягами пішохідними потоками, які потребують облаштування зручних та доступних громадських просторів. Основним напрямком вирішення цього завдання для центральних частин міст є введення систем обмежень та пріоритизації для окремих способів пересувань, а також впровадження комплексних заходів зі збільшення привабливості громадського транспорту.

Під час розгляду проблем, пов’язаних із забезпеченням транспортної доступності, необхідно завжди пам’ятати, що конфігурація вулично-дорожньої та маршрутної мереж, а також розселення мешканців територією міста і специфіка утворення транспортних районів є взаємопов’язані. У більшості сучасних українських міст відбувається настільки стрімкий приріст мешканців та активне житлове будівництво, що не відповідає темпам створення якісної транспортної інфраструктури. Це, у свою чергу, створює проблеми з доступністю до такої інфраструктури, перевантаження окремих ділянок вулично-дорожньої мережі, відсутність достатньої кількості облаштованих місць для паркування тощо. Особливо критичною є ситуація, коли перелічені чинники одночасно накладаються у суміжних з центральною частиною транспортних районах.

Незважаючи на те, що у своїх Планах сталої міської мобільності міста прагнуть акцентувати увагу на піших та немоторизованих пересуваннях, прагнення мешканців до використання приватного легкового автомобіля під час повсякденних пересувань є значним, що притаманно не лише абсолютній більшості українських міст, але й багатьом містам Східної та Центральної Європи. Тут якраз проявляється чинник специфіки життєдіяльності мешканців, характер та функції міста, а також рівень розвитку та інтегрованості транспортної інфраструктури. Досить часто на вибір мешканцями способу пересування впливає [2,3]: доступність до ліній громадського транспорту; рівень інтегрованості між маршрутами міського громадського транспорту та зовнішнього пасажирського транспорту; доступність паркування; швидкість пересування; вартість проїзду; рівень розвитку інформаційних та комунікаційних сервісів тощо. Враховуючи, що у цій роботі основна увага зосереджена на аналітичному огляді стану лише частини міської транспортної системи, а саме її центральної зони, то тут важливо звертати увагу на рівень розвитку та облаштованості транспортно-пересадкових вузлів, а також інтегрованості способів пересування.

Також важливо звернути увагу на географічні особливості планування міської території, оскільки цей чинник має суттєвий вплив на формування транспортних мереж, спосіб пересування мешканців та доступність.

Отже, за результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень відзначимо такі головні аспекти із зазначеної проблематики:

1. У центральних частинах міст ефективними є заходи з пріоритизації тих способів пересування, які забезпечують їх масовість.

2. Для великих та особливо великих міст з радіально-кільцевою конфігурацією вулично-дорожньої мережі у центральних частинах, де існує висока щільність цієї мережі та висока інтенсивність руху транспортних потоків, пріоритетом є застосування двофазних циклів світлофорного регулювання, що можна досягти шляхом обмеження лівоповоротних маневрів та облаштування одностороннього руху транспортних потоків, з сумарною тривалістю циклу до 60 с. Таке рішення ефективне за умови відстані між стоп-лініями суміжних регульованих перехресть (пішохідних переходів) 100-150 м.

3. Суттєвого зменшення затримок під час руху громадського транспорту можна досягти за умови надання йому одночасно часового та просторового пріоритету.

Подальшими завданнями з дослідження цієї проблематики є проведення імітаційного моделювання з метою визначення прогнозованого стану транспортних потоків значної інтенсивності та зміни закономірностей у цих потоках за різних способів пріоритизації руху.

[1] Форнальчик Є.Ю. Розвиток науково-прикладних основ управління транспортними потоками: монографія / Є.Ю. Форнальчик, Ю.Я. Ройко, В.В. Гілевич. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2022. – 240 с.

[2] Royko Yu., Hrytsun O., Bura R., Rohalskyi R., Yevchuk Yu. Improving the methodology of adaptive traffic control at pedestrian crosswalks / Communications – Scientific Letters of University of Zilina. – 2025. – Vol. 27 (issue 3). – P. 90–101

[3] Royko Yu. Public Transport Prioritization and Descriptive Criteria-Based Urban Sections Classification on Arterial Streets / Yu Royko, Ye. Fornalchyk, E. Koda, I. Kernytskyy, O. Hrytsun, R. Bura, P. Osinski, A. Markiewicz, T. Wierzbicki, R. Barabash, R. Humenuyk, P. Polyansky // Sustainability. – 2023. – No. 15. – P. 1–15

РОЙКО Юрій Ярославович – к.т.н., доцент, директор інституту механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: yurii.y.roiko@lpnu.ua

ЄВЧУК Юрій Юрійович – д-р філософії, старший викладач кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: yurii.y.yevchuk@lpnu.ua

СИДОРОВ Дмитро Юрійович – аспірант кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: dmytro.sydorov.asp.2025@lpnu.ua

ROYKO Yuriy – PhD, Associate Professor, Head of the Institute of Mechanical Engineering and Transport, Lviv Polytechnic National University, e-mail: yurii.y.roiko@lpnu.ua

YEVCHUK Yurii – PhD, Senior Lecturer, Department of Transport Technologies, Lviv Polytechnic National University, e-mail: yurii.y.yevchuk@lpnu.ua

SYDOROV Dmytro – postgraduate student, Department of Transport Technologies, Lviv Polytechnic National University, e-mail: dmytro.sydorov.asp.2025@lpnu.ua

УДК 621.3.04
В.Р. Самостян
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РЕАЛЬНИЙ ЗАПАС ХОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

У даній роботі було проведено дослідження факторів, що впливають на реальний запас ходу електромобіля на прикладі Nissan Leaf. У результаті дослідження встановлено: швидкість руху має найбільший вплив на витрати електроенергії; при низьких температурах запас ходу може зменшуватися на 30–35 %; агресивний стиль керування значно підвищує споживання енергії; складні дорожні умови також призводять до зменшення запасу ходу.
***Ключові слова**: запас ходу, електромобіль, споживання енергії.*

This work investigated the factors that affect the real range of an electric vehicle using the Nissan Leaf as an example. The study found that: driving speed has the greatest impact on electricity consumption; at low temperatures, range can be reduced by 30–35%; aggressive driving style significantly increases energy consumption; difficult road conditions also lead to a decrease in range.
***Keywords**: range, electric vehicle, energy consumption.*

Для дослідження факторів, що впливають на реальний запас ходу електромобілів, було обрано електромобіль Nissan Leaf з акумуляторною батареєю ємністю 40 кВт·год. Дана модель є однією з найпоширеніших на українському ринку електромобілів, що дозволяє використовувати відкриті експлуатаційні дані та статистичну інформацію.

Для проведення дослідження було використано аналітичний метод, що ґрунтується на порівнянні зміни витрат енергії за різних умов експлуатації автомобіля. Основними факторами, які досліджуються у роботі, є:

швидкість руху;
температура навколишнього середовища;
стиль керування водія;
дорожні умови та рельєф місцевості.

Запас ходу електромобіля визначався за формулою

$$L = \frac{E}{q}$$

де L – запас ходу, км; E – ємність акумуляторної батареї, кВт·год; q – витрати енергії на 1 км пробігу, кВт·год/км.

Ця формула дозволяє оцінити зміну запасу ходу залежно від зміни витрат електроенергії.

Одним із найважливіших факторів, що впливають на запас ходу електромобіля, є швидкість руху. При збільшенні швидкості зростає аеродинамічний опір, що призводить до підвищення витрат електроенергії. Результати аналізу залежності витрат енергії від швидкості руху наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 Вплив швидкості руху на витрати електроенергії

Швидкість, км/год	Витрати енергії, кВт·год/100 км	Орієнтовний запас ходу, км
30	12	333
50	14	285
70	16	250
90	18	222
110	21	190
130	25	160

На основі таблиці побудовано графік залежності витрат енергії від швидкості руху.

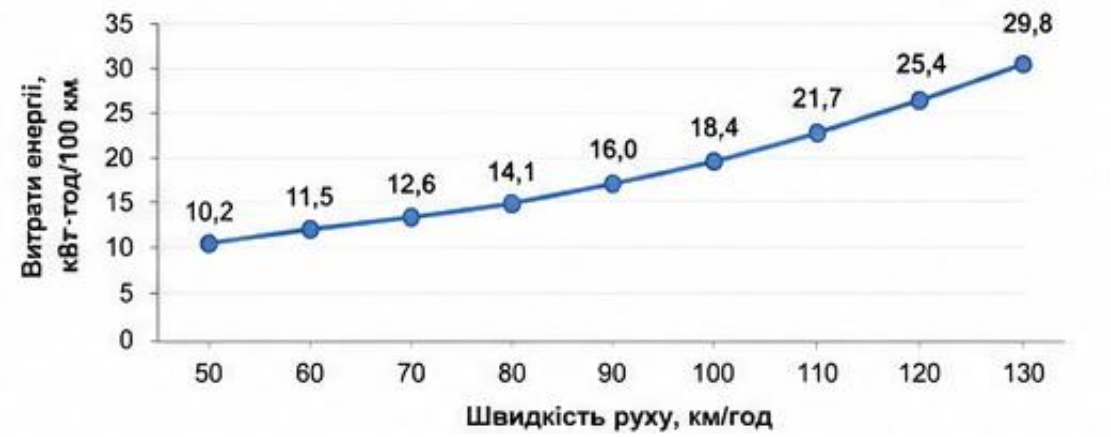


Рисунок 1 – Залежність витрат електроенергії від швидкості руху

Графік показує, що найменші витрати енергії спостерігаються при швидкості 30–50 км/год. При збільшенні швидкості до 110–130 км/год витрати електроенергії зростають майже вдвічі.

Це пояснюється тим, що аеродинамічний опір зростає пропорційно квадрату швидкості. Внаслідок цього при русі на високій швидкості електродвигун споживає значно більше енергії.

Отже, для досягнення максимального запасу ходу оптимальною є швидкість руху в межах 50–70 км/год.

Ще одним цікавим фактором є дослідження впливу температури навколишнього середовища. Температура навколишнього середовища суттєво впливає на роботу акумуляторних батарей електромобілів. При низьких температурах відбувається зменшення хімічної активності електроліту, що призводить до зниження ефективної ємності батареї. Залежність запасу ходу від температури наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 Вплив температури на запас ходу електромобіля

Температура, °C	Середні витрати енергії, кВт·год/100 км	Запас ходу, км
-10	24	166
0	21	190
+10	18	222
+20	16	250
+30	17	235

На основі таблиці побудуємо графік залежності запасу ходу від температури.

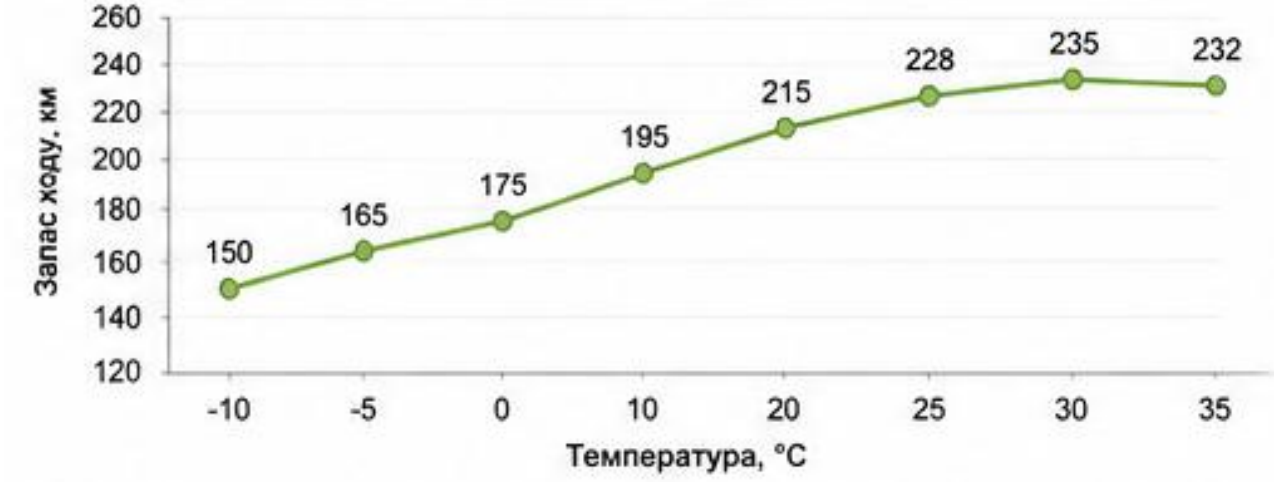


Рисунок 2 – Залежність запасу ходу від температури навколишнього середовища

Аналіз результатів показує, що найбільший запас ходу досягається при температурі близько +20°C. При зниженні температури до -10°C запас ходу може зменшуватися приблизно на 30–35 %.

Основними причинами цього є:
зменшення ефективності акумуляторної батареї;
використання системи обігріву салону;
збільшення внутрішнього опору батареї.

Не менш важливим фактором є стиль керування електромобілем. Стиль керування водія також суттєво впливає на витрати електроенергії. Часті розгони та різкі гальмування призводять до підвищеного споживання енергії.

Для дослідження було розглянуто три основні стилі керування: економний; стандартний; агресивний. Результати дослідження наведені у таблиці 3.

Таблиця 3 Вплив стилю керування на витрати енергії

Стиль керування	Витрати енергії, кВт·год/100 км	Запас ходу, км
Економний	14	285
Стандартний	17	235
Агресивний	21	190

На основі цих даних будується діаграма витрат енергії залежно від стилю керування.

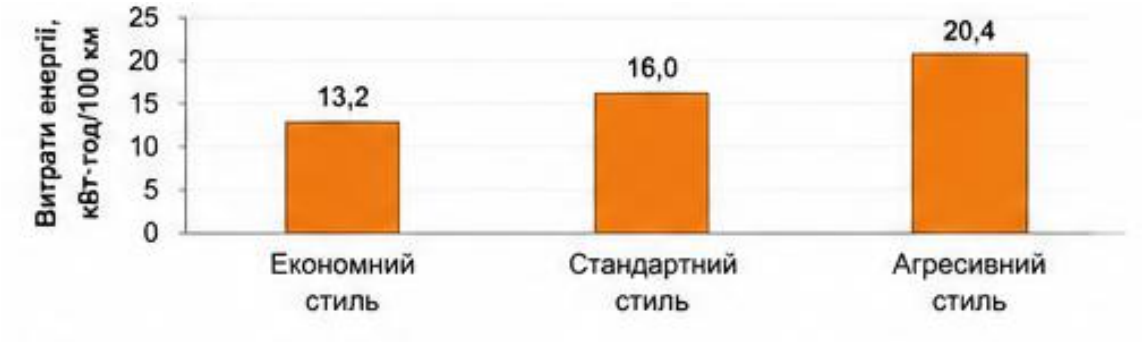


Рисунок 3 – Вплив стилю керування водія на витрати енергії

Аналіз показує, що агресивний стиль водіння може зменшити запас ходу приблизно на 30 % порівняно з економним стилем.

Це пов’язано з тим, що під час різкого прискорення електродвигун споживає значно більшу кількість енергії.

Дорожні умови також суттєво впливають на ефективність використання електромобіля. Найбільший вплив мають: підйоми та спуски дороги; тип дорожнього покриття; інтенсивність руху. Результати аналізу наведені у таблиці 4.

Таблиця 4 Вплив дорожніх умов на витрати енергії

Тип дороги	Витрати енергії, кВт·год/100 км	Запас ходу, км
Рівна міська дорога	16	250
Дорога з підйомами	20	200
Погане покриття	19	210
Заміський рівний маршрут	15	266

На основі таблиці можна побудувати порівняльну діаграму витрат енергії на різних типах доріг.

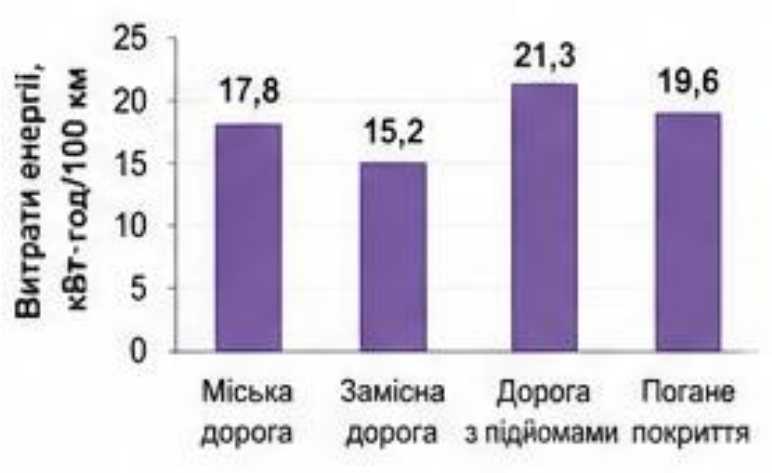


Рисунок 4 – Витрати електроенергії на різних типах доріг

Аналіз показує, що рух на дорогах з підйомами може збільшити витрати енергії приблизно на 20–25 %.

Для узагальнення результатів дослідження було виконано порівняльний аналіз впливу основних факторів на запас ходу електромобіля, на основі якого будується порівняльна діаграма впливу факторів.

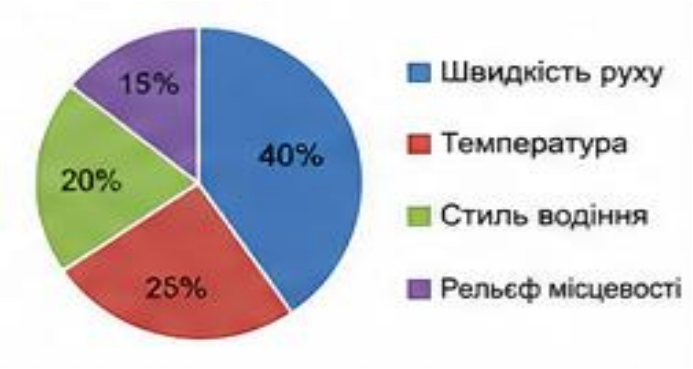


Рисунок 5 – Діаграма впливу факторів

Аналіз результатів показує, що найбільший вплив на запас ходу мають:

1. швидкість руху;
2. температура навколишнього середовища;
3. стиль керування водія.

Ці фактори повинні враховуватися під час планування поїздок електромобілем.

Отримані результати дозволяють визначити основні фактори, які необхідно враховувати під час експлуатації електромобілів, та можуть бути використані для підвищення ефективності їх використання.

САМОСТЯН Віктор Русланович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, Луцький національний технічний університет, e-mail: svrmbf@gmail.com.

УДК 629.2:004.942

І.О. Хітров, С.В. Клімов
Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

У роботі обґрунтовано методологічний підхід до інтелектуального контролю технічного стану транспортних засобів у процесі експлуатації. Проаналізовано традиційні методи діагностики та визначено їх обмеження щодо оперативності і достовірності виявлення відмовних станів. Запропоновано використання інформативних діагностичних параметрів та інтелектуальних методів обробки даних для ідентифікації та прогнозування технічного стану і прийняття рішень. Очікуваним результатом є підвищення надійності, безпеки та ефективності експлуатації транспортних засобів.

***Ключові слова**: технічний стан, транспортні засоби, інтелектуальний контроль, діагностика, прогнозування, моніторинг, прийняття рішень.*

The paper substantiates a methodological approach to intelligent monitoring of the technical condition of vehicles during operation. Traditional diagnostic methods are analyzed, and their limitations in terms of promptness and reliability of failure detection are identified. The use of informative diagnostic parameters and intelligent data processing methods for the identification and prediction of technical condition, as well as decision-making, is proposed. The expected outcome is an improvement in the reliability, safety, and operational efficiency of vehicles.

***Key words**: technical condition, vehicles, intelligent monitoring, diagnostics, prediction, monitoring, decision-making.*

Сучасний етап розвитку автомобільного транспорту характеризується зростанням інтенсивності перевезень, ускладненням конструкції транспортних засобів та підвищенням вимог до їх надійності, безпеки та економічності експлуатації. У цих умовах особливого значення набуває забезпечення належного технічного стану автомобільних транспортних засобів протягом усього періоду їх експлуатації [1, 2]. Від своєчасності та достовірності контролю технічного стану залежить ефективність функціонування транспортних систем, рівень безпеки перевезень, витрати на технічне обслуговування та ремонт, а також загальна експлуатаційна надійність транспортних засобів [3].

Традиційні методи контролю технічного стану, що базуються на регламентних перевірках і періодичній діагностиці, не завжди забезпечують оперативне виявлення початкових стадій відмов і деградації елементів транспортного засобу. Це зумовлює необхідність впровадження нових підходів, які дозволяють здійснювати безперервний або наближений до реального часу моніторинг параметрів функціонування систем і агрегатів автомобільних транспортних засобів. У цьому контексті інтелектуальні методи контролю, що ґрунтуються на використанні алгоритмів аналізу даних, моделей технічного стану та систем підтримки прийняття рішень, відкривають нові можливості для підвищення ефективності управління експлуатаційними процесами.

У зв’язку з цим виникає необхідність розроблення та застосування інтелектуальних методів контролю, які дозволяють здійснювати безперервний моніторинг діагностичних параметрів, аналізувати отримані дані та формувати обґрунтовані рішення щодо технічного стану транспортного засобу. Такі методи повинні забезпечувати можливість виявлення відхилень від нормального функціонування, ідентифікації технічного стану, прогнозування розвитку несправностей та підтримки прийняття рішень щодо подальшої експлуатації, технічного обслуговування або ремонту [3-8].

Для досягнення поставленої задачі необхідно вирішити такі часткові завдання: проаналізувати існуючі методи контролю та діагностики технічного стану автомобільних транспортних засобів; визначити інформативні діагностичні параметри, що характеризують технічний стан основних систем транспортного засобу; обґрунтувати застосування інтелектуальних методів обробки та аналізу діагностичної інформації; розробити модель інтелектуального контролю технічного стану транспортного засобу; сформувати підхід до підтримки прийняття рішень щодо управління технічним станом транспортного засобу на основі результатів контролю [4].

Контроль технічного стану автомобільних транспортних засобів у процесі експлуатації – це сукупність організаційних, технічних та інформаційно-аналітичних заходів, спрямованих на отримання та обробку діагностичних параметрів, що характеризують працездатність і справність

систем транспортного засобу, з метою своєчасного виявлення несправностей, оцінювання рівня працездатності та підтримки прийняття рішень щодо подальшої безпечної та ефективної експлуатації.

Обрана методика контролю технічного стану автомобільних транспортних засобів передбачає комплексний підхід, який включає аналіз існуючих методів контролю та діагностики, визначення інформативних діагностичних параметрів, застосування сучасних методів обробки та аналізу діагностичної інформації, розроблення моделі інтелектуального контролю та формування підходу до підтримки прийняття управлінських рішень. Такий підхід дозволяє підвищити достовірність оцінювання технічного стану, забезпечити своєчасне виявлення відхилень у функціонуванні транспортного засобу та підвищити ефективність управління його технічною експлуатацією і реалізується через:

1. Аналіз існуючих методів контролю та діагностики технічного стану автомобільних транспортних засобів

Розкриття цього завдання передбачає систематизацію та класифікацію сучасних методів контролю технічного стану транспортних засобів відповідно до принципів отримання та обробки діагностичної інформації. Зокрема, розглядаються методи візуального контролю, інструментальної перевірки, параметричної діагностики, функціональної діагностики, а також методи, що базуються на використанні електронних бортових систем діагностики та телематичних засобів моніторингу.

У процесі аналізу визначаються основні характеристики кожного методу, включаючи точність, оперативність, трудомісткість, ступінь автоматизації та можливість використання в умовах реальної експлуатації. Особлива увага приділяється оцінюванню здатності існуючих методів забезпечувати раннє виявлення несправностей і формування об’єктивної оцінки технічного стану транспортного засобу. Результатом виконання цього завдання є визначення переваг і недоліків існуючих методів та обґрунтування необхідності застосування інтелектуальних підходів до контролю.

2. Вибір інформативних діагностичних параметрів, що характеризують технічний стан основних систем транспортного засобу

Виконання цього завдання полягає у встановленні переліку параметрів, які найбільш повно і достовірно відображають технічний стан основних функціональних систем транспортного засобу. Для цього проводиться аналіз фізичних процесів функціонування агрегатів і вузлів, а також закономірностей зміни їх параметрів у процесі експлуатації та зношування.

До інформативних параметрів належать, зокрема, температурні режими роботи агрегатів, тиск робочих рідин, частота обертання валів, показники витрати палива, рівень вібрацій, електричні параметри, а також параметри, що характеризують ефективність гальмування та стійкість руху. У результаті визначається система діагностичних показників, яка може бути використана як інформаційна основа для оцінювання та прогнозування технічного стану транспортного засобу.

3. Обґрунтування застосування інтелектуальних методів обробки та аналізу діагностичної інформації

Зміст цього завдання полягає у визначенні можливостей використання інтелектуальних методів для підвищення ефективності аналізу діагностичних даних. Це включає застосування методів статистичного аналізу, математичного моделювання, алгоритмів класифікації, розпізнавання станів та прогнозування технічного стану.

Обґрунтування базується на порівнянні традиційних і інтелектуальних методів обробки інформації за критеріями точності, швидкості обробки, адаптивності та можливості автоматизації. Визначається, що інтелектуальні методи дозволяють виявляти складні взаємозв’язки між параметрами, ідентифікувати передвідмовні стани та прогнозувати зміну технічного стану на основі аналізу накопичених даних. Результатом є формування науково обґрунтованої основи для використання інтелектуальних систем контролю.

4. Розробки моделі інтелектуального контролю технічного стану транспортного засобу

Реалізація цього завдання передбачає створення формалізованого опису процесу контролю технічного стану, який включає основні функціональні елементи та їх взаємозв’язки. Модель охоплює етапи збору діагностичної інформації, її попередньої обробки, аналізу, ідентифікації технічного стану та формування результатів контролю.

У межах моделі визначаються вхідні параметри, алгоритми їх обробки, критерії оцінювання технічного стану та вихідні результати, що характеризують рівень працездатності транспортного засобу. Розроблена модель створює основу для реалізації інтелектуальної системи контролю, яка може бути використана в умовах реальної експлуатації транспортних засобів.

5. Формування підходу до підтримки прийняття рішень щодо управління технічним станом транспортного засобу на основі результатів контролю

Зміст цього завдання полягає у розробленні методичного підходу до використання результатів інтелектуального контролю для формування управлінських рішень. Це передбачає визначення критеріїв оцінювання технічного стану, встановлення допустимих і граничних значень діагностичних параметрів, а також розроблення алгоритмів класифікації технічного стану.

На основі отриманих результатів формується інформаційна база для прийняття рішень щодо продовження експлуатації транспортного засобу, проведення технічного обслуговування або ремонту. Запропонований підхід забезпечує підвищення обґрунтованості управлінських рішень, зниження ризику виникнення відмов та підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів.

Таким чином, висвітлення обраної методики спрямоване на обґрунтування її структури, визначення основних етапів реалізації та встановлення взаємозв'язків між процесами отримання, обробки та використання діагностичної інформації для забезпечення ефективного контролю технічного стану автомобільних транспортних засобів у процесі експлуатації.

Очікуваний ефект від впровадження інтелектуальних методів контролю технічного стану полягає в комплексному підвищенні надійності, безпеки та економічної ефективності використання транспортних засобів, а також у створенні основи для впровадження сучасних систем технічного моніторингу та підтримки прийняття рішень у реальному часі.

[1] Хітров І. О. Наукові передумови формування системи технічного сервісу транспортних засобів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. №2 (19). С. 214-220. https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.920.

[2] Сучасні технології в технічній експлуатації автомобілів / Онищук В. та ін. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2019. Вип. 2(13), С. 30-37. https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.85.

[3] Хітров, І. О. Дослідження впливу конструктивної надійності і безпечності транспортного засобу для здійснення перевезень та пристосованості до технічного обслуговування. *Центральноукраїнський науковий вісник*. Технічні науки : зб. наук. пр. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. Вип. 8(39). Ч. 2. С. 214-222. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.214-222.

[4] Мигаль В. Д., Аргун Щ. В., Гнатов А. В., Гнатова Г. А., Сохін П. А. Інтелектуальне діагностування транспортних засобів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2022/ Вип. 22. С. 72-80. https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.5.

[5] Hossain M. N., Rahman M. M., Ramasamy D. Advances in intelligent vehicular health monitoring and fault diagnosis: Techniques, technologies, and future directions. Measurement. 2025. Vol. 253. Part B. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117618.

[6] Agarwal A., Desai A. Vehicle health inspections in the digital age: harnessing auto diagnostics for proactive maintenance. International journal of next-generation engineering and technology. 2025. Vol. 02, Issue. 06, pp. 14-21. https://doi.org/10.55640/ijnget-v02i06-03.

[7] Aissani S., Omar M., Hamouid K. A Comprehensive Review of Predictive Maintenance Technologies for Vehicle Reliability. International Conference on Computational Science and Computational Intelligence, Dec 2024, Las Vegas, United States. https://hal.science/hal-04911822v1.

[8] Хітров І .О., Гавриш В. С. Ремонт машин і обладнання : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2012. 184 с. http://ep3.nuwm.edu.ua/2214/1/721022%20zah.pdf

ХІТРОВ Ігор Олександрович – к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

Ihor KHITROV, PhD, Associate Professor, Acting Head of the Transport Technology and Technical Service Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

КЛІМОВ Сергій Васильович – к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: s.v.klimov@nuwm.edu.ua.

Serhii KLIMOV, PhD, Associate Professor of the Transport Technology and Technical Service Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: s.v.klimov@nuwm.edu.ua.

УДК 681.518.5

[1]Худяков І.В., [2]Грицук І.В., [1]Погорлецький Д.С., [1]Черненко В.В.
[1]Херсонська державна морська академія, Одеса, Україна
[2]Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, Україна

КЕРУВАННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Автомобільний транспорт продовжує залишатися з наземних видів транспорту найбільш ресурсномістким для населення і навколишнього середовища.

Технічна експлуатація автомобільного транспорту, за визначенням, є однією з найважливіших підсистем автомобільного транспорту, яка, в свою чергу, являє підсистему транспорту в структурі досить складної транспортно-комунікаційної програми держави.

Ключові слова: *автомобільний транспорт, технічна експлуатація, адаптивна система.*

Road transport continues to be the most resource-intensive of the land transport modes for the population and the environment.

Technical operation of road transport, by definition, is one of the most important subsystems of road transport, which, in turn, is a transport subsystem in the structure of a rather complex transport and communication program of the state.

Key words*: road transport, technical operation, adaptive system.*

Процеси експлуатації автотранспортних засобів (АТЗ) супроводжуються присутністю ряду негативних наслідків, серед яких є витрата значної кількості палива, забруднення навколишнього середовища тощо. Враховуючи вплив цих процесів на зовнішнє середовище і, як результат, необхідність прийняття рішень щодо розробки протидії цьому явищу, адекватних результатам, що досягаються, треба мати необхідний обсяг достовірної інформації про параметри експлуатації АТЗ.

Автомобільний транспорт (АМТ) продовжує залишатися з наземних видів транспорту найбільш ресурсномістким для населення і навколишнього середовища.

АМТ витрачає більше 60% палива нафтового походження, 70% трудових ресурсів, викликає більше 96% дорожньо-транспортних пригод. На автомобільний транспорт припадає, відповідно до оцінок, 40-50% забруднення навколишнього середовища, в тому числі у великих містах – 60-70%, а в мегаполісах – більше 85%. При цьому не менше 25% забруднень пояснюється технічним станом автомобілів і виробничою діяльністю АМТ [1].

Технічна експлуатація АМТ (ТЕ АМТ), за визначенням, є однією з найважливіших підсистем АМТ, яка, в свою чергу, являє підсистему транспорту в структурі досить складної транспортно-комунікаційної програми держави [2].

Транспортний комплекс – це велика і дуже складна система, що динамічно розвивається, а безпосередньо сам транспорт – добра якість для людства, яке задовольняє одну з найважливіших потреб людини – потреба в переміщенні, долаючи простір і час.

Необхідність кваліфікованого визначення сучасних складових адаптивної системи ремонту та технічного обслуговування (РТО) підтверджується досить складною структурною схемою інтелектуальної системи управління транспортом.

В цілому аналіз існування і створення адаптивних систем РТО дозволяє підкреслити актуальність питання інформаційного забезпечення прогресивних систем РТО.

Розвиток інформаційного забезпечення автотранспортних процесів є:

По-перше, умовою переходу автомобільного транспорту в автоматизованого управління технічним станом автомобілів на підставі гнучких «адаптивних» автоматизованих систем з індивідуальною корекцією періодичності та обсягів технічного обслуговування.

По-друге, інформаційне забезпечення комп'ютеризованого оперативного планування РТО і прогнозування технічного стану та можливих несправностей автомобілів є ключем до автоматизації контролю технічного стану і працездатності автомобіля.

По-третє, створення локальних інформаційно-обчислювальних комплексів на базі комп'ютеризованих засобів технічної діагностики та новітніх засобів обчислювальної техніки становить основу сучасної автоматизації АМТ.

По-четверте, комп'ютеризація діагностичної техніки є ключовим напрямком сучасного розвитку діагностики автомобілів.

По-п'яте, успіх використання комп'ютерної техніки АМТ залежить насамперед від відповідного забезпечення процесів організації РТО [3, 4].

Суть системи станом полягає в тому, що технічні впливу проводиться для вироби тільки при досягненні ним контрольованих параметрів свого критичного рівня, тобто гранично допустимого стану. На практиці для реалізації такої системи РТО необхідно спеціальне контрольно-діагностичне обладнання і в цілому вміння фахівців інженерно-технічної служби вимірювати безперервно або періодично контрольовані (діагностичні) параметри вироби. Сьогодні такі системи успішно впроваджуються в світі техніки багатьма зарубіжними фірмами. Вони отримали назву «Condition Monitoring», а в сучасній термінології ТЕАТЗ – це «індивідуальні» системи РТО або «адаптивні» [5].

Змішана система об'єднує в собі елементи двох систем (з напрацювання, станом). Це найбільш поширена в сучасному світі техніки система РТО, яка застосовується, наприклад, для машин: транспортних, сільськогосподарських, будівельних і багатьох інших. Система РТО, залежно від методу встановлення періодичності та обсягу технічних впливів, розділяється на середньостатистичну і діагностичну [2].

У деяких випадках великі транспортні компанії на підставі наявного досвіду і специфіки експлуатації застосовують «свої» тактики РТО при збереженні загальних принципів планово-попереджувальної системи і використанні базових нормативів.

На АМТ найбільш поширеною є система середньостатистична. Це традиційна для автомобільного транспорту загального користування система РТО, яка в своїй основі спирається на математичний апарат теорії ймовірності та математичну статистику. Це теорії, які дозволяють дослідникам встановити для автомобілів середньостатистичні норми пробігу і трудомісткості їх технічних впливів, які потім, за допомогою застосування ряду коефіцієнтів коригування, використовуються інформаційними транспортними системами (ІТС) для конкретного автомобіля [5, 6].

Стратегія технічного обслуговування стає все більш важливою темою, в зв'язку з великим числом старіючих автоматизованих систем керування автотранспортних засобів (АСК АТЗ) в розвинених країнах, і нестачі кваліфікованого персоналу в інших частинах світу. Мета стратегії технічного обслуговування – досягти максимальної доступності АСК АТЗ на виробництві, без шкоди для безпеки і зайвих витрат. Доступність в даному контексті визначається як стан, при якому виробнича система може використовуватися і функціонує правильно. Коли доступність менше 100%, губляться доходи.

Аналіз останніх досліджень. До 2022 року ринок і запит на рішення для інтелектуального обслуговування збільшаться в сім разів, або ж до $10 млрд в грошовому вираженні, це стане одним з головних трендів технологічної модернізації.

Сама технологія інтелектуального обслуговування ґрунтується на методології обслуговування на підставі надійності (RCM).

Обслуговування по надійності (RCM – reliability centered maintenance). Охоплює широку сферу діяльності і часто охоплює інші стратегії. Обслуговуванням по надійності називають процес визначення мінімального безпечного рівня обслуговування.

RCM – комплексний інженерний підхід, метою якого є виконання всіх робіт, необхідних для забезпечення найвищого рівня надійності обладнання, при мінімальних витратах на обслуговування [3-5].

Концепція «обслуговування, націленого на надійність», або ОНН (Reliability Centered Maintenance, RCM), підказує деякі корисні ідеї і підштовхує до роздумів. ОНН передбачає використання або поліпшення програми технічного обслуговування шляхом використання систематичного структурованого підходу, що ґрунтується на оцінці наслідків відмов, функціональної важливості компонентів системи, а також історії їх відмов обслуговування. Своїм корінням концепція йде в початок 60-их рр. минулого століття. Основним побоюванням в той час були очікування, що існували тоді превентивні програми обслуговування, реалізовані за розкладом, будуть погано впливати на економічну ефективність більших і складних АТЗ. А ось досвід компаній з ОНН показав, що витрати на обслуговування залишалися, в цілому, постійними, в той час як доступність і надійність АТЗ покращилася. ОНН зараз є стандартною практикою в більшості компаній світу [3-6].

Кожна з наступних стратегій обслуговування обладнання має свої відмінні риси і оптимальні сфери застосування.

Превентивне (планове) обслуговування (PM – preventive maintenance). При використанні цієї стратегії діяльність з обслуговування обладнання здійснюється ще до того, як станеться поломка, тому не виникає просте обладнання і кількість вироблених виробів не падає. Практично завжди дешевше виконувати планове обслуговування, ніж чекати поломки.

Аварійне обслуговування (RM – reactive maintenance). В цьому випадку обслуговування обладнання є реакцією на його вихід з ладу. Як не дивно, іноді ця стратегія може виявитися кращою, про що буде сказано далі.

Предиктивне обслуговування (PdM – predictive maintenance). Обслуговування здійснюється на основі специфічної інформації про обладнання, яка є надійним попередником неминучої відмови. Як приклади можна привести вібраційний або термоаналізу.

Обслуговування за станом обладнання (CBM – condition based maintenance). Іноді цей термін використовують як синонім планового обслуговування. У чому різниця? При плановому обслуговуванні періодичність процедур обслуговування задається заздалегідь, в плановому режимі. У разі обслуговування за станом роботи виконуються залежно від того, яку інформацію про обладнання дають системи збору даних в режимі реального часу – від сенсорів і інших датчиків, які вимірюють певні параметри. Система збору даних зіставляє їх з даними, характерними для аварійного стану, так щоб можна було виконати обслуговування до виходу обладнання з ладу.

Предиктивне обслуговування засноване на реальному стані і продуктивності компонента. Обслуговування здійснюється не за графіком, а в разі змін в характеристиках АТЗ. Прикладом інтелектуального підходу може служити використання сенсорів витрати пального або вібрації. Крім того, зараз набувають поширення аналітичні програмні продукти, що дозволяють прогнозувати відмови на основі інформації, що надходить від систем автоматизації в режимі реального часу.

Спрощення технічного обслуговування за допомогою даних інтелектуального обслуговування включає збір цільових даних для проведення аналізу, результати якого допоможуть прогнозувати можливі збої до їх виникнення. Компанії використовують цей формат обслуговування, щоб уникнути прогнозованих збоїв обладнання і ремонтувати обладнання з мінімальним часом простою.

Висновки. Ґрунтуючись на проведеному аналізі стратегій і тактик РТО АТЗ, можна зробити висновок, що традиційна, сформована протягом багатьох років система РТО вже не відповідає в цілому сучасним вимогам ТЕАТЗ. Її основною перевагою є тільки можливість спрогнозувати витрати запасних частин і матеріалів при відсутності хороших діагностичних систем, а основним недоліком – прийняття рішення про проведення робіт РТО на підставі інформації про пробіг АТЗ. При реалізації такої системи РТО на практиці вона не враховує реальний стан вузлів і агрегатів АТЗ, призводить до перевитрати запасних частин і, як наслідок, високі витрати на підтримання АТЗ в справному стані.

Поступовий розвиток нових видів перевезень призвів до збільшення часу перебування рухомого складу далеко від основної виробничої бази, і, внаслідок цього, підвищилася роль профілактичного РТО автомобілів. Тому створення гнучкої «адаптивної» системи контролю та управління технічним станом автомобіля з елементами індивідуального підходу до кожного конкретного автомобіля стало першочерговим завданням. Під адаптивною системою РТО автомобілів розуміється система, яка, завдяки зміні своєї структури і значень параметрів, може пристосовуватися до зміни внутрішніх і зовнішніх умов. Рівень, якого досягла сучасна технічна діагностика, дозволяє при технічній експлуатації автомобілів реалізувати практично будь-які завдання з виявлення і прогнозування параметрів технічного стану автомобілів.

Список використаних джерел

1. Лудченко О.А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів: технологія: підручник. Київ : Вища школа, 2007. 527 с.

2. Волков В.П., Матейчик В.П., Комов П.Б., Комов О.Б., Грицук І.В. Організація технічної експлуатації автомобілів в умовах формування інтелектуальних транспортних систем // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. Х. : НТУ «ХПІ». 2013. № 29 (1002). с.138-144.

3. Волков В.П., Грицук І.В., Грицук Ю.В., Шурко Г К., Волков Ю.В. Особливості формування методики застосування класифікації умов експлуатації транспортних засобів в інформаційних умовах ITS // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. Х. : НТУ «ХПІ», 2017. № 14 (1236). С. 10–20.

4. Волков В.П., Грицук І.В., Грицук Ю.В., Волков Ю.В., Володарець М.В. Інформаційні системи моніторингу технічного стану автомобілів Монографія Харків: Вид-во Панов А. М., 2018. – 298 с.

5. Худяков І.В. Моделі бази даних інформаційної системи моніторингу параметрів технічного стану транспортних засобів // Луцький національний технічний університет «Наукові нотатки» випуск 67, – Луцьк ЛНТУ, 2019 – с.141-148.

6. Матейчик В. П. Особливості моніторингу стану транспортних засобів з використанням бортових діагностичних комплексів / В. П. Матейчик, В. П. Волков, П. Б. та ін.// Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. – 2014. – Вип. 13(1). – С. 125-137.

ХУДЯКОВ Ігор Валентинович – к.т.н., доцент, доцент кафедри «Експлуатації суднових енергетичних установок», Херсонська державна морська академія, м. Одеса, Україна, E-mail: igor.khudiakov563@gmail.com

ГРИЦУК Ігор Валерійович – д. т. н., професор, професор кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування НУ «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, Україна, E-mail: gritsuk_iv@ukr.net

Погорлецький Дмитро Сергійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, м. Одеса, Україна, e-mail: dimon150582@gmail.com

ЧЕРНЕНКО Валентина Володимирівна – старший викладач кафедри «Експлуатації суднових енергетичних установок», Херсонська державна морська академія, м. Одеса, Україна, E-mail: v.chernenko18@gmail.com

УДК 656.132

С.П. Чуйко[1], О.Б. Шмерего[2]
[1] *Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна*
[2] *Київське відділення Національного наукового центра «Інститут судових експертиз ім. засл. проф. М. С. Бокаріуса» Міністерства юстиції України, Київ, Україна*

РИЗИКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ЛІТІЙ-ІОННІЙ БАТАРЕЇ

Стрімке збільшення кількості електромобілів призводить до збільшення небезпек, якими вони супроводжуються. Однією з таких небезпек є їх пожежна небезпека. За результатами аналітичних досліджень визначено та класифіковано чинники впливу на пожежну небезпеку EV. Це конструктивні, експлуатаційні та обслуговувальні чинники. Глибокий і різкий розряд літій-іонних акумуляторів є одним із критичних режимів експлуатації, що негативно впливає на їх технічний стан, безпеку та надійність.

Ключові слова: *електромобіль, ризики, надійність, іонно-літієва батарея*

The rapid increase in the number of electric vehicles leads to an increase in the dangers that accompany them. One of these dangers is their fire hazard. According to the results of analytical studies, the factors influencing the fire hazard of EVs have been identified and classified. These are design, operational and maintenance factors. Deep and sharp discharge of lithium-ion batteries is one of the critical operating modes, which negatively affects their technical condition, safety and reliability.

Keywords: electric vehicle, risks, reliability, lithium-ion battery

Загорання електромобілів та пов'язані з ними дослідження показують, що частота пожеж з електромобілями у світі значно менша, ніж у автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). У США на 55 пожеж за участю електромобілів припадає близько 284000 випадків горіння автомобілів з двигуном внутрішнього згорання. Підтверджено, що ймовірність займання батареї електромобіля у разі дорожньо-транспортної пригоди менша, ніж ймовірність загорання автомобіля з бензиновим двигуном [1].

Згідно зі сценарієм заявленої політики MEA (STEPS), глобальний прогноз щодо частки продажів електромобілів, заснований на існуючій політиці та твердих цілях, зріс до 35% у 2030 році, порівняно з менш ніж 25% у попередньому прогнозі. Згідно з прогнозами, Китай зберігає свою позицію найбільшого ринку електромобілів з 40% від загального обсягу продажів до 2030 року в рамках STEPS. Сполучені Штати подвоюють свою частку ринку до 20% до кінця десятиліття, оскільки нещодавні оголошення політики стимулюють попит, тоді як Європа зберігає свою поточну частку в 25% [2].

В останні роки літій-іонні акумулятори (LIB) стали основним джерелом електромобілів та систем накопичення енергії завдяки високій щільності енергії, тривалому терміну служби, низькій вартості та екологічності. Оскільки масштаби їхнього розгортання продовжують зростати, підвищення безпеки, надійності та терміну служби акумуляторних систем стало основним напрямом досліджень. Використання літій-іонних акумуляторів забезпечує високі експлуатаційні характеристики, однак супроводжується низкою ризиків, що впливають на безпеку та надійність транспортних засобів.

Теплоутворення, а отже, теплопередача, відіграють вирішальну роль у забезпеченні продуктивності, старіння та безпеки літій-іонних акумуляторів. Підвищена температура акумулятора є найважливішим прискорювачем старіння. Розуміння та управління температурою та старіння акумуляторів під час експлуатації є багаторівневим завданням.

Літій-іонні батареї мають багато переваг, але у них також є суттєвий недолік: вони схильні до вибуху, адже з'явилися порівняно недавно, тому технології по їх виробництву ще не досягли досконалості [3]. Одними з найбільш несприятливих режимів експлуатації є глибокий розряд та різкий (високострумовий) розряд**,** які можуть призводити до деградації елементів батареї, зниження надійності та виникнення аварійних ситуацій. Глибокий розряд характеризується зниженням рівня заряду акумулятора нижче допустимого порогового значення (як правило, менше 10–20 %). Високі та коливаючі температури також прискорюють процеси деградації всередині елементів, тоді як належне

відведення тепла може продовжити термін служби та уповільнити зниження ємності батареї. На рис. 1 представлено схему літій-іонного акумулятора під час розряду.

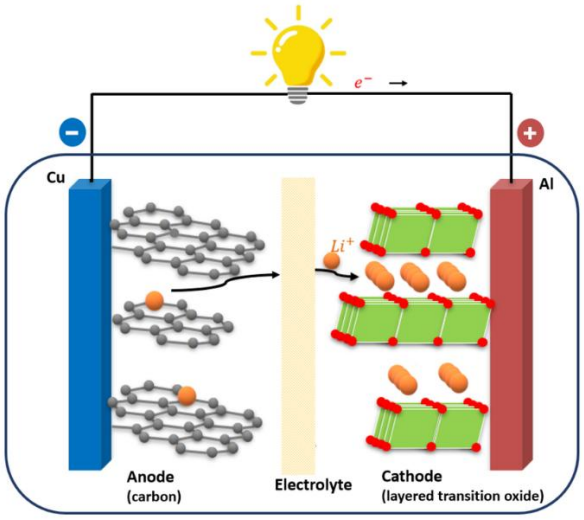


Рисунок 1 – Схематичне зображення літій-іонного акумулятора під час розряду [4].

Схема відображає процес, як літій-іони (Li^+) рухаються від анода до катода (e^-), тоді як електрони циркулюють по зовнішньому колу. Зниження ємності та продуктивності акумулятора насамперед спричинене літієвим покриттям, а також побічними реакціями.

Глибокий та різкий розряд літій-іонних батарей є критичними режимами, що призводять до прискореної деградації, зниження надійності та підвищення ризику аварійних ситуацій. Контроль режимів експлуатації та ефективна робота систем управління батареєю є ключовими умовами безпечного використання електромобілів.

На рис. 2 представлено схему основних ризиків експлуатації автомобілів.



Рисунок 2 – Основні ризики експлуатації електромобілів

Термічний розгін – це процес, коли температура всередині батареї різко підвищується, спричиняючи ланцюгову реакцію. Температура може досягати 800°C за лічені секунди. Це найнебезпечніше явище. При перегріві або пошкодженні батарея може самоприскорено нагріватися, що призводить до швидкого зростання температури (500-1000 °C), виділяються горючі гази і велика ймовірність вибуху або пожежі.

Пожежна небезпека – це складність гасіння літій-іонних батарей, ймовірність повторного займання після гасіння, а також необхідність спеціальних засобів пожежогасіння.

Електричні ризики властиві ураженням високою напругою (до 800 В), а також небезпека при ДТП та обслуговуванні.

Деградація акумулятора – це природний, незворотний процес поступової втрати хімічної ємності та зниження ефективності роботи батареї, вплив температури, режимів заряджання, глибини розряду.

Екологічні ризики щодо утилізації батареї, токсичність компонентів (літій, кобальт, електроліти).

Експлуатаційні обмеження призводять до зменшення запасу ходу в холодну погоду та залежність від зарядної інфраструктури.

Надмірне теплоутворення також може призвести до теплового виходу та, як наслідок, спричинити пожежі або навіть вибухи в цих акумуляторах, чому може запобігти ефективне управління температурою. Тому управління температурою літій-іонних акумуляторів є одним із критичних важливих аспектів проєктування акумуляторних блоків, особливо для потужних застосувань.

Детальне дослідження ризиків та опис механізмів вибуху і пожежі, а також слідів та їх наслідків в умовах використання літій-іонних акумуляторів може слугувати для формування експертної методики комплексної електротехнічної та пожежно-технічної експертизи.

Список використаних джерел

1. Wipa Loengbudn, Kaveh Khalilpour, Gnana Bharathy, Firouzeh Taghikhah, Alexey Voinov. Battery and hydrogen-based electric vehicle adoption: A survey of Australian consumers perspective. Case Stud. Transp. Policy 2022, 10, 2451–[https://surli.cc/qrtktc]

2. International Energy Agency. Global EV Outlook 2023. Paris : IEA, 2023. 250 p. [https://surl.li/kyftji].

3. . Фея О. Літієва доба. Український тиждень. № 42 (622) від 20.10.2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https:// tyzhden.ua/ litiieva-doba/ (дата звернення: 06.04.2026).

4. Burheim, O.S. Temperature, Ageing and Thermal Management of Lithium-Ion Batteries. Energies 2021.14/1248. https://surl.lt/zlzqzk

ЧУЙКО Сергій Петрович – док. філос., доцент кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту, Державний університет «Житомирська політехніка», e-mail: expertauto@ukr.net

CHUIKO Serhiy Petrovych – PhD, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Automobile Transport, Zhytomyr Polytechnic State University, e-mail: expertauto@ukr.net

ШМЕРЕГО Олександр Борисович – головний судовий експерт відділу криміналістичних досліджень Київського відділення Національного наукового центра «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса» Міністерства юстиції України, e-mail: a.shmerego@gmail.com

SHMEREGO Oleksandr Borysovych – Chief Forensic Expert of the Forensic Research Department of the Kyiv Branch of the National Scientific Center "Institute of Forensic Expertise named after Honored Professor M. S. Bokarius" of the Ministry of Justice of Ukraine, e-mail: a.shmerego@gmail.com

УДК 656.13 : 681.518

С.М. Шарай, В.В. Першин
Національний транспортний університет, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ДІЯЛЬНІСТЬ АВТОТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВ ПРИ ВИКОНАННІ МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Застосування новітніх технологій у діяльності автотранспортних підприємств при виконанні міжнародних вантажних автомобільних перевезень дозволяє підвищити їх ефективність та конкурентоспроможність на ринку надання транспортних послуг. Цифрові технології є потужним інструментом модернізації процесу доставки вантажів у міжнародному сполученні. Дослідження ефективності цифрової трансформації автотранспортного підприємства проведені з метою зниження витрат на основні елементи транспортно-логістичного процесу, підвищення продуктивності праці та оптимізації управлінських рішень.
***Ключові слова**: автотранспортне підприємство, міжнародні вантажні автомобільні перевезення, транспортно-логістичний процес, цифрова платформа, показники ефективності.*

The use of the newest technologies in the activity of the motor transport enterprises when international freight road transportation are carry out allows to increase their efficiency and competitiveness on the market of providing transport services. Digital technologies are a powerful tool of modernizing the process of delivering goods in international traffic. Studies the effectiveness of the digital transformation of a motor transport enterprise were conducted in order to reduce costs for the main elements of the transport-logistic process, increase labor productivity and optimize management decisions.
***Key words:** motor transport enterprise, international freight road transportation, transport and logistics process, digital platform, efficiency indicators.*

Впровадження новітніх технологій у діяльність автотранспортних підприємств, які надають транспортно-логістичні послуги з організації та виконання доставки вантажів у міжнародному сполученні, передбачає використання методів підвищення ефективності процесів перевезень, акцентуючи увагу на можливостях застосування інноваційних цифрових технологій. Основні напрями застосування цифровізації міжнародних вантажних автомобільних перевезень охоплюють широкий спектр технологій, спрямованих на підвищення ефективності виконання транспортно-логістичних процесів [1,2].

Питання визначення ефективності цифрової трансформації автотранспортного підприємства з метою зниження витрат на основні елементи транспортно-логістичного процесу доставки вантажів набувають все більшої актуальності.

Для підвищення ефективності виконання вантажних автомобільних перевезень у міжнародному сполученні автотранспортному підприємству доцільно впроваджувати комплекс сучасних цифрових технологій та рішень, зокрема системи GPS-моніторингу та управління парком автотранспортних засобів, електронні товарно-транспортні накладні, а також застосовувати алгоритми штучного інтелекту для оптимізації маршрутів і вибору ефективного автотранспортного засобу. Для впровадження цифрових технологій у діяльність автотранспортного підприємства було обрано хмарну платформу Omniful. Основною її перевагою є комплексний підхід до управління ланцюгами постачань, за рахунок чого відбувається інтеграція процесів, пов’язаних із формуванням та плануванням маршруту, контролем виконання оборотного рейсу, обліком вантажу та завантаженістю автотранспортного засобу, взаємодією із замовником.

Економічна ефективність цифрової трансформації автотранспортного підприємства визначається за рахунок зниження витрат на основні елементи транспортно-логістичного процесу, підвищення продуктивності праці персоналу та оптимізації управлінських операцій. Для визначення ефективності важливо враховувати загальну суму інвестицій, необхідних для реалізації цифрових рішень, адже саме співвідношення між вкладеними коштами та отриманим економічним ефектом відображає реальний результат впровадження цифрової трансформації.

Для дослідження економічної ефективності впровадження цифрових технологій у діяльність автотранспортного підприємства застосована система показників, що характеризують економічні

результати впровадження технологій AI/TMS, e-CMR, GPS-моніторингу на базі інтегрованої платформи Omniful. У результаті впровадження зазначених рішень підприємство може отримати економічний ефект, який полягатиме у скороченні витрат на паливо, експлуатаційні матеріали, оплату праці, адміністративні витрати.

Для досягнення такого ефекту цифрова трансформація автотранспортного підприємства реалізується поетапно – від підключення цифрової платформи, яка забезпечує централізоване управління перевезеннями, документами та комунікаціями, до впровадження аналітичних модулів, систем штучного інтелекту та навчання персоналу підприємства. Загалом орієнтовна сума інвестицій становить 5900000 грн. Структура інвестиційних витрат на етапи впровадження цифрової платформи наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Структура інвестиційних витрат впровадження цифрової платформи на автотранспортному підприємстві

Етап впровадження	Основна стаття витрат	Орієнтовна сума, грн
Підготовчий	Передплата доступу до платформи Omniful	300000
Аналіз поточного стану готовності підприємства до цифрової трансформації	Аудит IT-систем, консультації, збір даних	150000
Планування етапів впровадження цифрової платформи	Розробка стратегії впровадження цифрової платформи, технічне завдання, кошторисна документація	150000
Впровадження базових систем цифрової платформи	Придбання та налаштування TMS, GPS, серверного обладнання, підключення е-документообігу	2300000
Оптимізація управлінських операцій та аналітичні дослідження	Ліцензії AI-модулів, програмне забезпечення для оптимізації управлінських операцій та проведення аналітичних досліджень	1600000
Розширення комунікацій з замовниками	Розробка CRM, чат-ботів, інтеграція з TMS та e-mail системами	1100000
Навчання персоналу та підтримка цифрової платформи	Проведення тренінгів, розробка інструкцій, технічна підтримка протягом 1 року	300000
Усього інвестицій		5900000

Розрахунок економічної ефективності виконується за такими показниками, як чиста приведена вартість, термін окупності та рентабельність інвестицій.

Чиста приведена вартість розраховується за формулою:

$$NPV = \sum_{t=1}^{T} \times \frac{E_з}{(1+r)^t} - I_0, \quad (1)$$

де $E_з$ – економічний ефект, грн;

T – строк експлуатації, рік;

r – норма дисконту, %;

I_0 – інвестиційні витрати на впровадження, грн.

Строк окупності розраховується за формулою:

$$PP = \frac{I_0}{E_з}. \quad (2)$$

Цей показник показує теоретичну окупність за умови повного ефекту вже в перший рік впровадження, однак економічний ефект формується поступово, тому реальний строк окупності визначається з урахуванням динаміки ефекту, яка наведена в табл. 2.

Таблиця 2 – Динаміка економічного ефекту від впровадження цифрової платформи на автотранспортному підприємстві

Етап впровадження	Період реалізації	Основна дія	Частка досягнутого ефекту	Орієнтовний економічний ефект, грн	Кумулятивний ефект, грн
Базове впровадження	0-3 місяці	Встановлення GPS-моніторингу, впровадження TMS, електронного документообігу	25%	1927812	1927812
Оптимізація управлінських рішень	3-9 місяців	Оптимізація маршрутів, вибір автотранспортного засобу	35%	2698937	4626749
Комунікація із замовниками	9-12 місяців	Розробка CRM, чат-ботів, інтеграція клієнтських каналів, покращення сервісу	15%	1542250	5783436
Повна інтеграція (звітність, аналітика)	12-14 місяців	Автоматизація управлінських рішень, скорочення помилок	25%	1927812	7711249
Разом	1 рік 2 місяці		100%	7711249	7711249

Рентабельність інвестицій розраховується за формулою:

$$ROI = \frac{\text{Чистий прибуток від інвестицій}}{\text{Обсяг інвестицій}} \times 100\%. \quad (3)$$

В результаті проведених розрахунків було визначено, що впровадження цифрових технологій на автотранспортному підприємстві забезпечує реальний строк окупності інвестицій протягом 1,04 року. Чиста приведена вартість проєкту становить 23,3 млн грн, що свідчить про високу прибутковість. Рентабельність інвестицій визначена на рівні 31%. З економічної точки зору цифрова трансформація дозволяє забезпечити скорочення витрат підприємства при організації та виконанні процесу доставки вантажів у міжнародному сполученні. Річний економічний ефект від впровадження систем AI/TMS, e-CMR та GPS-моніторингу може становити 7711249 грн при загальній сумі інвестицій 5900000 грн.

1. Подригало М. А., Абрамов Д. В., Коробко А. І. Цифрова трансформація міжнародних автомобільних вантажних перевезень, сучасні виклики, бар'єри та перспективи розвитку / М. А. Подригало, Д. В. Абрамов, А. І. Коробко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2025. – № 30(3). – С. 32-37. doi: 10.18664/ikszt.v30i3.351288

2. Демченко Є. Б., Дорош А. С., Сковрон І. Я., Баланов В. О. Діджиталізація та сучасні електронні сервіси у сфері вантажних автомобільних перевезень / Є. Б. Демченко, А. С. Дорош, І. Я. Сковрон, В. О. Баланов // Транспортні системи та технології перевезень. – 2023. – № 25. – С. 70-83. https://doi.org/10.15802/tstt2023/284496

ШАРАЙ Світлана Михайлівна – к.т.н., доцент, професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, Національний транспортний університет, e-mail: Svetasharai@gmail.com
ПЕРШИН Вячеслав Володимирович – магістр групи МП-1-1м, Національний транспортний університет, e-mail: vpersin580@gmail.com

Svitlana SHARAI, PhD in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of International Transportation and Customs Control, National Transport University, e-mail: Svetasharai@gmail.com
PERSHYN Vyacheslav, Master of the MP-1-1m Group, National Transport University, e-mail: vpersin580@gmail.com

УДК 656.073.235:65.011.56

С.М. Шарай, В.П. Сахно, М.П. Рой, В.М. Поляков
Національний транспортний університет, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ В ПРОЦЕСАХ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ

Системний підхід, поєднуючи теоретичні та практичні аспекти в організації процесу доставки вантажів автомобільним транспортом, впливає на формування сучасної моделі стійкої, ефективної та конкурентоспроможної системи надання транспортно-логістичних послуг. Системний підхід застосовується як практичний інструмент, без якого неможливо забезпечити ефективність, надійність та стійкість транспортно-логістичної системи.
***Ключові слова**: системний підхід, автомобільний транспорт, вантажні перевезення, транспортно-логістична система, оптимізація, інформаційні системи, моделювання.*

The system approach, which combining the theoretical and practical aspects in the organization of the process of freight transportation by road transport, make the influences for formation of a modern model of a sustainable, effective and competitive system for providing transport and logistics services. The systemic approach is used as a practical tool without which it is impossible to ensure the efficiency, reliability and sustainability of the transport and logistics system.
***Key words**: systems approach, road transport, freight transportation, transport and logistics system, optimization, information systems, modeling.*

В сучасних умовах зростання потреб у задоволенні підвищених вимог до надійності та якості транспортного обслуговування автомобільний транспорт посідає провідне місце в системі доставки вантажів завдяки гнучкості, доступності та можливості забезпечення організації перевезень за схемою «від дверей до дверей». Ускладнення логістичних ланцюгів постачань через воєнні дії, зростання невизначеності зовнішнього середовища та обмеженість ресурсів зумовлюють необхідність переходу від управління окремими транспортно-логістичними операціями до комплексного управління логістичним процесом при плануванні, організації та виконанні доставки вантажів автомобільним транспортом, який є складною транспортно-логістичною системою, що включає сукупність ряду взаємопов'язаних елементів та ланок. Актуальність застосування методів та засобів системного підходу в процесах доставки вантажів автомобільним транспортом зумовлена потребою у науково обґрунтованих рішеннях, що забезпечують скорочення сукупних логістичних витрат, часу доставки, підвищення надійності транспортного обслуговування та адаптивності транспортно-логістичної системи і її пристосування до змін в умовах нестабільного зовнішнього середовища. Застосування методів системного підходу, оптимізаційних і імітаційних моделей, сучасних інформаційних і телематичних засобів дозволяє розглядати процеси доставки вантажів в рамках цілісної транспортно-логістичної системи. Ефективне функціонування транспортно-логістичної системи залежить від узгодженості рішень щодо формування оптимальних маршрутів перевезень та партій вантажу, планування роботи парку автотранспортних засобів з урахуванням пропускної спроможності транспортної мережі, проєктування мережі складів тощо. Системний підхід виступає методологічною основою для розробки заходів щодо удосконалення процесу доставки вантажу. З одного боку, він є методологією, яка розглядає транспортно-логістичну систему як багаторівневу структуру з власними цілями та властивостями, а з іншого – він акумулює набір практичних інструментів, які дозволяють оперативно приймати рішення при плануванні, організації та управлінні виконанням процесу перевезення вантажів.

Дослідження системного підходу до організації процесу перевезень вантажів автомобільним транспортом здебільшого базуються на аналізі конкретних автотранспортних, транспортно-експедиційних та транспортно-логістичних підприємств. Вітчизняними науковцями розглядаються транспортно-експедиторські підприємства, які здійснюють міжнародні автомобільні перевезення різних видів вантажів, для яких будуються імітаційні моделі планування роботи експедиторів з урахуванням структури бази замовників транспортно-експедиторських послуг, тривалості операцій та ймовірності виникнення різного роду помилок [1,2]. Ряд досліджень фокусуються на перевезеннях вантажів сільського господарства, де значну роль відіграють сезонні коливання та чутливість вантажу

до часу доставки. Для таких об'єктів розробляються динамічні моделі маршрутизації перевезень, що враховують часові вікна, обмеження на завантаження сільськогосподарських комплексів та ризики втрат якості продукції. У міжнародній практиці досліджуються процеси моделювання контейнерних автомобільних перевезень між портами та внутрішніми терміналами з використанням моделей транспортних мереж [3]. Імітаційні моделі транспортно-експедиторських підприємств та міжнародних логістичних ланцюгів застосовуються для аналізу різних сценаріїв організації роботи. Вони дозволяють порівнювати варіанти за комплексом критеріїв, враховуючи невизначеність і випадковий характер впливу ряду чинників. Імітаційні моделі дозволяють не лише описати поточний стан транспортно-логістичної системи, а й прогнозувати різні сценарії її розвитку. Результати моделювання послуговують основою для прийняття організаційно-технічних та управлінських рішень, що особливо важливим є в умовах нестабільності, коли, наприклад, виникає необхідність у оперативній зміні маршруту доставки вантажу, шляху прямування через прикордонні переходи або реагування на інші обставини сьогодення.

Аналітичні огляди стану логістики в Україні відзначають високу динаміку розвитку автомобільного транспорту, який вимушено перебирає на себе частину вантажопотоків із морського та залізничного транспорту. При цьому вказується на недостатню пропускну спроможність окремих ділянок дорожньої мережі, обмежену кількість логістичних хабів і потребу в модернізації інфраструктури для забезпечення зростаючих обсягів автомобільних перевезень. З позицій системного підходу такі проблеми свідчать про необхідність перегляду конфігурації логістичних мереж, впровадження сучасних методів планування та контролю, а також підвищення рівня інтеграції між учасниками ланцюгів постачань. Аналіз реальних транспортно-логістичних систем доставки вантажів виявляє низку типових проблем, які стосуються нерівномірного завантаження парку автотранспортних засобів, непродуктивних простоїв в пунктах навантаження й розвантаження вантажу, затримок на прикордонних переходах, обмеженої інтеграції інформаційних систем у діяльність підприємств транспорту. Дослідження ринку міжнародних автомобільних перевезень України в умовах воєнного стану підкреслюють, що автотранспортні підприємства при виконанні процесів перевезень вантажів стикаються з нестабільністю попиту на надання транспортних послуг, чергами на кордоні, зміною традиційних маршрутів та зростанням експлуатаційних витрат [4].

Застосування математичних та імітаційних моделей дозволяє обґрунтовано модернізувати системи доставки. Разом з тим системний підхід не обмежується математичними моделями. Його реалізація неможлива без цілого комплексу практичних засобів – організаційних, технічних, інформаційних та нормативно-методичних. Створення єдиних логістичних підрозділів, централізованих диспетчерських центрів, впровадження стандартних операційних процедур, розвиток партнерських схем взаємодії з перевізниками формують організаційну базову структуру системи. Рухомий склад автомобільного транспорту, складська й термінальна інфраструктура, елементи інтелектуальних транспортних систем забезпечують матеріальну основу її функціонування. Впровадження сучасних інформаційних систем дозволяє здійснювати поєднання всіх елементів транспортно-логістичної системи в єдине ціле, забезпечуючи прозорість виконання процесів перевезень вантажів і зворотні зв'язки в реальному часі, що створює умови для перебування системи у стані керованості та передбачуваності.

У воєнний період моделювання дає змогу порівняти варіанти використання різних пунктів пропуску, терміналів, маршрутів, що дозволяє рекомендувати автотранспортним підприємствам сценарії, які забезпечують прийнятний компроміс між витратами та надійністю доставки в умовах підвищених ризиків. В реаліях сьогодення, особливо в умовах війни та перебудови логістичних маршрутів, значення системного підходу лише зростає. Зміна напрямків вантажопотоків, перевантаженість окремих транспортних коридорів, обмеження роботи морських портів і частини залізничної інфраструктури змушують транспортні підприємства шукати нові конфігурації логістичних мереж, швидко адаптувати маршрути, комбінувати різні види транспорту. У таких умовах стихійні, нескоординовані рішення втрачають ефективність, а системний підхід стає ключовою умовою виживання й подальшого розвитку. Впровадження системного підходу в управління процесами доставки вантажів забезпечує відчутні практичні результати. Для України, де переважна частина внутрішніх вантажопотоків і значна частка перевезень вантажів у міжнародному сполученні здійснюються автомобільним транспортом, підвищення ефективності виконання перевізного процесу безпосередньо впливає на конкурентоспроможність підприємств транспорту та стійкість логістичних ланцюгів у кризових умовах.

Таким чином, організаційно-технічні заходи (оперативна зміна маршрутів перевезення вантажів, перебудова графіків роботи, переоснащення парку автотранспортних засобів, впровадження новітніх цифрових рішень) отримують кількісне обґрунтування на базі системного підходу, що підвищує якість прийнятих управлінських рішень щодо забезпечення ефективності виконання процесів доставки вантажів. Дослідження показують, що застосування методів та засобів системного підходу в процесах доставки вантажів автомобільним транспортом дозволяє скоротити тривалість транспортно-логістичного циклу, підвищити завантаження парку автотранспортних засобів, знизити експлуатаційні витрати та покращити рівень і якість надання транспортних послуг. В умовах зростаючої ролі автомобільного транспорту системний підхід стає необхідною передумовою для проєктування та розвитку ефективних та адаптивних транспортно-логістичних систем доставки вантажів.

1. Lebid I., Luzhanska N., Lebid I., Mazurenko A., Roi M., Medvediev I., Sotnikova T., Hrevtsov S. Development of a simulation model of the activities of a transport and forwarding enterprise in the organization of international road cargo transportation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 6, No. 3(126). P. 6–17. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.291039. URL:https://journals.uran.ua/eejet/article/view/291039

2. Lebid I., Luzhanska N., Lebid I., Mazurenko A., Halona I., Horban A., Mykhailenko I., Medvediev I., Sotnikova T. Construction of a simulation model of goods delivery in international road transportation taking into account the functioning efficiency of logistics supply chain. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 3, No. 3(123). P. 57–67. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.280886. URL: https://journals.uran.ua/eejet/article/view/280886

3. Dumetz L., Audy J.-F., Rönnqvist M., Azouzi R. Simulation-based evaluation of road transportation logistics in a dry port with topographic challenges. Journal of Shipping and Trade. 2024. Vol. 9. Article 24. DOI: 10.1186/s41072-024-00184-x. URL: https://link.springer.com/article/10.1186/s41072-024-00184-x

4. Dmytriv D., Dmytriv O., Repak O. Analysis of the international road freight transport market in Ukraine under martial law. Socio-Economic Problems and the State (electronic journal). 2023. Vol. 29, No. 2. P. 48–60. DOI: 10.33108/sepd2023.02.048. URL: http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2023/23ddvuvs.pdf

ШАРАЙ Світлана Михайлівна – к.т.н., доцент, професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, Національний транспортний університет, e-mail: Svetasharai@gmail.com
САХНО Володимир Прохорович – д.т.н., професор, завідувач кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua
РОЙ Максим Петрович – доктор філософії, доцент, доцент кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, Національний транспортний університет, e-mail: roymaks16@gmail.com
ПОЛЯКОВ Віктор Михайлович – к.т.н., доцент, професор кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, e-mail: poljakov_2006@ukr.net

Svitlana SHARAI, PhD in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of International Transportation and Customs Control, National Transport University, e-mail: Svetasharai@gmail.com
Volodymyr SAKHNO, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Automobiles Department, National Transport University, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua
Maksym ROI, Doctor of Philosophy, Associate Professor, Associate Professor of the Department of International Transportation and Customs Control, National Transport University, e-mail: roymaks16@gmail.com
Victor POLIAKOV, Ph.D in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Automobiles, National Transport University, e-mail: poljakov_2006@ukr.net

УДК 656.135:631.56

В.В. Буряк, А.А. Кашканов
Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

УПРАВЛІННЯ ЗБЕРЕЖЕНІСТЮ ТА ЕФЕКТИВНІСТЮ ДОСТАВКИ НАСІННЯ СОНЯШНИКУ АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ НА ОСНОВІ GPS-ДАНИХ

У роботі досліджено питання управління збереженістю та операційною ефективністю доставки насіння соняшнику автомобільним транспортом. Оцінено специфіку соняшнику як високовартісної та вразливої олійної культури, транспортування якої супроводжується ризиками крадіжок, усушки й псування вантажу. Обґрунтовано застосування телематичного комплексу на основі обробки GPS-даних, паливних датчиків та електронних систем пломбування кузова для усунення людського фактора. Запропоновано алгоритм диспетчерського нагляду за допомогою механізму геозон. Практичні результати доводять, що запропонований підхід дозволяє оптимізувати витрати палива на 8-12%, скоротити час перебування зерновозів у дорозі на 10-12% та мінімізувати ризики втрати вантажу із терміном окупності системи за 6-9 місяців.

***Ключові слова**: збереженість вантажу, ефективність доставки, насіння соняшнику, автомобільний транспорт, GPS-дані, телематика, геозони, логістичні ризики.*

The paper investigates the issues of managing transport security and operational efficiency in the road logistics of sunflower seeds. The specifics of sunflower seeds as a high-value and vulnerable oilseed crop are assessed, the transportation of which is accompanied by risks of theft, shrinkage, and cargo spoilage. The implementation of a telematics complex based on GPS data processing, fuel sensors, and electronic body sealing systems is substantiated to eliminate the human factor. A dispatch supervision algorithm using a geofencing mechanism is proposed. Practical results prove that the suggested approach optimizes fuel costs by 8-12%, reduces truck transit time by 10-12%, and minimizes cargo loss risks, with a system ROI period of 6-9 months.

***Key words**: cargo security, delivery efficiency, sunflower seeds, road transport, GPS data, telematics, geofencing, logistics risks.*

Сучасний стан глобального агропромислового комплексу вимагає максимальної оптимізації кожного етапу постачання – від збирання врожаю в полі до його кінцевої переробки чи відвантаження на експорт [1]. Логістика зернових культур є капіталомістким і технологічно складним процесом, де ефективність управління флотом транспортних засобів безпосередньо впливає на маржинальність агробізнесу. Будь-які затримки в дорозі, неефективне планування рейсів чи простої автомобілів у чергах перед портовими терміналами та олієекстракційними заводами призводять до колосальних фінансових збитків, зниження якості продукції та зриву міжнародних контрактів [2, 3]. У зв'язку з цим автоматизація контролю перевезень та впровадження систем точного моніторингу стають ключовими чинниками виживання аграрних підприємств на конкурентному світовому ринку [4, 5].

Насіння соняшнику є однією з найбільш високорентабельних, але водночас специфічних і «примхливих» олійних культур. Його логістика автомобільним транспортом супроводжується низкою технологічних труднощів: низька насипна щільність (маса об'єму вантажу значно менша порівняно з пшеницею чи кукурудзою), висока вартість кожної тонни сировини та критична чутливість до вологи і механічних пошкоджень. Через високу ринкову вартість соняшник традиційно є об'єктом підвищеного ризику несанкціонованого доступу, простіше кажучи – розкрадання вантажу під час транспортування. Крім того, неконтрольована зміна маршруту водіями або «ліві» рейси під час збиральної кампанії прямо збільшують собівартість кінцевого продукту (соняшникової олії) через перевитрату дорогого дизельного пального та знос техніки.

З огляду на зазначені виклики, метою цього дослідження є науково-практичне обґрунтування розробки системи управління збереженістю та операційною ефективністю доставки насіння соняшнику автомобільним транспортом шляхом використання телематичних комплексів та аналізу GPS-даних у реальному часі.

Насіння соняшнику суттєво відрізняється від класичних зернових культур (пшениці, кукурудзи, ячменю), що вимагає особливого підходу до організації логістичних процесів. Ключовою

фізико-механічною властивістю соняшнику є його низька насипна щільність (насипна маса), яка зазвичай коливається в межах від 300 до 420 кг/м³. Для порівняння, щільність пшениці становить 750-800 кг/м³. Це означає, що для перевезення однакової за вагою партії соняшнику потрібен кузов автомобіля у два рази більшого об'єму. Як наслідок, логісти змушені залучати великогабаритні зерновози з високими бортами (об'ємом 60-90 м³). Окрім цього, насіння має високу рухливість (плинність) та специфічну шорстку поверхню, через що вантаж легко зміщується під час руху, створюючи додаткове навантаження на тенти та борти автомобіля.

Транспортування соняшнику автомобільними шляхами пов'язане із трьома критичними категоріями ризиків:

1. Крадіжки та несанкціонований доступ: Через високу ринкову вартість соняшнику насіння є «привабливим» об'єктом для розкрадання. Найчастіше це відбувається шляхом часткового відсипання вантажу під час незапланованих зупинок у глухих місцях, де водії діють у змові з перекупниками. Без належного технічного нагляду виявити нестачу в кілька сотень кілограмів на багатотонній машині під час приймання вкрай важко.

2. Псування вантажу: Соняшник має високий вміст олії (до 50-54%) та є гігроскопічною культурою. У разі потрапляння вологи через неякісний чи пошкоджений тент зерновоза, всередині насипу стрімко запускаються процеси самозігрівання та гідролізу жирів. Це призводить до різкого підвищення кислотного числа олії, появи плісняви та повної втрати товарної якості сировини.

3. Природна усушка та просипання: Під час тривалого транзиту в спекотну погоду вологість насіння природним чином знижується, що веде до законної зміни маси (усушки). Проте під виглядом природної усушки недобросовісні перевізники часто маскують банальні крадіжки. Крім того, через мікрощілини в бортах або стиках кузова дрібне насіння соняшнику постійно просипається на дорогу під дією вібрації.

Головним деструктивним чинником у класичній агрологістиці є «ефект чорної скриньки» – повна відсутність контролю за транспортним засобом після його виїзду з території агропідприємства. Традиційний паперовий або телефонний контроль не дозволяє власнику вантажу бачити реальну ситуацію на дорозі. Проблема непрозорості може проявлятися у:

- несанкціонованих відхиленнях від маршруту для виконання позапланових рейсів або заїзду на приватні залізничні тупики й нелегальні склади;
- навмисному затягуванні часу в дорозі, що порушує графік приймання сировини на переробних заводах і створює штучні черги;
- приховуванні фактів дорожньо-транспортних пригод, поломок техніки або зупинок у зонах із високим ризиком викрадення вантажу.

За відсутності об'єктивних цифрових даних у реальному часі, компанія-відправник залишається абсолютно беззахисною перед людським фактором і несе прямі фінансові збитки.

Сучасна система телематичного контролю зерновозів [6-8] розгортається на базі трьох взаємопов'язаних апаратних елементів, які перетворюють звичайну вантажівку на інтегрований цифровий вузол.

1. Апаратна частина (Hardware): трекери, датчики, пломби.

На автомобіль встановлюються бортові GPS-термінали із високочутливими зовнішніми захищеними антенами. Вони безперервно зчитують географічні координати, швидкість, напрямок руху та висоту над рівнем моря. Пристрої мають вбудовану енергонезалежну пам'ять (чорну скриньку), яка записує маршрут навіть у зонах відсутності мобільного покриття і вивантажує дані в систему при відновленні зв'язку. У паливні баки монтуються цифрові ємнісні датчики рівня палива (ДРП) з високою точністю (похибка не перевищує 1%). Вони фіксують поточний об'єм дизельного пального, що дозволяє системі в режимі реального часу відстежувати графік витрат, а головне – миттєво реєструвати факти мікрозливів палива під час руху чи стоянки. З огляду на специфіку соняшнику, критично важливим є контроль доступу до вантажу. Для цього застосовуються бездротові Bluetooth-датчики (BLE-електронні пломби), які встановлюються на механізми натягування тенту, задні борти та люки розвантаження. Будь-яка спроба підняти тент або відкрити борт поза офіційною точкою вивантаження призводить до замикання або розриву контуру датчика.

2. Програмне забезпечення для диспетчеризації.

Дані з усього встановленого обладнання через захищені канали зв'язку (GSM/GPRS) передаються на хмарний сервер телематичної платформи. Спеціалізоване програмне забезпечення агрегує ці потоки інформації та візуалізує їх на інтерактивній карті для диспетчера агрокомпанії. Інтерфейс системи дозволяє автоматично формувати електронні відомості, вести облік робочого часу

водіїв, контролювати стилі водіння (різкі гальмування та прискорення, що мінімізує просипання соняшнику через вібрацію) та інтегрувати ці дані із внутрішніми ERP-системами підприємства [9] (наприклад, Business Automation Software або IT-Enterprise) для автоматичного виписування подорожніх листів.

3. Геозони та контроль зупинок.

Одним із найбільш ефективних інструментів автоматизації контролю є механізм геозон. Геозона – це віртуальний географічний контур довільної форми, окреслений на цифровій карті навколо стратегічних об'єктів: полів, вагових комплексів, АЗС, олієекстракційних заводів чи портів.

Алгоритм роботи (табл. 1) налаштовується таким чином, що система автоматично контролює:

• Коридори безпеки: Навколо затвердженого маршруту створюється буферна зона завширшки, наприклад, 50-100 метрів. Якщо зерновоз перетинає цю межу, система миттєво генерує тривожне сповіщення (SMS, Telegram, Viber або Push-повідомлення диспетчеру).

• Авторизовані зупинки: Програма чітко розрізняє технологічні зупинки (світлофори, залізничні переїзди) від тривалих стоянок. Якщо автомобіль зупиняється поза межами санкціонованих геозон (наприклад, на стихійній парковці біля траси) на час понад 3-5 хвилин, це автоматично кваліфікується як позаштатна ситуація з ризиком несанкціонованого відсипання соняшнику або зливу палива, що вимагає негайного втручання служби безпеки.

Таблиця 1 – Алгоритм диспетчерського нагляду за допомогою механізму геозон

Геозона	Подія	Автоматична дія
1. Завантаження	Виїзд із поля	Реєстрація рейсу, активація пломбування
2. Контрольні точки	Вхід у геозону	Фіксація часу, стан вантажу
3. Позазонні зупинки	Зупинка > 5 хв	Сповіщення диспетчеру
4. Відхилення маршруту	>1 км від траси	Тривожний сигнал
5. Приймальний пункт	Вхід у геозону	Завершення рейсу, формування звіту

Практичне впровадження розробленого телематичного підходу пройшло апробацію в умовах Товариства з обмеженою відповідальністю «Карго Трак» (Вінницька обл., Вінницький р-н, с. Якушинці) на автопоїздах у складі автомобілів-тягачів MAN TGA 18.430 та напівпричепів-зерновозів Kogel (рис. 1), які були задіяні на перевезеннях насіння соняшнику із залізничної станції Козятин до Вінницького олійножирового комбінату (рис. 2). При цьому використовувалась система моніторингу транспорту «Глобус», функціональні можливості якої подані у таблиці 2.



Рисунок 1 – Загальний вигляд задіяних транспортних засобів

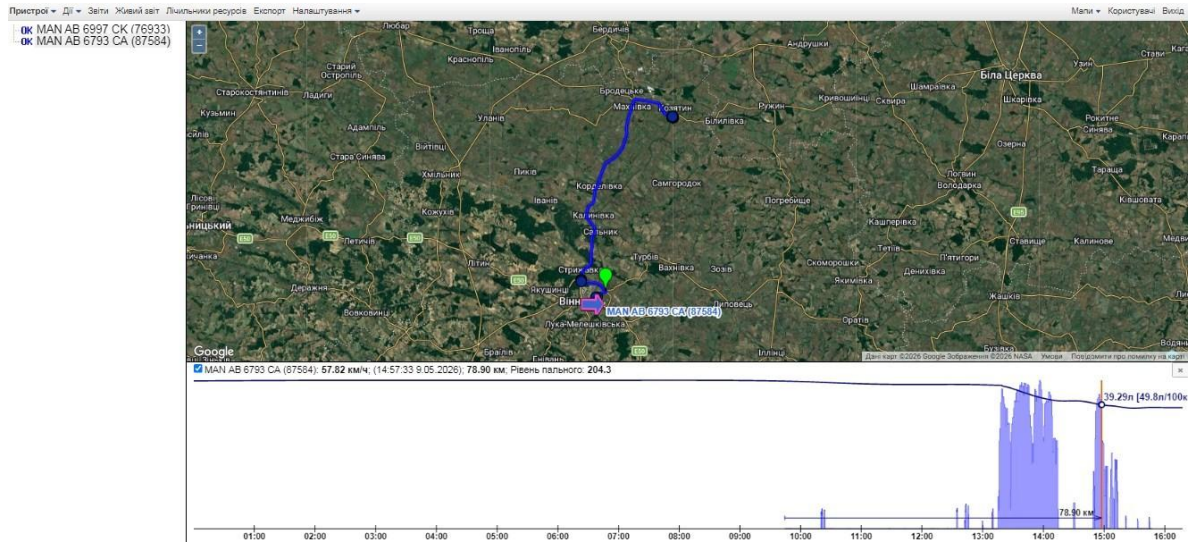


Рисунок 2 – Моніторинг маршруту за допомогою хмарної аналітичної платформи СКТ «Глобус» [1]

Таблиця 2 – Функціональні можливості системи «Глобус»

Категорія	Функціональність	Опис
GPS-моніторинг	Відстеження в реальному часі	Точне позиціонування транспортних засобів з оновленням кожні кілька секунд
Аналітика	Аналіз маршрутів, витрат пального, стилю водіння	Виявлення неефективностей, прогнозування витрат, оцінка ризиків
Технічний стан	Контроль параметрів ТЗ (температура, оберти, рівень пального тощо)	Збір телематичних даних з CAN-шини або датчиків
Тайм-менеджмент	Облік часу роботи, простоїв, зупинок	Автоматичне формування звітів про продуктивність
Планування маршрутів	Оптимізація логістичних маршрутів	Побудова маршрутів з урахуванням трафіку, завантаженості та пріоритетів
Інтеграція	Сумісність з ERP, CRM, API	Можливість обміну даними з внутрішніми системами підприємства
Хмарна архітектура	Доступ з будь-якого пристрою	Веб-інтерфейс, мобільний додаток, автоматичне оновлення
Безпека	Контроль доступу, шифрування, резервне копіювання	Захист даних відповідно до стандартів ISO/IEC 27001
Звіти та документообіг	Генерація звітів, актів, маршрутних листів	Експорт у PDF, Excel, автоматичне надсилання на email
Машинне навчання	Прогнозування несправностей, поведінки водіїв	Використання алгоритмів для виявлення аномалій та оптимізації

Верифіковані результати апробації такі:

1. Завдяки покращенню передбачуваності та стабільності логістики загальний час перебування зерновозів у дорозі скоротився на 10-12%. Це дало змогу впровадити концепцію «точно в строк» і зменшити час очікування на приймальному пункті Вінницького олійножирового комбінату.

2. Запровадження електронного пломбування кузова з GPS-контролем істотно скоротило комерційні втрати соняшнику під час перевезення, забезпечивши високий рівень захисту вантажу. Використання систем моніторингу стилю водіння сприяло зменшенню вібрацій та просипання насіння на автошляхах, що дозволило знизити втрати до технологічно допустимого рівня.

3. Впровадження системи моніторингу витрат пального забезпечило скорочення витрат на дизельне пальне. У середньому економія становить 8-12%, що підтверджує ефективність сучасних телематичних технологій у перевезеннях зерновими автопоїздами.

4. Фінансовий аналіз показує, що інвестиції у встановлення комплексу телематичного контролю на один автомобіль-зерновоз окупаються в середньому протягом 6-9 місяців.

Таким чином, проведене дослідження та аналіз практичного досвіду впровадження телематичних систем підтверджують, що перехід від традиційних методів управління автопарком до цифрового моніторингу в реальному часі є ключовим напрямом розвитку сучасної агрологістики. Такий підхід забезпечує підвищення ефективності перевезень, зниження витрат та мінімізацію комерційних втрат, що робить його стратегічно необхідним для конкурентоспроможності галузі.

Подальший розвиток систем моніторингу перевезень зернових культур в Україні тісно пов'язаний із впровадженням технологій штучного інтелекту, машинного навчання та інтернету речей [10, 11]. Наступним етапом еволюції цифрової логістики стане поступовий перехід від реактивних систем контролю до прогностичних моделей, здатних передбачати час прибуття, оптимізувати маршрути та оцінювати поведінку водіїв [12, 13]. Це відкриває перспективи підвищення ефективності та зниження ризиків, хоча практична реалізація залежить від доступності даних та рівня технологічної інтеграції.

6 Кашканов А.А., Буряк В.В. Проблемні питання організаційно-технічного розвитку перевезень зернових культур автомобільним транспортом в Україні. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2024. Том 1, №22. С. 163-169. https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1357

7 Кашканов А.А., Буряк В.В. Управління ефективністю перевезення зернових культур автомобільним транспортом на основі критеріального підходу. Автошляховик України. 2025. №1. С. 56-62. https://doi.org/10.33868/0365-8392-2025-1-282-56-62

8 Кашканов А. А., Буряк В.В., Москалюк М.Л. Аспекти логістичного забезпечення виробничих процесів підприємств автомобільного транспорту України. Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 23-25 жовтня 2023 року: збірник наукових праць. Вінниця: ВНТУ. 2023, С. 154-156. https://atm.vntu.edu.ua/konf/Zbirnyk_STPR_AT_2023.pdf

9 Буряк, В., & Кашканов, А. (2025). Інтелектуальні системи моніторингу в логістиці зернових: вплив на експлуатаційні витрати автомобільного транспорту. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, (28), 6–13. https://doi.org/10.30977/VEIT.2025.28.0.1

10 Garima, Olaru, D., Smith, B., & Siddique, K. H. M. (2024). Decision-Making in Grain Supply Chains for Sustainable Food System. Sustainability (Switzerland), 16(24), Article 10816. Advance online publication. https://doi.org/10.3390/su162410816

11 Буряк В.В., Кашканов А.А. Методика синтезу інтегрованої логістично-інформаційної системи доставки зернових культур в умовах цифрової трансформації. Вісник машинобудування та транспорту. 2025. 22(2), С. 16-25. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2025-22-2-16-25

12 Hussein, J. B., Workneh, T. S., Kassim, A., Ntsowe, K., Melesse, S. F., & El-Mesery, H. S. (2025). A review on the impact of big data analytics in transforming agricultural practices, food processing, and preservation strategies. Applied Food Research, 5(2), 101234. https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101234

13 Jayarathna, C. P., Agdas, D., Dawes, L., & Yigitcanlar, T. (2021). Multi-Objective Optimization for Sustainable Supply Chain and Logistics: A Review. Sustainability, 13(24), 13617. https://doi.org/10.3390/su132413617.

14 Woźniakowski T, Jałowiecki P, Zmarzłowski K. ERP systems and warehouse management by WMS. Information System in Management. 2018. 7(2). 141-51. https://doi.org/10.22630/ISIM.2018.7.2.13

15 Nawaz, M., Babar, M.I.K. IoT and AI for smart agriculture in resource-constrained environments: challenges, opportunities and solutions. Discov Internet Things 5, 24 (2025). https://doi.org/10.1007/s43926-025-00119-3

16 Raji, H. (2024). The Integration of Internet of Things in Agriculture Supply Chain Management. In: Azrour, M., Mabrouki, J., Alabdulatif, A., Guezzaz, A., Amounas, F. (eds) Smart Internet of Things for Environment and Healthcare. Studies in Computational Intelligence, vol 1165. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70102-3_20.

17 Mahale Y., Kolhar S., More A. S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions. Discover Applied Sciences. 2025, 7, 243. https://doi.org/10.1007/s42452-025-06681-3

18 Gawande P.D. Integrating AI-Driven Predictive Maintenance with Telematics: A Data-Centric Approach. Sarcouncil Journal of Engineering and Computer Sciences. 2025, 4(7), P. 456-462. https://doi.org/10.5281/zenodo.15862327

БУРЯК Валерій Володимирович – аспірант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету, e-mail: btr.vl@i.ua

КАШКАНОВ Андрій Альбертович – д.т.н., професор, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету, e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua

BURIAK Valerii, PhD student of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: btr.vl@i.ua

KASHKANOV Andrii, Doctor of Science in Engineering, Professor, Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua

УДК 621.45.027

Вікович І.А., Обшта А.Ф., Бур'ян М.В.
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ВПЛИВ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЬОВАНОГО ШИРОКОЧАСТОТНОГО ПЛАСТИНЧАСТОГО ДИНАМІЧНОГО ГАСНИКА КОЛИВАНЬ НА ЗНИЖЕННЯ ВІБРАЦІЇ РОТОРНОГО НАСОСА

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження роторного насоса з регульованим широкочастотним пластинчастим динамічним гасником коливань для зниження вібрації роторного насоса. Для уточненого розрахунку, раціональної та надійної експлуатації роторного насоса розроблено Побудовано теоретичну амплітудно-частотну характеристику і порівняно її із експериментальною осцилограмою коливань основи роторного насоса з регульованим широкочастотним пластинчастим динамічним гасником коливань для виявлення його головних оптимальних параметрів, таких як амплітуда коливань головної конструкції роторного насоса, власні і вимушені частоти коливань та його оптимальну масу для раціонального налаштовування системи насос – широкочастотний пластинчастий динамічний гасник коливань на оптимальні режими функціонування.

Ключові слова: роторний насос, вібрація, динамічний гасник коливань, оптимізація, напруження, міцність, амплітудно-частотна характеристика

Роторні насоси застосовуються в техніці для перекачування різних рідких, в'язких і густих рідин, мастил, палива тощо. Найширше застосовуються: у нафтогазопереробній і паливній; хімічній; машинобудівній; харчовій промисловостях та у сільському господарстві.

Вібрація роторних насосів під час їх експлуатації є доволі поширеною неприємною проблемою, яка часто призводить до виникнення додаткового шуму на довкілля і, головне, зменшує довговічність роботи роторних насосів, а інколи може призводити і до втрати їх працездатності.

Зниження вібрацій роторних насосів досягають шляхом центрування і балансування валів їхніх роторів та віброізоляції шляхом застосування гумових/пружинних підставок тощо, тобто використання звукопоглинальних матеріалів, кожухів, антивібраційних прокладок або кріплень.

Крім таких класичних технічних заходів для зменшення вібрацій роторних насосів, нерідко використовують різноманітні типи гасників вібрації.

Ефективними є динамічні гасники коливань (ДГК), які широко застосовуються для зменшення рівнів вібрації і шуму у кабінах транспортних засобів, вібрації різноманітних обертових машин та для зменшення амплітуд коливань різних щогл кранів, телевізійних веж і висотних споруд тощо.

Отже, зменшення вібрації, пов'язаної з проєктуванням і експлуатацією сучасних високотехнологічних машин, є важливою й актуальною проблемою.

Загальновідомо, що зменшення вібрації в одномасових механічних системах під час дії гармонійного збурення [1] за допомогою ДГК належить, зазвичай, до класичних задач. Розгляд методів розрахунку деяких механічних систем із ДГК були розглянуті у працях [2, 3]. Переважно на практиці застосування різних типів ДГК доволі часто опираються на недостатньо обґрунтовані математичні моделі складних конструкцій і неефективному проєктуванні конструкцій із ДГК. При цьому не враховують пружні та демпфувальні властивості головної конструкції різних обертових машин, пружні властивості вузлів приєднання ДГК до головної конструкції таких машин, а також характеристики їхніх з'єднувальних елементів, які можуть істотно впливати на вібрацію таких машин.

Нами застосовано метод динамічної конденсації, який найголовніше полягає у зменшенні порядку вирішуючої системи рівнянь динамічної рівноваги конструкцій обертових машин на основі апріорного врахування формозміни елементів цих конструкцій [4, 5].

Метою дослідження є визначення динамічних характеристик регульованого широкочастотного пластинчастого динамічного гасника коливань та знаходження їхніх оптимальних параметрів для зниження вібрації роторного насоса у процесі його експлуатації. Для вирішення поставленої задачі дослідження використовувались: математичне моделювання, яке полягало у розробленні динамічної і математичної моделі регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК, що описувалась системою нелінійних диференціальних рівнянь, які відтак були розв'язані

числовим методом за допомогою розробленої комп'ютерної програми. Для знаходження оптимальних параметрів регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК застосовано метод генетичної опти мінімізації. Адекватність аналітичних досліджень підтверджена порівнянням результатів чисельного розрахунку із результатами експериментальних досліджень і добрим збігом цих результатів.

Для уточненого розрахунку раціональної та надійної експлуатації пожежного роторного насоса розроблено теоретичну модель механічної коливальної системи насос – ДГК і визначено конкретні параметри такої механічної системи. Для цього було проведено також ряд оригінальних експериментальних досліджень роторного насоса з регульованим широкочастотним ДГК, які дали змогу ідентифікувати необхідну кількість параметрів і визначити їхні конкретні значення. Деякі параметри цієї моделі задавались апріорі, зокрема маси, геометричні розміри, місця кріплення додаткових мас та в'язкопружні властивості цього ДГК. Для визначення пружних і демпфувальних параметрів моделі роторного насоса з регульованим широкочастотним пластинчастим ДГК необхідно було провести додаткові дослідження.

Відповідно до розробленої розрахункової схеми регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК роторного насоса визначено низку параметрів цієї моделі, які відображають властивості пластинчастого такого ДГК і насоса на фундаменті.

На рис. 1 показано принципову схему загального вигляду регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК роторного насоса та його динамічну модель [4].

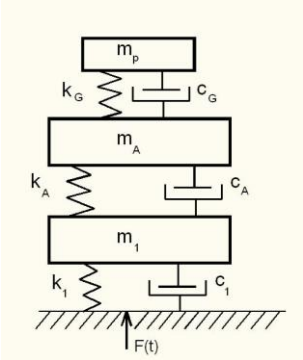


Рис. 1. Розрахункова схема динамічної моделі роторного насоса з ДГК

На динамічній моделі регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК роторного насоса позначено: m_1 – маса насоса, m_A – маса ДГК, m_P – зведена маса металевих кульок у контейнері ДГК; k_1, k_A, k_P і c_1, c_A, c_P – відповідно коефіцієнти жорсткості і демпфування основи роторного насоса, пружного пластинчастого елемента ДГК та металевих кульок.

Розрахункова модель роторного насоса із регульованим широкочастотним пластинчастим ДГК, згідно рис. 1, описувалась системою нелінійних диференціальних рівнянь:

$$m_1 \ddot{w}_0 + (c_1 + c_A)\dot{w}_0 + (k_1 + k_A)w_0 - c_A \dot{w}_A - k_A w_A = F_t, \quad (1)$$

$$m_A \ddot{w}_A + c_A \dot{w}_A + k_A w_A - k_A w_0 - c_A \dot{w}_0 - k_A w_0 - k_G(x)(w_P - w_A) - c_G(x)\left(\dot{w}_P - \dot{w}_A\right) = 0, \quad (2)$$

$$m_P \ddot{w}_P + k_G(x)(w_P - w_A) + c_G(x)\left(\dot{w}_P - \dot{w}_A\right) = 0, \quad |w_P - w_A - D| > 0 \quad (3)$$

$$|w_P - w_A - D| < 0 \quad (i=1,2) \quad (4)$$

де m_1, m_A та m_p - маси, відповідно: головної конструкції пожежного роторного насоса, ДГК та еквівалентна маса металевих кульок у контейнері; k_1, k_A – відповідні жорсткості головної конструкції пожежного роторного насоса та ДГК; c_1, c_A – коефіцієнти в'язкого демпфування відповідно головної конструкції пожежного роторного насоса та ДГК; w_0, w_A, w_P – переміщення відповідно головної конструкції пожежного роторного насоса (основи контейнера), ДГК та маси наповнення кульок контейнера; Ft – гармонічне збурення головної конструкції роторного насоса.

Диференціальні рівняння динамічної рівноваги для сукупної маси m_p (маса металевих кульок у контейнері регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК) та еквівалентної маси цих кульок

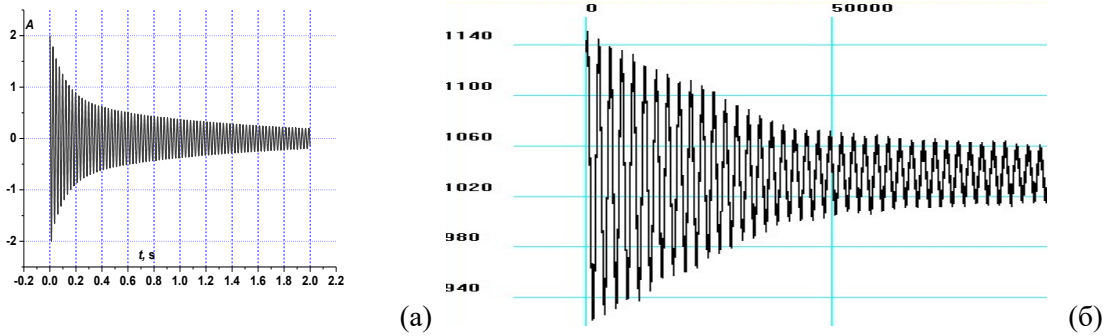
під час функціонування роторного насоса представлено у вигляді рівнянь (3 – 4), де m_P – загальна зведена маса кульок у контейнері (2); c_P – коефіцієнти в'язкого демпфування металевих кульок у контейнері; k_G – жорсткість в'язко-пружних обмежувальних «бар'єрів» контейнера; c_G – коефіцієнт в'язкого демпфування обмежувальних «бар'єрів» контейнера; w_P – переміщення еквівалентної маси кульок у контейнері; w_A – переміщення основи контейнера, D – вільний простір між металевими кульками і кришкою контейнера.

Для числового розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь (1) застосовано метод Гіра з подвійною точністю. Для покращення точності і швидкодії отримання числового розв'язання системи рівнянь (1), пружні та демпфувальні характеристики обмежувальних «бар'єрів» контейнера ДГК згладжено за допомогою функції Больцмана.

Для визначення параметрів і характеристик регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК, відповідно до розрахункової схеми (рис. 1), було здійснено параметричний аналіз властивостей цього пластинчастого ДГК.

Досліджено вплив демпфування роторного насоса із пружним регульованим широкочастотним пластинчастим ДГК і пружно-демпфуючих властивостей регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК, заснованого на розрахунку монотонного зменшення амплітуди коливань під час початкового кінематичного збурення, і встановлено, що на початку процесу кінематичного збурення ДГК амплітуда коливань самого ДГК роторного насоса різко зменшується. Це зумовлено значним розсіянням енергії під час взаємодії металевих рухомих кульок у контейнері з його стінками. Відтак, при зменшенні амплітуди коливань рухомого контейнера ДГК з металевими кульками, коли пришвидшення коливань контейнера стає меншим за гравітаційне, кульки спадають на дно контейнера і тоді вони функціонують тільки як додаткова маса та не створюють ефекту внутрішнього міжкулькового тертя.

На рис. 2а показано теоретичну форму коливань основи роторного насоса із регульованим широкочастотним пластинчастим ДГК під час кінематичного збурення, а на рис. 2б – експериментальну осцилограму коливань роторного насоса із регульованим широкочастотним пластинчастим ДГК за наявності наповнення його металевими кульками у його контейнері [4].



(а) (б)

Рис. 2. Теоретична форма коливань основи роторного насоса із регульованим широкочастотним пластинчастим ДГК під час кінематичного збурення (3а) і експериментальна осцилограма роторного насоса із регульованим широкочастотним пластинчастим ДГК (б)

У процесі експерименту задавались конкретні значення параметрів c_P, k_G, c_G тощо у рівнянні ударної маси, щоб досягнути максимального збігання теоретичних і експериментальних результатів досліджень. Разом з цим досліджувати повну систему нелінійних диференціальних рівнянь (1 – 4) доволі складно, особливо у широкому частотному спектрі. Тому для числового розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь (1 – 4), на основі експериментальних результатів досліджень значення коефіцієнтів в'язкого демпфування ДГК були підібрані такими: $c_A = 0.0001$ для наповненого контейнера і $c_A = 0.00033$ для порожнього контейнера.

На основі проведених теоретичних і теоретико-експериментальних досліджень було визначено оптимальні параметри для регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК роторного насоса. На рис. 3 наведені експериментальні віброграми головної конструкції роторного насоса з регульованим широкочастотним пластинчастим ДГК з робочими частотами, близькими до частоти $f_R \approx 50 Гц$. Експериментально виміряні відхилення від робочої частоти $f_R \approx 50 Гц$ пожежного роторного насоса з регульованим широкочастотним пластинчастим ДГК були в межах 0,1 – 0,15 %. Застосовано такий алгоритм експерименту: головна маса m_A регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК переміщалася по пластині з фіксованим кроком 1 см. Під час кінематичного збурення вимірювалася власна частота коливань регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК пожежного роторного насоса. Потім проводились вимірювання безпосередньо при включеному у роботу пожежного роторного насоса з масою ДГК 1,881 кг.

Як бачимо з віброграми, що на частоті, яка близька до теоретично оптимальної (рис. 3 в), амплітуда коливань основи головної конструкції пожежного роторного насоса з пластинчастим ДГК зменшується на порядок.

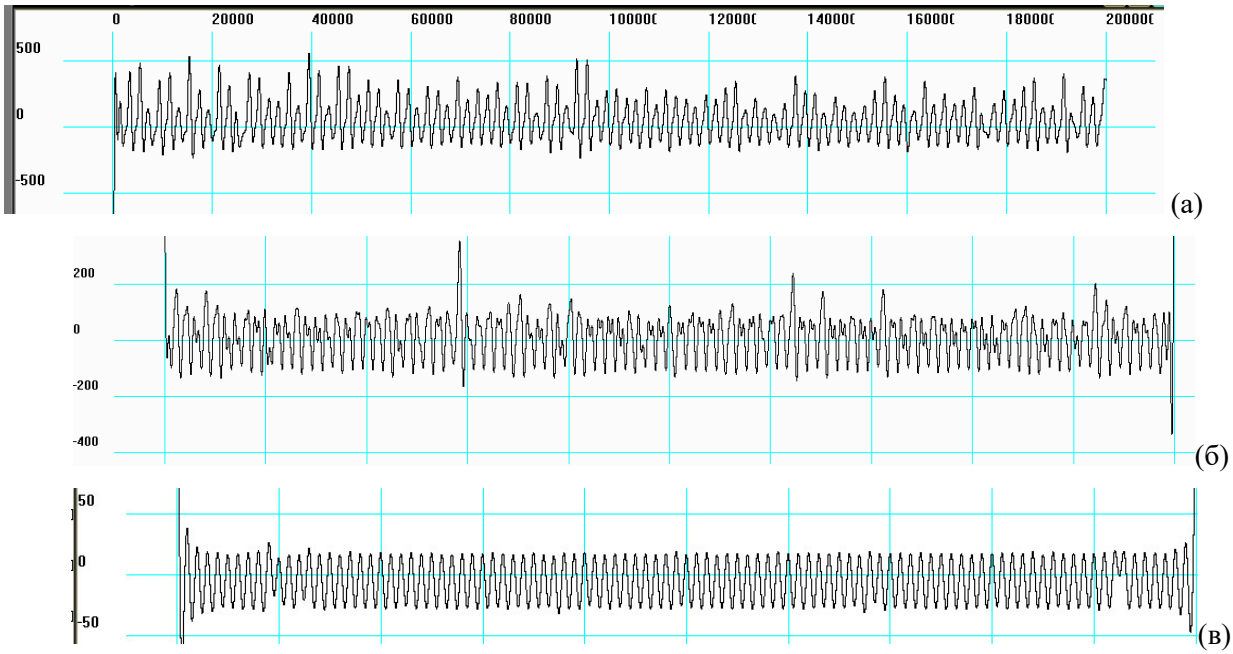


Рис. 3. Експериментальні віброграми коливань основи головної конструкції пожежного роторного насоса з пластинчастим ДГК за різних власних частот ДГК: *а* – $f_A = 46 Гц$; *б* – $f_A = 46.5 Гц$; *в* – $f_A = 47 Гц$

Отже, враховуючи відповідні характеристики конструкції пожежного роторного насоса з пластинчастим ДГК і порівняно достатні обсяги числового експерименту, можна підібрати оптимальні характеристики ДГК для зниження вібрації конструкції загалом. Для переважної більшості малопотужних різних типів насосів пожежних установок домінуючим чинником є вібропоглинання у зоні робочої частоти. АЧХ оптимального за конструкцією пластинчастого ДГК пожежного роторного насоса у такому разі буде значно відхилятися вліво (рис. 3 б) від робочої частоти головної конструкції (коливальної системи електродвигун – насос), яка практично загалом є 50 Гц.

Одними із найважливіших критеріїв проєктування ДГК є його міцність та компактність. Міцність складних конструкцій визначається переважно міцністю їхніх з'єднань. Крім цього, з'єднання часто є концентраторами напружень. У разі пластинчастого ДГК, у вигляді маси на консолі, максимальних напружень, як відомо, слід очікувати у затисненні консольної балки-пластини (пружного елемента пластинчастого ДГК).

Якщо жорсткісні параметри конструкції пожежного роторного насоса з пластинчастим ДГК впливають доволі істотно на його вібраційні процеси, то демпфуючі параметри значно менше впливають. Разом із тим слід очікувати значного впливу демпфуючих властивостей роторного насоса

з регульованим широкочастотним пластинчастим ДГК на максимальну амплітуду його коливань, а отже, на його міцність.

Максимальне напруження у пружному пластинчастому елементі ДГК повинно бути меншим за допустиме багатоциклове напруження.

$$\sigma_{MAX} < [\sigma]^{-1}, \quad (5)$$

Зокрема для ресорної сталі 65Г, з якої доцільно виготовляти пружні пластинчасті елементи ДГК, приблизно дорівнює 240 МПа. Усі геометричні параметри пружинних пластинчастих ДГК регулюються частотними характеристиками і відповідними конструктивними вимогами. Причому єдиним незалежним регульованим параметром регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК роторного насоса є амплітуда коливань A його маси. На рис. 4а показані АЧХ при малому (оптимізованому) демпфуванні ДГК та порівняно більшому демпфуванні. На рис. 4б показані відповідні АЧХ пожежного роторного насоса (базису) з пластинчастим ДГК.



(а) (б)

Рис. 4. АЧХ головної конструкції роторного насоса з регульованим широкочастотним пластинчастим ДГК за різного демпфування (а) та АЧХ ДГК для цих значень демпфування

Запропоновано сукупний алгоритм оптимізації роторний насос – регульований широкочастотний пластинчастий ДГК, який включає:

1. Теоретико-експериментальне визначення найважливіших параметрів головної конструкції роторного насоса і регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК.
2. Плавну зміну частоти коливань регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК, у деякому заданому, теоретично визначеному діапазоні частот.
3. Підбір, серед отриманих віброграм, раціональних (оптимальних) значень усіх найважливіших конструктивних параметрів регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК.

Отже, визначено динамічні та конструктивні параметри регульованого широкочастотного пластинчастого ДГК, що дає змогу раціонально налаштовувати систему роторний насос – регульований широкочастотний пластинчастий ДГК на оптимальні режими їх функціонування, уникати резонансних режимів і підвищити довговічність та надійність функціонування конструкції роторного насоса загалом.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Den Hartog, J. P. (1956), Mechanical Vibrations (4th edition) Mc Graw-Hill, New York.
2. Тимошенко С.П.Статические и динамические проблемы теории упругости. – Киев: Наукова думка, 1975.
3. Timoshenko S.P. Advanced Dynamics, with D. H. Young, McGraw-Hill Book Company, 1948.
4. Вікович, Б.М. Дівеєв, А.П. Зінковський, Розрахунково-експериментальне визначення динамічних характеристик роторного насоса з пластинчастим динамічним гасником коливань/Міжнар. Наук.-техн. журнал Проблеми міцності.- К.: Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України, 2022. DOI 10.1007/s11223-022-00434-y, Strength of Materials, Vol. 54, No. 4, July, 2022.
5. Вікович І.А., Дівеєв Б.М., Дубневич О.М., Яворський Я.П. Дослідження процесу зрівноваження ротора за допомогою вібраційних демпферів із застосуванням програми SOLID WORKS і модуля MOTION//Вісн. НУ “Львівська політехніка”.–2007.–№583.– С. 35-43.

ВІКОВИЧ Ігор Андрійович, доктор технічних наук, професор кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: wikovigor@gmail.com.ua https://ORCID ID: 0000-0003-0281-158X

ОБШТА Анатолій Феліксович, доктор технічних наук, професор кафедри захисту інформації, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: obshta2002@gmail.com.ua https:// ORCID ID: 0000-0001-5151-312X

БУР'ЯН Михайло Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри проєктування машин та автомобільного інжинірингу, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: mykhailo.v.burian@lpnu.ua https:// ORCID ID: 0000-0003-2859-3461

УДК 656.13

В.В. Гілевич, Ю.М. Яремко
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ДО ЕКОЛОГІЧНИХ НЕБЕЗПЕК АВТОМОБІЛІВ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розглянуто основні чинники, що впливають на екологічну безпеку транспортних потоків в умовах урбанізації та зростання автомобілізації. Проаналізовано вплив інтенсивності руху, режимів експлуатації автомобілів, типу палива, технічного стану автопарку, дорожньої інфраструктури та організації дорожнього руху на рівень забруднення атмосферного повітря. Окрему увагу приділено електромагнітному випромінюванню сучасних транспортних засобів як малодослідженому чиннику екологічного ризику, особливо в умовах поширення електричного та гібридного транспорту. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до оцінки екологічного впливу транспортних систем, впровадження екологічно чистих технологій, інтелектуальних транспортних рішень і розвитку сталих форм мобільності для підвищення безпеки міського середовища.
Ключові слова: *безпека руху, електромагнітне випромінювання, транспортний потік, транспортний засіб, міське середовище.*

The main factors affecting the environmental safety of transport flows in the conditions of urbanization and the growth of motorization are considered. The influence of traffic intensity, vehicle operation modes, fuel type, technical condition of the fleet, road infrastructure and road traffic organization on the level of atmospheric air pollution is analyzed. Special attention is paid to the electromagnetic radiation of modern vehicles as a little-studied factor of environmental risk, especially in the conditions of the spread of electric and hybrid transport. The need for an integrated approach to assessing the environmental impact of transport systems, the introduction of environmentally friendly technologies, intelligent transport solutions and the development of sustainable forms of mobility to improve the safety of the urban environment is substantiated.
Key words: *traffic safety, electromagnetic radiation, transport flow, vehicle, urban environment.*

Зі зростанням рівня урбанізації та стрімким розвитком автомобілізації проблема екологічної безпеки транспортних потоків (ТП) набуває особливої актуальності та перетворюється на один із ключових викликів сучасного міського розвитку. Зростання інтенсивності дорожнього руху призводить до погіршання стану природного середовища і негативно впливає на якість життя міського населення. У таких умовах транспортна система міста стає визначальним чинником екологічного ризику.

Під час використання транспортних засобів (ТЗ) у повітря потрапляють оксиди азоту, оксид вуглецю, тверді частинки, леткі органічні сполуки та інші шкідливі речовини, які спричиняють погіршення якості атмосферного повітря та становлять загрозу для здоров’я населення. За даними наукових досліджень, викиди ТЗ у великих містах можуть становити до 90% загального обсягу забруднюючих речовин в повітрі мегаполісів.

Систематичний аналіз екологічних аспектів функціонування ТП створює передумови для оптимізації транспортної інфраструктури, впровадження екологічно орієнтованих технологій та розвитку сталих форм мобільності, зокрема громадського транспорту, електротранспорту, велосипедного руху та пішохідних зон. Це сприяє зниженню рівня забруднення довкілля, підвищенню екологічної безпеки і забезпеченню сталого розвитку урбанізованих територій.

До основних чинників, що визначають екологічну безпеку ТП, належать такі:

9. *Інтенсивність транспортного потоку* є одним із базових кількісних показників, що характеризує рівень навантаження на вулично-дорожню мережу та безпосередньо впливає на обсяги шкідливих викидів. Зі зростанням інтенсивності руху зростає концентрація забруднюючих речовин у приземному шарі повітря, особливо в умовах обмеженої пропускної здатності вулиць. Тут важливу роль відіграє не лише загальна кількість транспортних засобів, але й структура ТП. Встановлено, що збільшення частки приватного автотранспорту призводить до зростання питомих викидів парникових газів, зокрема CO_2, а також оксидів азоту (NO_x), монооксиду вуглецю (CO) і твердих частинок ($PM_{2,5}$ та PM_{10}) [1]. Вантажні автомобілі та автобуси, незважаючи на меншу кількість у складі потоку, можуть формувати значну частку сумарних викидів через більший об’єм двигуна та вищу витрату

палива. У великих містах України (Київ, Львів, Харків) у години пік значення інтенсивності руху на магістральних вулицях може перевищувати 2500-3000 авт./год на смугу, що призводить до перевищення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин, особливо в зоні перехресть і транспортних вузлів [2].

10. *Режим руху транспортних засобів* істотно впливає як на обсяг, так і на хімічний склад викидів. Найбільш екологічно несприятливим є нестаціонарний режим руху, який характеризується частими змінами швидкості, зупинками, розгонами та гальмуваннями. У таких умовах двигун працює в неоптимальному режимі, що зумовлює збільшення витрат палива та підвищення рівня токсичних викидів [2]. Особливо негативними є транспортні затори, під час яких двигуни тривалий час працюють на холостому ходу. У цьому режимі значно зростає концентрація монооксиду вуглецю та незгорілих вуглеводнів, а також діоксиду азоту, який є основним компонентом фотохімічного смогу [3]. Мінімальні значення питомих викидів зазвичай досягаються при рівномірному русі зі швидкістю 40-60 км/год, тоді як у заторах або при швидкості нижче 10-15 км/год викиди можуть зростати в 2-3 рази.

11. *Тип використовуваного палива та технічний стан транспортних засобів* є важливими чинниками екологічної безпеки транспортних потоків. Автомобілі, що не відповідають сучасним екологічним стандартам (Euro 3 і нижче), характеризуються вищими показниками викидів токсичних речовин, особливо оксидів азоту, сажі та поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Наявність сучасних систем очищення відпрацьованих газів (каталітичних нейтралізаторів, сажових фільтрів, систем EGR) дозволяє знизити викиди NO_x і твердих частинок на 40-90%. Водночас використання неякісного палива або незадовільний технічний стан двигунів транспортних засобів істотно зменшують ефективність таких систем [3].

12. *Стан дорожньої інфраструктури та організація дорожнього руху* визначають умови формування транспортних потоків і, відповідно, рівень екологічного навантаження. Низька пропускна здатність доріг, нераціональне планування перехресть, відсутність об'їзних маршрутів і неадаптивне світлофорне регулювання сприяють утворенню заторів і збільшенню тривалості перебування ТЗ у зоні впливу [2, 4]. Дослідження показують, що впровадження адаптивного світлофорного регулювання та організація «зеленої хвилі» дозволяють зменшити кількість зупинок до 30-40% і знизити викиди NOx на 20-25% на критичних ділянках дорожньої мережі [5].

Аналіз даних підтверджує, що домінування приватного автотранспорту є однією з головних причин підвищеного рівня забруднення повітря в містах. Розвиток громадського транспорту, велосипедної інфраструктури та впровадження інтелектуальних транспортних систем створюють передумови для істотного зниження екологічного навантаження. Таким чином, оптимізація організації дорожнього руху, оновлення автопарку, впровадження екологічно чистих технологій та популяризація сталих форм мобільності є визначальними напрямами підвищення екологічної безпеки транспортних потоків. Такий висновок підтверджується результатами як вітчизняними, так і міжнародними дослідженнями [1-7].

13. *Електромагнітне випромінювання транспортних засобів* є невід'ємною складовою сучасного антропогенного навантаження, яке формується в умовах зростаючої інтенсивності транспортних потоків та активного впровадження електричних і електронних технологій у транспортній галузі. На відміну від традиційних видів забруднення, таких як хімічні викиди або шум, електромагнітне випромінювання (ЕМВ) має менш помітний, але тривалий і комплексний характер впливу, що зумовлює необхідність його системного врахування в контексті екологічної безпеки.

Сучасні ТЗ, особливо електричні та гібридні автомобілі, є складними технічними системами, які містять велику кількість електронних та комунікаційних компонентів. Під час їхньої роботи утворюються електромагнітні поля різної частоти та інтенсивності, які формують електромагнітне середовище транспортного засобу. Основними джерелами ЕМВ у сучасних ТЗ: електродвигуни (під час роботи двигуна відбувається перетворення електричної енергії в механічну, що супроводжується виникненням змінних магнітних полів); інвертори (забезпечують перетворення постійного струму від акумуляторної батареї в змінний струм для живлення електродвигуна, працюють на високих частотах і створюють імпульсні електромагнітні поля); системи живлення високої напруги (включають акумуляторні батареї, силові кабелі, перетворювачі напруги та системи керування енергопотоками); бездротові технології для забезпечення комфорту, безпеки та навігації (Bluetooth, Wi-Fi, GPS, мобільні модулі зв'язку та системи обміну даними між транспортними засобами функціонують у режимі постійного або періодичного обміну сигналами, що призводить до безперервного випромінювання низькоінтенсивного радіочастотного ЕМВ).

Отже, сучасні транспортні засоби є багатоджерельними системами електромагнітного випромінювання. Хоча рівні ЕМВ у більшості випадків не перевищують встановлених нормативів безпеки, комплексний і тривалий характер впливу потребує подальших наукових досліджень та вдосконалення методів моніторингу електромагнітного середовища, яке генерується у ТЗ.

З огляду на зростаюче впровадження електричних, гібридних та інтелектуальних транспортних засобів, питання мінімізації рівнів електромагнітного випромінювання набуває особливої актуальності. Хоча більшість сучасних транспортних засобів відповідає міжнародним нормам електромагнітної безпеки, застосування додаткових технічних та конструктивних заходів дозволяє ще більше знизити електромагнітне навантаження на водія, пасажирів та пішоходів.

Застосування комплексу технічних, конструктивних та організаційних заходів формує мету, яка полягає не лише у зниженні рівнів електромагнітних полів, а й у забезпеченні стабільної роботи електронних систем та підвищенні загального рівня безпеки транспортної інфраструктури.

Одним з важливих і водночас найменше досліджених чинників є електромагнітне випромінювання, яке продукують транспортні засоби. В науковій літературі можна знайти багато інформації про негативний вплив ЕМВ на організм людини і навколишнє середовище [8, 9].

Аналіз результатів наукових даних свідчить, що електромагнітні поля, які утворюються внаслідок роботи ТЗ у складі ТП, за сукупною дією, особливо в умовах щільного міського руху та тривалого перебування людей у зоні впливу, можуть створювати додаткове електромагнітне навантаження на організм людини та елементи навколишнього середовища. Це набуває особливої актуальності з огляду на зростання частки електричних і гібридних транспортних засобів, оснащених високовольтними системами та численними бездротовими модулями зв'язку.

Потенційний вплив електромагнітного випромінювання проявляється насамперед у вигляді функціональних змін фізіологічних процесів, а також у можливому порушенні біологічних механізмів у живих організмів. Хоча причинно-наслідкові зв'язки між рівнями ЕМВ та довгостроковими негативними наслідками для здоров'я залишаються предметом наукових дискусій, превентивний підхід до мінімізації впливу електромагнітних полів є обґрунтованим та доцільним.

Впровадження методів оцінки шкідливих впливів від транспортних засобів сприяє не лише зменшенню потенційних ризиків для здоров'я людини, а й підвищенню екологічної безпеки транспортних систем, що є важливим аспектом сталого розвитку сучасних міст. Наголошується, що електромагнітне випромінювання ТЗ, зокрема у транспортних потоках, слід розглядати в комплексі з іншими шкідливостями як важливий чинник екологічної безпеки сучасних міст.

Бібліографія

8. Кара І.А. Екологічна небезпека від транспортних потоків у містах (на прикладі загазованості повітряного басейну). *Молодий вчений*, 2018. № 9(61). С. 436-441.

9. Титаренко В.Є., Нестеренко В.О. Дослідження екологічного стану транспортних перехресть за викидами автомобільних двигунів. *Вісник ЖДТУ*, 2016. №2 (77). С. 267-272.

10. Терентьєв О.М., Сергієнко М.І., Смоляр В.Г. Вплив промислового автомобільного транспорту на навколишнє середовище. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2020. № 3. С. 85-91.

11. Викиди від транспорту і як з ними боротися: інтерв'ю експерток Екодії для Федерації автопрому України. URL: https://ecoaction.org.ua/vykydy-vid-transportu.html.

12. Матейчик В.П., Цюман М.П., Смешек М. Особливості моніторингу і контролю показників екологічної безпеки транспортних засобів і транспортних потоків в умовах інтелектуальних систем. *Вісник Національного транспортного університету*, 2016. № 1(34). С. 255-266.

13. Fornalchyk Y., Hilevych V. Characteristics of motorization's impact on the urban population. *Transport Technologies*, 2023. Vol. 4, No 2. P. 69-77.

14. Бажинов О.В., Кравцов М.М. Електромагнітна безпека транспортних засобів. Монографія, 2021. 134 с.

15. Electromagnetic Fields and Cancer. National Cancer Institute. URL: https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/radiation/electromagnetic-fields-fact-sheet.

16. Kıvrak E.G., Yurt K.K., Kaplan A.A., et al. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system. *Journal of Microscopy and Ultrastructure*, 2017. No 14(10). P. 167-176.

ГІЛЕВИЧ Володимир Васильович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій, НУ «Львівська політехніка», e-mail: volodymyr.v.hilevych@lpnu.ua

ЯРЕМКО Юрій Миколайович – аспірант кафедри транспортних технологій, НУ «Львівська політехніка», e-mail: yurii.m.yaremko@lpnu.ua

УДК 656.13

М.Ю. Євчук, М.В. Бойків
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ДИНАМІКА РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ НА ДІЛЯНЦІ ДОРІГ З УРАХУВАННЯМ ОБЛАШТУВАННЯ ПЕРЕХРЕСТЬ

У роботі розглянуто особливості зміни динаміки транспортного потоку на ділянці дороги з урахуванням наявності перехресть та геометричних особливостей дороги. Для аналізу обрано ділянку автомобільної дороги міжнародного значення М-06 у межах кільцевої дороги м. Львова. Проведене дослідження спрямоване на оцінку швидкісного режиму транспортного потоку на підходах до перехресть різного типу та виду регулювання. Встановлено, що на формування нерівномірності швидкісного режиму суттєво впливають геометричні параметри дороги, зокрема наявність криволінійних елементів у плані та профілі, поздовжніх ухилів, а також значна частка вантажного транспорту у складі транспортного потоку.

***Ключові слова**: ділянка дороги, перехрестя, швидкість руху, транспортний потік, умови руху.*

The paper examines the features of traffic flow dynamics on a road section considering the presence of intersections and the geometric characteristics of the roadway. A section of the international highway M-06 within the ring road of the city of Lviv was selected for the analysis. The conducted study is aimed at assessing the speed regime of the traffic flow on approaches to intersections of different types and traffic control modes. It was established that the irregularity of the speed regime is significantly influenced by the geometric parameters of the roadway, in particular the presence of horizontal and vertical curves, longitudinal grades, as well as a high share of freight transport within the traffic flow.

***Key words**: road section, intersection, traffic speed, traffic flow, traffic conditions.*

Динаміка руху транспортного потоку на ділянках доріг безпосередньо залежить від організації та облаштування перехресть, які є основними місцями затримок, формування черг та конфліктних точок. Ефективність функціонування ділянки дороги визначається узгодженістю режиму роботи перехресть, які відрізняються між собою видом регулювання, конфігурацією та наявністю окремо виділених смуг для здійснення поворотних маневрів.

Зі зростанням інтенсивності руху транспортних засобів на автомобільних дорогах міжнародного значення, зокрема на ділянках кільцевої дороги м. Львова, суттєво підвищується навантаження на існуючі перехрестя та ділянки, що безпосередньо впливає на рівень безпеки дорожнього руху. Особливістю таких доріг є значна частка транзитного та вантажного транспорту, високі швидкості руху, нерівномірність транспортних потоків та наявність великої кількості потенційних конфліктних ситуацій у місцях примикання другорядних доріг. В таких умовах обмеженої можливості розширення існуючої дороги і транспортної інфраструктури особливої актуальності набуває застосування організаційних методів керування транспортними потоками.

Для розробки будь-яких заходів із підвищення безпечних режимів руху транспортних потоків потрібна необхідність глибокого розуміння чинників, що впливають на динаміку руху транспортного потоку, швидкісний режим та затримки транспортних засобів на ділянках автомобільних доріг. Це є важливою умовою для розроблення ефективних заходів організації дорожнього руху та управління транспортними системами. Значний вплив на формування режимів руху мають світлофорні цикли регульованих перехресть, конфліктність транспортних потоків, частка вантажного транспорту та умови маневрування транспортних засобів на окремих ділянках дороги [1].

Досліджувана ділянка автомобільної дороги міжнародного значення М-06 характеризується підвищеним рівнем потенційної небезпеки дорожнього руху, де відбувається велика кількість ДТП [2], що обумовлено значною інтенсивністю транспортних потоків, високими швидкостями руху та наявністю великої кількості конфліктних точок на перехрестях і примиканнях.

Найбільший вплив на безпеку руху мають конфлікти під час виконання лівоповоротних маневрів, небезпечні обгони, ускладнений виїзд із другорядних доріг, а також взаємодія транспортних потоків різних напрямків [3]. На окремих ділянках та в зоні регульованих перехресть спостерігається формування затримок і черг на головному напрямку доріг, особливо у пікові періоди руху, що додатково підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій. Також значна частка

транзитного та вантажного транспорту у поєднанні з особливостями геометрії дороги, примиканнями та зонами в'їзду-виїзду формує складні умови руху та підвищує ймовірність виникнення конфліктних ситуацій в межах досліджуваної ділянки дороги.

Саме тому дослідження зміни швидкісного режиму транспортного потоку на ділянці дороги із врахуванням всіх перехресть, примикань і їх видів регулювання є вкрай важливим для подальшого розвитку ефективних рішень у сфері ефективності функціонування доріг міжнародного значення.

У даній роботі для збору інформації про динаміку руху транспортного потоку взято ділянку кільцевої дороги м. Львів, по якій проходить дорога міжнародного значення М-06, зокрема від населеного пункту Пасіки–Зубрицькі до населеного пункту Гамаліївка. Довжина даної ділянки дороги складає 17850 м і сумарно на ній налічується 11 перехресть і примикань (рис. 1).

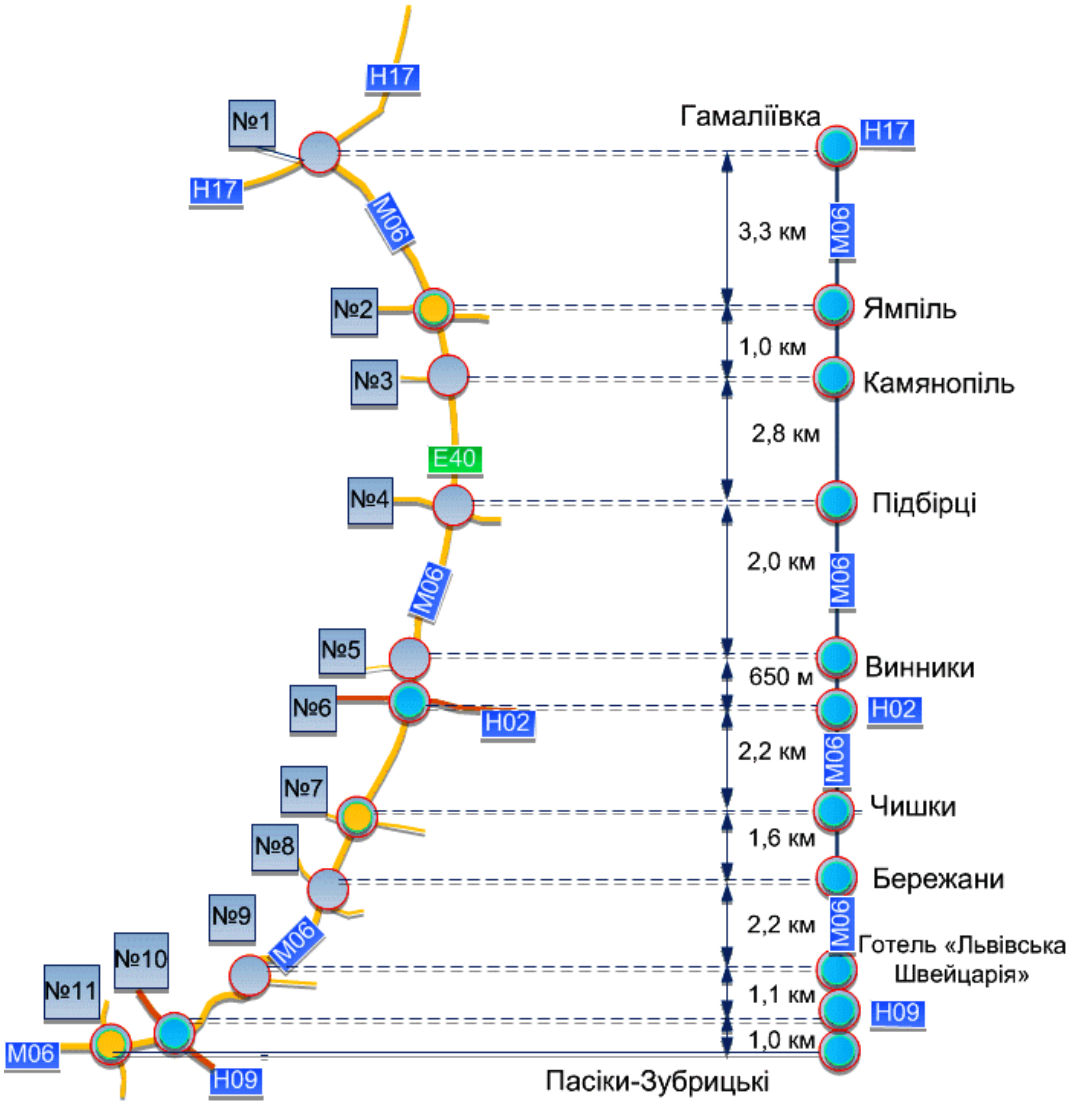


Рис. 1. Схема ділянки дороги міжнародного значення М-06

За допомогою натурних досліджень та безпосереднього обліку показників пройденого шляху автомобіля на ділянці кожного з відрізків доріг встановлено довжину між кожним перехрестям. За допомогою реєстрації режиму руху транспортного потоку встановлено зміну швидкості руху на ділянці дороги та підходах до перехресть. Відстань між перехрестями коливається від 650 м до 3300 м. На даній ділянці міжнародної дороги є дві розв'язки у різних рівнях, по три регульованих і нерегульованих перехрестя та 3 нерегульовані примикання. На всій протяжності ділянки існують криві у плані та профілі, а також на окремих відрізках спостерігаються значні поздовжні ухили дороги. Такі умови зумовлені, зокрема, наявністю мостів і шляхопроводів, особливостями рельєфу місцевості та конфігурацією траси автомобільної дороги. Зазначені геометричні параметри суттєво

впливають на режими руху транспортного потоку, зміну швидкості транспортних засобів, умови виконання маневрів та рівень безпеки дорожнього руху, особливо за наявності значної частки вантажного транспорту у потоці.

На основі аналізу зафіксованих даних руху транспортного потоку та статистичних методів проаналізовано закономірності зміни швидкості руху транспортних потоків між перехрестями. Це дозволяє визначити просторово-часові характеристики змішаного транспортного потоку та особливості формування швидкості руху транспортного потоку на ділянці доріг.

Загальні результати дослідження швидкості руху досліджуваній ділянці дороги міжнародного значення представлені на рис. 2. Побудовані гістограми дозволяють порівняти швидкості руху обох напрямків руху (прямого і зворотного), що дає змогу оцінити їхні характеристики на цьому відрізку дороги та визначити чинники, які впливають на коливання швидкісних характеристик.

У прямому напрямку рух здійснювався від перехрестя №1 (населений пункт Гамаліївка) до перехрестя №10 (населений пункт Пасіки-Зубрицькі). Для даного напрямку характерні ділянки зі значним поздовжнім ухилом на підйом, де організовано рух по двох смугах. У зворотному напрямку рух транспортних засобів здійснюється на спуск по одній смузі.

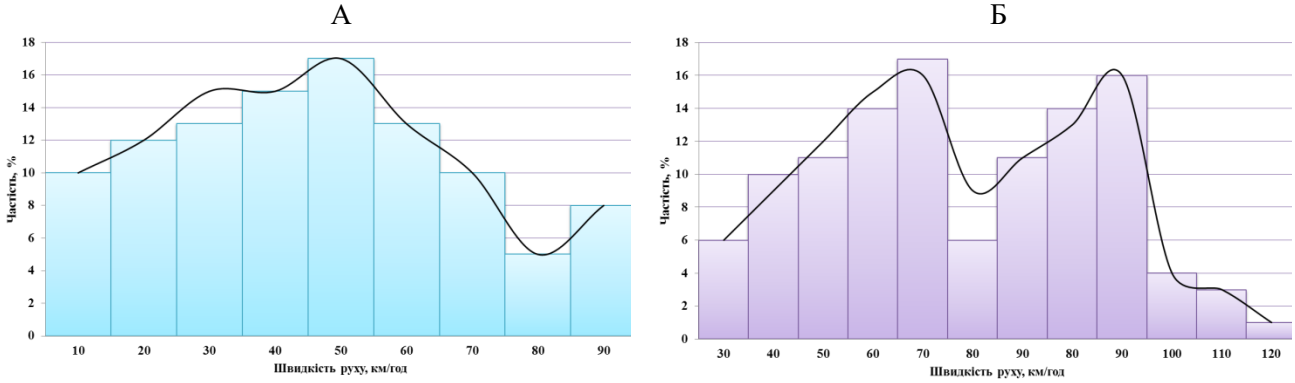


Рис. 2. Результати дослідження швидкостей руху на ділянці дороги міжнародного значення М-06: А – для прямого напрямку руху; Б – для зворотного напрямку руху

Отримані гістограми свідчать про нерівномірний характер руху транспортного потоку та наявність значних коливань швидкості руху транспортних засобів на досліджуваній ділянці дороги у прямому і зворотному напрямках руху. Розподіл швидкостей має нерівномірний характер, що вказує на формування декількох груп транспортних засобів із різними режимами руху. Нижчі швидкості характерні для транспортних засобів, які рухаються в умовах впливу перехресть, локальних затримок, маневрування та обмеженої пропускної здатності ділянки, тоді як вищі швидкості формуються на ділянках між перехрестями із безперервним режимом руху. Під час дослідження не бралась до уваги швидкість проїзду перехрестя, а тільки швидкість на підході до перехрестя, оскільки на ділянці дороги міжнародного значення М-06 існують регульовані перехрестя, які зупиняють весь транспортний потік. Таке спостерігається у випадку, коли транспортний засіб прибув до перехрестя на заборонний сигнал або в зоні перехрестя зупинився автомобіль, який очікує здійснення лівоповоротного маневру з головної дороги у зв'язку із інтенсивним потоком транспортних потоків зустрічного напрямку.

Додатковий вплив на нерівномірність швидкісного режиму на ділянці міжнародної дороги мають геометричні параметри дороги, наявність криволінійних елементів у плані та профілі, поздовжні ухили, а також значна частка вантажного транспорту у потоці. У результаті транспортний потік характеризується зміною щільності та швидкості руху на окремих ділянках дороги, що призводить до формування хвиль сповільнення, локальних прискорень та нестабільності режимів руху. Така неоднорідність транспортного потоку суттєво впливає на рівень безпеки дорожнього руху, умови маневрування транспортних засобів та ефективність функціонування автомобільної дороги міжнародного значення.

Згідно результатів дослідження для транспортних потоків, що рухаються на підйом, гістограма швидкостей матиме інший характер розподілу (рис. 2, А). У таких умовах спостерігається загальне зниження швидкості руху, особливо для вантажного транспорту, що обумовлено впливом поздовжнього ухилу на динамічні характеристики транспортних засобів. Основна частина транспортного потоку концентрується у зоні нижчих швидкостей, а розподіл набуває більш асиметричної форми зі зміщенням пікових значень у бік менших швидкостей руху.

Результати також вказують, що вплив особливостей ділянок руху, типу і виду перехресть був незначним за низького рівня завантаження дороги рухом, однак ставав суттєвим при рості транспортного потоку до пропускної здатності. Найбільше це проявлялось за наявності перехресть і ділянок із значним повздовжнім ухилом, а також відсутністю окремих смуг для поворотних маневрів у зоні перехрестя.

Динаміка руху транспортного потоку на досліджуваній ділянці дороги характеризується значною нерівномірністю швидкісних режимів та зміною параметрів руху залежно від дорожніх умов, типів перехресть і режимів регулювання. Додатковий вплив на формування транспортного потоку мають світлофорні цикли регульованих перехресть, примикання другорядних доріг, ділянки з криволінійними елементами в плані та профілі, а також наявність поздовжніх ухилів і зон злиття транспортних потоків. Значна частка вантажного та транзитного транспорту спричиняє виникнення локальних уповільнень, формування черг і зміну швидкості руху між окремими перехрестями і ділянками. У результаті на ділянці формується нестабільний транспортний потік із суттєвими коливаннями швидкості та щільності руху, що впливає на рівень безпеки дорожнього руху, затримки транспортних засобів та ефективність функціонування автомобільної дороги міжнародного значення.

Вивчення цих аспектів дозволить у подальшому розробити практичні рекомендації щодо оптимізації ділянок доріг з різним типом перехресть, видом регулювання та умовами руху, що сприятиме підвищенню ефективності використання транспортної інфраструктури, підвищенню безпеки руху та покращенню умов руху для всіх учасників.

1. Бойків Р. В. Аналіз граничних часових інтервалів на нерегульованому перехресті з інтенсивним лівоповоротним потоком // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2025. № 1(24). С. 112–120. DOI: https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1715.

2. Matviichuk, T. (2026). Quantitative Characteristics of Road Traffic Accidents on the “Yampil M-06” Road Section. Social Development and Security, 16(1), 264-288. https://doi.org/10.33445/sds.2025.16.1.20.

3. Бойків М. В., Євчук М. Ю. Оцінка небезпеки на перехресті зі всіма дозволеними маневрами руху на ділянці автодороги М-06 (532–533 км). Комунальне господарство міст. Серія: Інформаційні технології та інженерія. 2025. Т. 6 (194). С. 412–419. DOI: https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-412-419.

ЄВЧУК Мирослав Юрійович – аспірант кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: myroslav.yu.yevchuk@lpnu.ua.
БОЙКІВ Микола Васильович – к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: v. mykola.v.boikiv@lpnu.ua.

УДК 656.13

М.Ю. Євчук, Р.В. Бойків
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЛІВОПОВОРОТНОГО РУХУ НА СЕРЕДНЮ ДОВЖИНУ ЧЕРГИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ПІДХОДІ ДО ПЕРЕХРЕСТЯ

У роботі досліджено вплив частки лівоповоротного руху на утворення черг транспортних засобів на підходах до регульованого перехрестя. На основі планувальних характеристик перехрестя та структури транспортного потоку визначено особливості організації руху типового міського перехрестя. Для оцінки закономірностей зміни середньої довжини черги використано метод імітаційного моделювання у середовищі PTV Vissim. Встановлено, що формування середніх черг транспортних засобів на підходах до перехрестя має нелінійний характер та суттєво залежить від інтенсивності руху і частки лівоповоротних потоків. Отримані результати підтверджують необхідність удосконалення організації дорожнього руху та оптимізації фаз світлофорного регулювання на міських перехрестях.

***Ключові слова**: регульоване перехрестя, інтенсивність руху, транспортний потік, довжина черги.*

The study examines the influence of the proportion of left-turn traffic on the queue formation process at approaches to a signalized intersection. An analysis of the geometric parameters of the intersection and traffic flow structure was conducted, and the operational characteristics of traffic organization at a typical urban intersection were determined. To assess the regularities of changes in the average vehicle queue length, microscopic traffic simulation modeling was performed using the PTV Vissim software environment. The results indicate that the formation of average vehicle queues at intersection approaches is nonlinear in nature and significantly depends on traffic demand and the share of left-turning traffic flows within the traffic stream. An increase in the proportion of left-turn maneuvers leads to a substantial deterioration in traffic operating conditions and an increase in queue length under high traffic volumes. The obtained results confirm the necessity of improving traffic control strategies and optimizing signal phasing parameters at urban signalized intersections.

***Key words:** signalized intersection, traffic intensity, traffic flow, queue length.*

В умовах сучасних міст спостерігається постійне зростання рівня автомобілізації, інтенсивності транспортних потоків та навантаження на вулично-дорожню мережу (ВДМ). Розвиток транспортної інфраструктури є обмеженим через складність реконструкції існуючих магістралей, фінансові витрати та просторові обмеження міського середовища. У результаті формується дисбаланс між пропускною здатністю підходів до перехресть та фактичною інтенсивністю руху транспортних засобів (ТЗ). Особливо гостро ця проблема проявляється на регульованих перехрестях із високою часткою поворотних маневрів ТЗ.

Одним із факторів, що суттєво впливає на ефективність функціонування перехресть, є лівоповоротний рух транспортних засобів. Зростання частки лівоповоротних потоків призводить до збільшення транспортних затримок, погіршення умов руху та формування черг на підходах до перехрестя. У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу лівоповоротного руху на довжину середніх черг на підходах до перехрестя з метою підвищення ефективності організації дорожнього руху та пропускної здатності перехресть.

У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється оцінці ефективності функціонування міських перехресть, транспортних затримок та процесів формування черг ТЗ. Встановлено, що критеріями ефективності роботи перехресть є рівень транспортних затримок, ступінь завантаження підходів та параметри черг транспортних засобів [1]. Особливий вплив на ці показники мають лівоповоротні транспортні потоки, які здатні суттєво знижувати пропускну здатність перехрестя.

У наукових працях зазначається, що процес прибуття ТЗ до перехрестя є випадковим та залежить від багатьох факторів, у тому числі структури транспортного потоку, режимів світлофорного регулювання та інтенсивності поворотних ТЗ [2]. Для оцінки закономірностей формування черг та визначення впливу параметрів транспортного потоку на умови руху доцільним є використання методів імітаційного транспортного моделювання [3].

Метою даного дослідження є виявлення закономірностей впливу частки лівоповоротних транспортних потоків на середню довжину черги ТЗ на підходах до перехресть за різної інтенсивності руху з використанням сучасного програмного середовища транспортного моделювання.

Перехрестя такої конфігурації обрано з огляду на те, що воно є типовим для міських умов руху, оскільки у містах магістральні вулиці регульованого руху часто взаємодіють із вулицями місцевого значення, які характеризуються меншою пропускною здатністю та значною кількістю поворотних ТЗ. Перехрестя подібної конфігурації є характерними для міської ВДМ та суттєво впливають на ефективність організації дорожнього руху, рівень транспортних затримок і процес формування черг на підходах до перехрестя.

Проведено аналіз планувальних характеристик досліджуваного регульованого перехрестя та визначено параметри смуг руху на кожному підході. Схему дозволених напрямків руху транспортних засобів на перехресті наводимо на рис. 1.

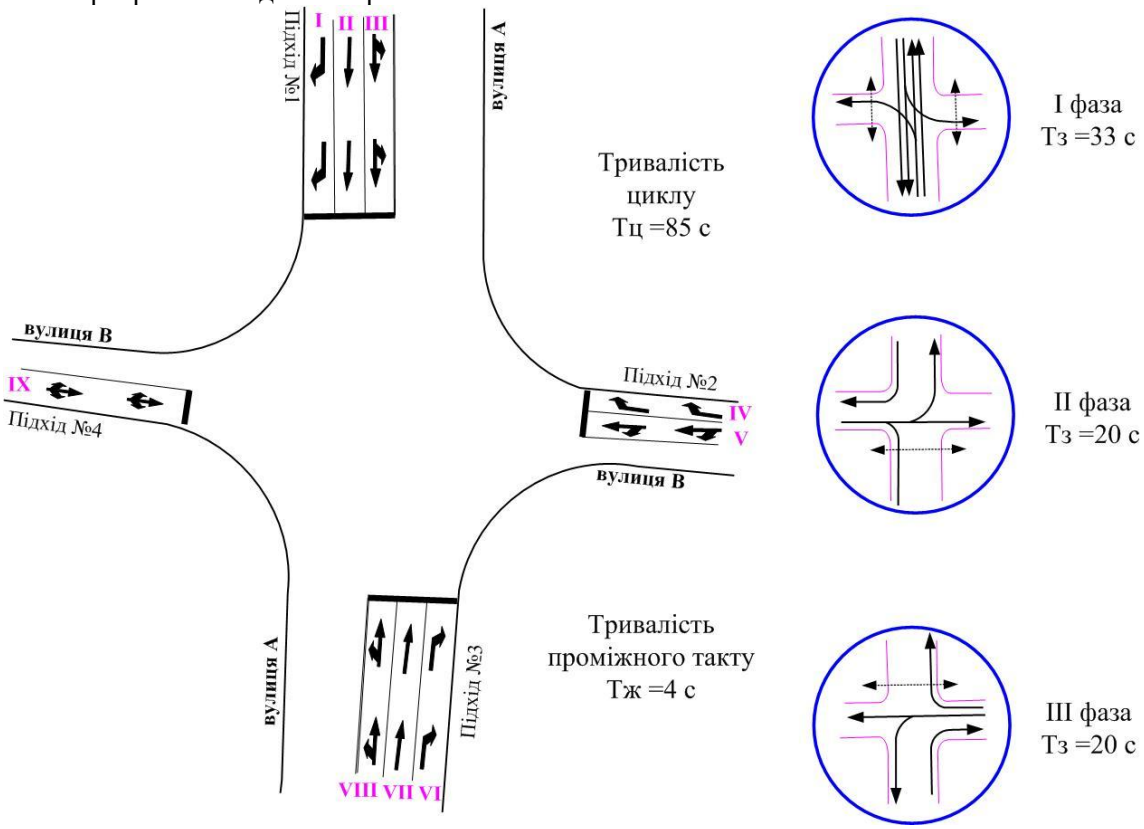
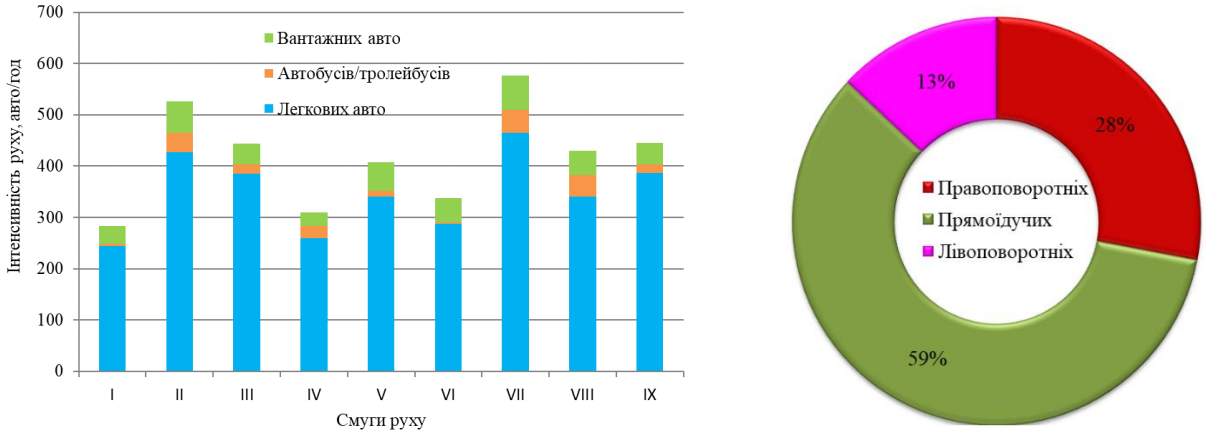


Рис. 1. Схема організації руху транспортних потоків на регульованому перехресті

Головною дорогою на перехресті є магістральна вулиця регульованого руху (вулиця А), яка формує підходи №1 та №3. Головний напрямок має три смуги руху на підходах до перехрестя із шириною смуги руху 3,75 м та часткову каналізацію руху. На підході №1 передбачено окремі смуги для лівоповоротного, прямого та суміщеного руху, а на підході №3 організовано розподіл потоків із виділенням смуг для прямого та правоповоротного руху. Рух на перехресті вулиць організовано у три фази.

Другорядні напрямки (вулиця В), які утворюють підходи №2 та №4, мають ширину смуги руху 3,5 м. На підході №2 організовано дві смуги руху, де крайня права смуга призначена для правоповоротного руху ТЗ, а інша смуга забезпечує суміщений рух прямо та ліворуч. Підхід №4 характеризується наявністю однієї смуги руху, з якої дозволено виконання всіх напрямків маневрування. Така схема організації руху створює умови для виникнення конфліктних точок між транспортними потоками, особливо при зростанні частки лівоповоротних маневрів, що робить дане перехрестя доцільним для дослідження середньої довжини черги транспортних засобів.

Під час аналізу інтенсивності ТП на підходах до перехрестя визначено його склад на кожній смузі руху, який графічно представлено на рис. 2.



А Б

Рис. 2. Параметри транспортного потоку на регульованому перехресті: А) інтенсивність руху; Б) частка поворотних ТЗ

Аналіз інтенсивності руху транспортного потоку за смугами руху показав, що найбільше транспортне навантаження спостерігається на смугах II та VII, де сумарна інтенсивність руху перевищує 500 авт./год, тоді як найменші значення характерні для смуг I та IV. У структурі транспортного потоку переважають легкові автомобілі, частка яких формує основний обсяг руху на всіх смугах. Частка автобусів і тролейбусів є незначною та коливається в межах окремих підходів, тоді як вантажні транспортні засоби становлять помітну складову потоку, особливо на смугах із високою інтенсивністю руху. Аналіз структури напрямків руху показав, що найбільшу частку становлять прямоїдучі ТЗ – 59 %, що характерно для магістральних напрямків руху. Частка правоповоротних ТЗ складає 28 %, тоді як лівоповоротні потоки становлять 13 % від загального обсягу руху.

Модель перехрестя створена у середовищі PTV Vissim шляхом завантаження та калібрування супутникової карти досліджуваної ділянки. На її основі формуються фрагменти вулиць і з'єднувальні відрізки відповідно до дозволених напрямків руху за смугами. У моделі задаються пріоритети проїзду в конфліктних точках, а для регульованого перехрестя розміщуються світлофорні об'єкти із відповідними параметрами фазового регулювання відповідно рис. 3. Також встановлюються лічильники для визначення транспортних затримок ТЗ через перехрестя.

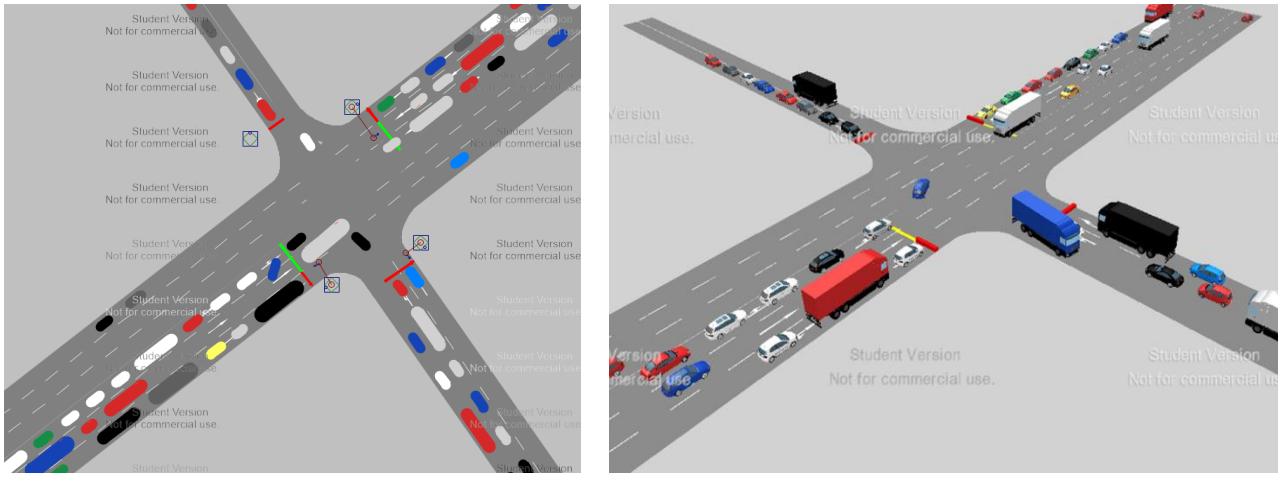


Рис. 3. Модель перехрестя міських вулиць у середовищі PTV Vissim

У базовій моделі досліджуваного перехрестя транспортний потік формувався з легкових автомобілів, вантажних ТЗ та автобусів (тролейбусів). Під час моделювання прийнято, що частка легкових транспортних засобів у складі потоку становить 85 %, що відповідає характерним умовам руху для магістральних вулиць міста. Частка поворотних потоків на головному напрямку дороги

складала 30 %, з яких 5 % припадало на правоповоротний рух, а частка лівоповоротних транспортних засобів змінювалась у межах 0–25 %. Для спрощення аналізу впливу структури транспортного потоку на середні черги на перехресті прийнято, що поздовжні ухили на підходах до перехрестя відсутні.

У всіх варіантах імітаційного моделювання тривалість світлофорного циклу становила 85 с, що відповідає результатам натурних досліджень роботи перехрестя. Тривалість дозволяючого сигналу для головного напрямку дороги складала 33 с. Під час моделювання інтенсивність транспортного потоку на смузі руху змінювалась в межах від 400 до 1000 авт./год, що дозволило оцінити закономірності зміни довжини черги за різного рівня завантаження підходів. Оскільки на другорядних напрямках перехрестя за існуючого режиму регулювання не спостерігалось заторових ситуацій, основна увага під час дослідження приділялась визначенню середньої довжини черги транспортних засобів на підходах №1 та №3 головного напрямку (вулиця А).

Результати моделювання довжини черг на підходах до досліджуваного перехрестя за зміни інтенсивностей руху ТП представлено на рис. 4.

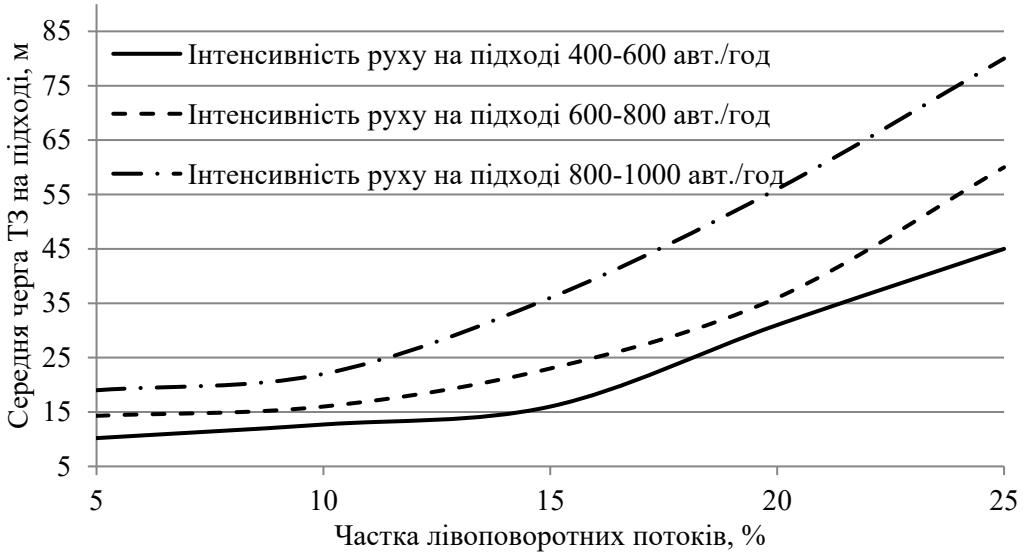


Рис. 4. Залежність середньої довжини черги ТЗ на підході до перехрестя від частки лівоповоротних потоків за різної інтенсивності руху

Як видно з рис. 4, середня довжина черги транспортних засобів на підходах до перехрестя суттєво залежить від частки лівоповоротних транспортних потоків та інтенсивності руху на підході. За всіх досліджуваних рівнів інтенсивності спостерігається тенденція до зростання довжини черги зі збільшенням частки лівоповоротного руху. Проте характер цієї зміни є нерівномірним та значною мірою залежить від рівня завантаження підходу до перехрестя.

За інтенсивності руху 400–600 авт./год ріст частки лівоповоротних потоків до 15 % практично не призводить до суттєвого зростання середньої довжини черги, оскільки пропускна здатність підходу залишається достатньою для ефективного пропуску ТЗ. У цьому випадку середня довжина черги змінюється плавно – від приблизно 10 до 15 м. Однак при подальшому зростанні частки лівоповоротних транспортних засобів понад 15–18 % спостерігається більш інтенсивне збільшення довжини черги, яка за частки 25 % досягає близько 45-50 м.

Для інтенсивності руху 600–800 авт./год вплив лівоповоротного руху є більш відчутним. Уже за частки понад 15 % спостерігається стабільне зростання середньої довжини черги, а при 25 % лівоповоротних потоків її значення перевищує 55–60 м. Найбільш критичні умови руху характерні для інтенсивності 800–1000 авт./год, де середня довжина черги починає різко зростати вже за частки лівоповоротних потоків понад 10 %. У цьому випадку формуються значні транспортні затримки, а середня довжина черги при 25 % лівоповоротного руху досягає понад 80 м.

Отримані результати свідчать про суттєвий вплив лівоповоротних транспортних потоків на середню чергу на підходах до перехрестя. За високих рівнів інтенсивності руху навіть незначне збільшення частки лівоповоротних маневрів призводить до різкого погіршення умов руху, що вказує на необхідність удосконалення організації дорожнього руху та застосування спеціалізації смуг або окремих фаз регулювання для лівоповоротного руху.

Таким чином, відповідно результатів дослідження, ефективність функціонування підходів до перехресть значною мірою залежить від структури транспортного потоку, зокрема від частки лівоповоротних ТЗ у загальному потоці руху. Зростання частки лівоповоротних потоків призводить до суттєвого збільшення середньої довжини черги транспортних засобів, особливо за високої інтенсивності руху на підходах до перехрестя. При цьому процес формування черг має нелінійний характер, а за інтенсивності руху понад 800 авт./год спостерігається різке погіршення умов руху та збільшення рівня транспортних затримок.

1. Форнальчик Є.Ю., Ройко Ю.Я., Гілевич В.В. Розвиток науково-прикладних основ управління транспортними потоками: монографія / за заг. ред. Є.Ю. Форнальчика. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2022. 180 с.

2. Бойків М.В., Жеребецький Н.В. Дослідження умов руху на перехресті з інтенсивним транспортним потоком на головному напрямку / М.В. Бойків, Н.В. Жеребецький // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». 2024 р. Том 35 (74) № 6, С. 251-258.

3. Postranskyy T., Boikiv M., Afonin M., Rogalskyi R. Selection of a traffic management scheme at an intersection taking into consideration the traffic flow composition // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 1, No. 3 (103). P. 39–46.

ЄВЧУК Мирослав Юрійович – аспірант кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: myroslav.yu.yevchuk@lpnu.ua.
БОЙКІВ Роман Васильович – асистент кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: roman.v.boikiv@lpnu.ua.

Myroslav Yevchuk – PhD student of the Department of Transport Technologies at Lviv Polytechnic National University, e-mail: myroslav.yu.yevchuk@lpnu.ua.
Roman Boikiv – Assistant of the Department of Transport Technologies Lviv Polytechnic National University, e-mail: roman.v.boikiv@lpnu.ua.

УДК 656.13, 612.821

Н.О. Тюрдьо, Т.М. Пострaнський
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

DRIVER REACTION TIME AS A FACTOR AFFECTING ROAD SAFETY

У роботі розглянуто питання часу реакції водія та його складових. Він є одним із ключових психомоторних показників, що безпосередньо впливає на безпеку дорожнього руху. Проаналізовано структуру та компоненти часу реакції, виявлено чинники, що зумовлюють його варіативність. До найпоширеніших із них можна віднести дорожні умови, рівень уваги, втому, використання мобільних пристроїв тощо. Встановлено, що значні розбіжності у нормативних показниках часу реакції ускладнюють проведення судових експертиз та можуть впливати на визначення ступеня вини водія. При цьому встановлено, що на час реакції водія значною мірою впливає його функціональний стан.

***Ключові слова**: час реакції, водій, транспортний засіб, безпека дорожнього руху, функціональний стан, умови руху.*

This thesis examines the issue of driver reaction time and its components. It is one of the key psychomotor indicators that directly affects road safety. The structure and components of reaction time are analyzed, and factors contributing to its variability are identified. The most common of these include road conditions, level of attention, fatigue, use of mobile devices, etc. It has been established that significant discrepancies in standard reaction time indicators complicate the conduct of forensic examinations and may influence the determination of the driver's degree of fault. It has been established that a driver's reaction time is significantly influenced by their functional state.

***Key words**: reaction time, driver, vehicle, road safety, functional state, traffic conditions.*

Driver reaction time is one of the key indicators of professional driving performance. Information processing is not passive; rather, it involves active decision-making to find the optimal response. This is especially evident under actual road traffic conditions. At the same time, standard reaction time values vary by country and driving environment. For example, in Switzerland, the accepted reaction time for urban traffic conditions is 0.75 s, whereas for rural traffic conditions – this indicator reaches 2.5 s. In Ukraine, highly trained drivers demonstrate a reaction time of up to 1.16 s during emergency braking maneuvers [1, 2]. Furthermore, reaction time is significantly influenced by the driver's level of attentional focus. In urban traffic conditions, the driver's attention is generally more engaged and sustained. Consequently, reaction time tends to be shorter. According to the literature [3], in a state of readiness for braking, this indicator ranges from 0.6 to 0.8 s, whereas under distracted attention, it increases to 1.1–1.7 s.

As reported in literature [3, 4], under rural driving conditions – particularly on extended straight highway sections – driver reaction time tends to increase. For instance, while driving on motorways, driver reaction time may reach 3.5–4 s with a reliability level of 95%. This phenomenon can be attributed to the driver's adaptation to stable and relatively favorable road conditions, which gradually reduces vigilance and readiness for rapid response. Should an obstacle suddenly appear or road conditions deteriorate, the driver experiences additional psychological-emotional stress, potentially leading to a marked increase in reaction time.

In the forensic and road safety literature, driver reaction time is considered a key parameter in expert analysis. However, scientific and applied studies demonstrate considerable variability in these indicators. This variability, in turn, gives rise to significant discrepancies in expert conclusions. From a practical standpoint, this issue is of considerable importance, as the selection of specific reaction time values can directly affect the outcomes of expert analyses. Consequently, this may influence the determination of the driver's degree of fault in a road traffic accident. The root causes of such discrepancies are primarily due to differences in methodological approaches in the organization of research [4]:

9. the tools that were used;
10. the conditions under which the experiments were conducted;
11. the conceptual foundations of the testing;
12. the characteristics of the test subjects;
13. the methods used to interpret and summarize the data obtained.

Driver reaction time is one of the key parameters that determine braking effectiveness and safety in emergency situations. This term refers to the time interval between the moment a hazard appears and the

driver's first active response. Such responses may include both braking and a change in the vehicle's trajectory. This indicator consists of three main sequential components [4, 5]:

perception time, which covers the period from the appearance of a hazard to its acknowledgement;

basic psychological reaction time, which includes situation analysis, decision-making, and the transmission of a nerve impulse;

motor reaction time, which corresponds to the physical performance of an action, such as, for example, moving the foot from the accelerator pedal to the brake pedal.

It should be noted that the first and second components represent the mental aspect of the reaction, while the third component characterizes its motor phase. Therefore, the total psychomotor reaction time is defined as the sum of all aforementioned components [4, 5].

A driver's reaction time directly affects the safety of all road users. According to statistics, most traffic accidents are caused by the actions or inaction of drivers. This clearly underscores the practical significance of this factor. At the same time, it depends on driving experience, psychophysiological state, fatigue level, and the influence of stress factors.

While driving a vehicle, drivers are exposed to various distractions. These distractions reduce concentration and impair control over the road situation. Any activity not directly related to driving increases reaction time and raises the risk of a traffic accident. The most common sources of distraction are [4, 6]:

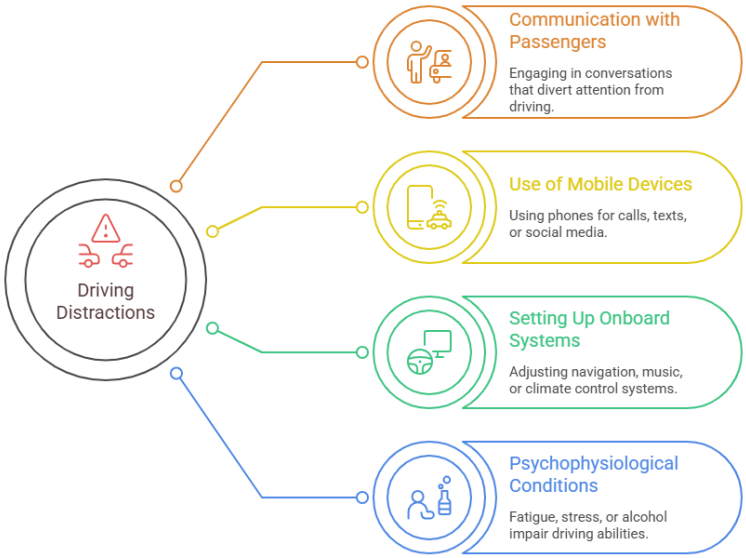


Fig. 1. The most common sources of a driver's distraction [4, 6]

Distractions from paying attention to the road lead to delayed reactions and an increase in the overall reaction time to changes in traffic conditions.

The study [7] notes that a driver's use of a mobile device increases their reaction time, particularly by +0.33 seconds when traffic lights change, +0.29 seconds when a pedestrian crosses the road, and +0.63 seconds when an obstacle falls onto the road, etc.

Among other factors influencing a driver's reaction time, the authors of [5] identified a human's functional state. In particular, the research results indicate the influence of both the activity index of the body's regulatory systems and the drivers' gender and age.

A range of other functional and situational factors also significantly affect a driver's reaction time. The most notable of which include a decrease in concentration due to:

the use of a mobile device [8, 9];

listening to audio content [10], which naturally leads to a longer reaction latency period;

increased cognitive load and emotional stress [11];

deteriorating weather conditions [12];

deterioration of the operator's physiological state, alcohol intoxication, etc. [2, 13].

In summary, driver reaction time is a critical psychomotor parameter that directly determines the effectiveness of driver responses in emergency situations and, consequently, the safety of all road users. The analysis presented demonstrates that this indicator is highly variable and depends on a range of factors – including driving environment, attentional focus, fatigue, cognitive load, mobile device use, etc.

Therefore, driver reaction time should be regarded not merely as a physiological characteristic, but as a fundamental safety parameter requiring careful consideration in traffic regulation, driver training, and road accident investigation.

- Davidich Y., Kush Y., Ponkratov D. Change of car driver`s stress index during different periods of the day in urban traffic conditions. Transport technologies. 2020. №1/2. С. 23–32. DOI: 10.23939/tt2020.02.023
- Гюлєв Н.У. Про вплив часу реакції водія на ймовірність скоєння дорожньо-транспортної пригоди. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2017. Т. 4(234). С. 90–93.
- Жук М. М., Ковалишин В. В. Методика досліджень впливу психофізіологічних особливостей водія на час його реакції у реальних умовах. Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст». 2012. №103. С. 479–484.
- Drivers' reaction time research in the conditions in the real traffic / P. Droździel та ін. Open Engineering. 2020. Т. 1(10). С. 35–47. DOI: 10.1515/eng-2020-0004
- Research on drivers' reaction time in different conditions / M. Zhuk та ін. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 2(3-86). С. 24–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.98103
- Гюлєв Н. У. Надійність діяльності водія в системі «людина – техніка – середовище» в умовах заторів руху на міських дорогах : дис. … д-ра техн. наук : 05.01.04 / ХНУМГ. Харків, 2018. 424 с.
- Reza A, Wierciński J, Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego. Kraków. Instytut Ekspertyz Sądowych; 2006
- Haque M., Washington S. A parametric duration model of the reaction times of drivers distracted by mobile phone conversations. Accident Analysis & Prevention. 2014. Т. 62. С. 42–53. DOI: 10.1016/j.aap.2013.09.010
- The analysis of drivers' reaction time using cell phone in the case of vehicle stabilization task / V. Žuraulis та ін. International journal of occupational medicine and environmental health. 2018. Т. 31. С. 1–16. DOI: 10.13075/ijomeh.1896.01264
- Berg W., Dessecker D. Evidence of unconscious motor adaptation to cognitive and auditory distraction. Adaptive behavior. 2013. Т. 21. С. 346–355
- Makishita H., Matsunaga K. Differences of drivers' reaction times according to age and mental workload. Accident Analysis & Prevention. 2008. Т. 40(2). С. 567–575. DOI: 10.1016/j.aap.2007.08.012
- Dozza M. What factors influence drivers' response time for evasive maneuvers in real traffic?. Accident Analysis & Prevention. 2013. №58. С. 299–308. DOI: 10.1016/j.aap.2012.06.003
- Pawar N., Velaga N. Modelling the influence of time pressure on reaction time of drivers. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour. 2020. №72. С. 1–22. DOI: 10.1016/j.trf.2020.04.017

ТЮРДЬО Назар Олегович – аспірант кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: nazar.o.tiurdo@lpnu.ua;
ПОСТРАНСЬКИЙ Тарас Миколайович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: taras.m.postranskyi@lpnu.ua

УДК 656.078

J. RAGULSKIENĖ[1], A. PAULIUKAS[2], P. PAŠKEVIČIUS[3], R. MASKELIŪNAS[4], V. MASKELIŪNAS[4], I. MUROVANYI[5], L. RAGULSKIS[6]
[1]*Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania*
[2]*Vytautas Magnus University, Akademija, Kaunas District, Lithuania*
[3]*Company "Vaivora", Kaunas, Lithuania*
[4]*Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*
[5]*Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine*
[6]*Vytautas Magnus University, Kaunas, Lithuania*

INVESTIGATION OF VIBRATIONS OF PLATE TYPE ELEMENTS OF AGRICULTURAL TRANSPORTATION DEVICES

In the process of operation of agricultural transportation devices it is important to avoid resonance vibrations of their cases. In this paper investigation of vibrations of plane usually upper and lower surfaces which are of plate type of those devices is performed. By using powder material on the horizontal surfaces of those devices it is possible to obtain various distributions of powder type material and from them one can determine the shape of the excited eigenmode of vibrations. Experimental investigations are performed and their results are presented.
Key words: *transportation device, case of the device, plate type element, resonant vibrations, eigenmodes of vibrations.*

1. Introduction

In the process of operation of agricultural transportation devices it is important to avoid resonance vibrations of their cases. In this paper investigation of vibrations of plane usually upper and lower surfaces which are of plate type of those devices is performed.

By using powder material on the horizontal surfaces of those devices it is possible to obtain various distributions of powder type material and from them one can determine the shape of the excited eigenmode of vibrations. Experimental investigations are performed and their results are presented.

Investigations are based on the material related with analysis of dynamics and vibrations which is presented in [1] – [8].

2. Investigation of vibrations of plate type elements of agricultural transportation devices

A square plate excited in the center is investigated. Powder material is located on the surface of the plate. In the process of vibrations from the image formed by the powder material on the surface of the plate one can determine which eigenmode of vibrations is being excited.

Typical experimental image is presented in Fig. 1.

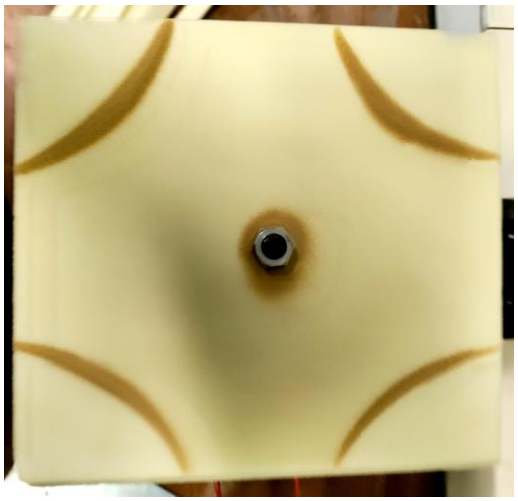


Fig. 1. Experimental investigation of vibrations with application of powder type material

Eigenmodes of bending vibrations of a square plate fastened at the center point are investigated. Results are presented by images with intensity assumed as:

$$I = \cos^2\left(2\pi \frac{w}{\lambda}\right), \quad (1)$$

where w is the transverse displacement of the plate and λ is the constant which determines the density of intensity fringes.

The first eigenmode is represented in Fig. 2.



Fig. 2. The first eigenmode

The second eigenmode is represented in Fig. 3.



Fig. 3. The second eigenmode

The third eigenmode is represented in Fig. 4.



Fig. 4. The third eigenmode

The fourth eigenmode is represented in Fig. 5.

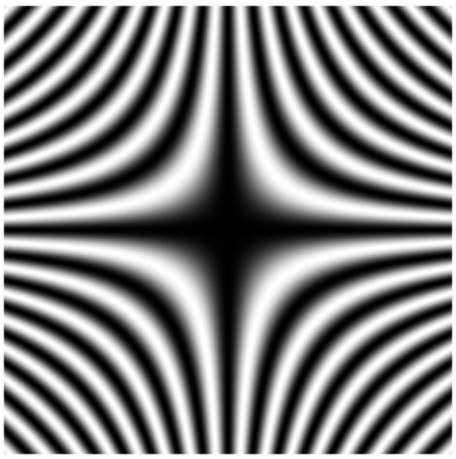


Fig. 5. The fourth eigenmode

The fifth eigenmode is represented in Fig. 6.

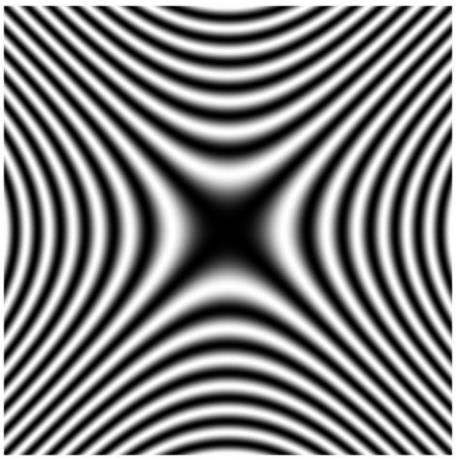


Fig. 6. The fifth eigenmode

The sixth eigenmode is represented in Fig. 7.

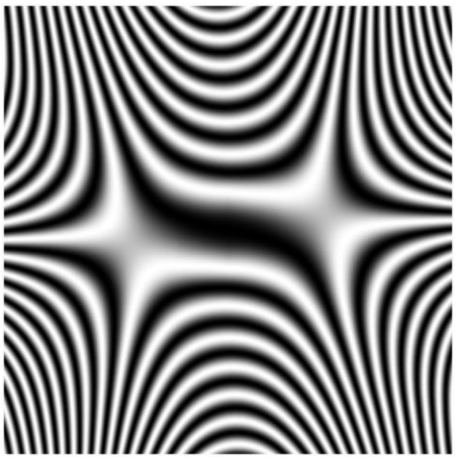


Fig. 7. The sixth eigenmode

The seventh eigenmode is represented in Fig. 8.

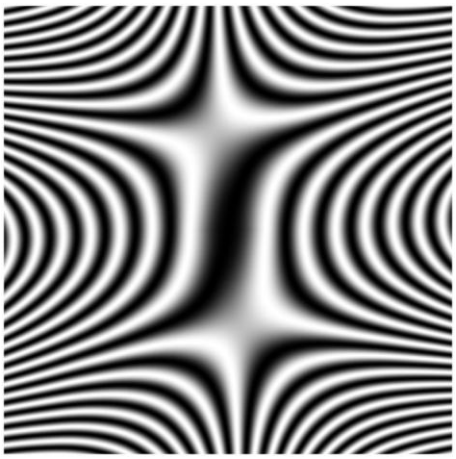


Fig. 8. The seventh eigenmode

The eighth eigenmode is represented in Fig. 9.



Fig. 9. The eighth eigenmode

The ninth eigenmode is represented in Fig. 10.

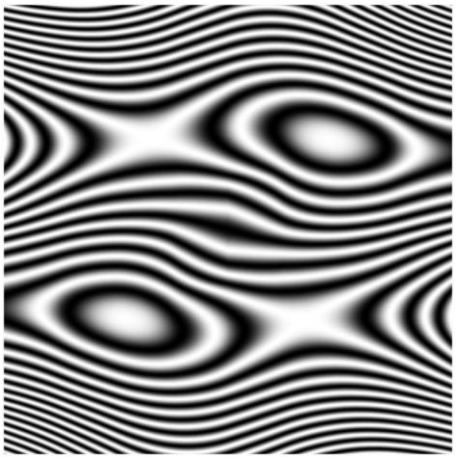


Fig. 10. The ninth eigenmode

The first and the second eigenmodes correspond to the same eigenfrequency. The sixth and the seventh eigenmodes also correspond to the same frequency. This is because of the symmetric qualities of the plate type structure and linear combinations of multiple eigenmodes are also eigenmodes, that's why they produce not necessarily symmetrically looking results.

From the presented results it is possible to determine that the fourth eigenmode was observed in the Figure 1. The advantages of application of powder type materials for investigation of bending vibrations of horizontal plate type structures are simplicity and easy applicability of the method.

3. Conclusions

By using powder material on the horizontal surfaces of agricultural transportation devices it is possible to obtain various distributions of powder type material on the investigated surfaces. A square plate excited in the center is investigated. Powder material is located on the surface of the plate. In the process of vibrations from the image formed by the powder material on the surface of the plate one can determine which eigenmode of vibrations is being excited.

Eigenmodes of bending vibrations of a square plate fastened at the center point are investigated. The first and the second eigenmodes correspond to the same eigenfrequency. The sixth and the seventh eigenmodes also correspond to the same frequency. From the presented results it is possible to determine which eigenmode was observed in the experimental image using powder type material.

The advantages of application of powder type materials for investigation of bending vibrations of horizontal plate type structures are simplicity and easy applicability of the method.

References

19 Ragulskis, K., Pauliukas, A., Paškevičius, P., Spruogis, B., Matuliauskas, A., Mištinas, V., Murovanyi, I. and Ragulskis, L. Investigation of dynamics of the pipe robot with vibration drive based on centrifugal forces. Agricultural Engineering, Vol. 56, 2024, p. 32-37.

20 Ragulskis, K., Pauliukas, A., Maiak, M., Paškevičius, P., Maskeliūnas, R. and Ragulskis, L. Investigation of dynamics of a pipe robot with self-stopping mechanism. Advances in Mechanical Engineering and Transport, Vol. 1 (20), 2023, p. 13-19.

21 Ragulskis, K., Pauliukas, A., Paškevičius, P., Maskeliūnas, R. and Ragulskis, L. Two-sided soft impacts. Materials and Technologies in Engineering (MTE-2023): Engineering, Materials, Technologies, Transport: Collection of Scientific Reports of the International Conference, Lutsk, Ukraine, May 16-18, 2023, O. Povstyanoy, O. Zaleta, B. Valetskyi, Lutsk, 2023, p. 44-46.

22 Ragulskis, K., Pauliukas, A., Paškevičius, P., Maskeliūnas, R. and Ragulskis, L. Pipe robot with self-stopping mechanism. Materials and Technologies in Engineering (MTE-2023): Engineering, Materials, Technologies, Transport: Collection of Scientific Reports of the International Conference, Lutsk, Ukraine, May 16-18, 2023, O. Povstyanoy, O. Zaleta, B. Valetskyi, Lutsk, 2023, p. 41-43.

23 Ragulskis, K., Pauliukas, A., Paškevičius, P., Maskeliūnas, R., Murovanyi, I. and Ragulskis, L. Investigation of manipulator with vibrational drive for transportation in agricultural machines. Agricultural Engineering, Vol. 55, 2023, p. 1-10.

24 Ragulskis, K., Spruogis, B., Pauliukas, A., Paškevičius, P., Matuliauskas, A., Mištinas, V., Murovanyi, I. and Ragulskis, L. Investigation of dynamics of manipulators and robots, the motion of which is excited by an external variable force through mutual impacts of their separate elements. Agricultural Engineering, Vol. 53, 2021, p. 55-62.

25 Ragulskienė, J., Pauliukas, A., Paškevičius, P., Maskeliūnas, R., Maskeliūnas, V., Murovanyi, I. and Ragulskis, L. Vibrations of circular element of agricultural machines. Materials of the International Scientific and Practical Conference “Digital Transformation: Challenges and Strategies”, Lutsk, Ukraine, February 25, 2025, Lutsk National Technical University, 2025, p. 105-107.

26 Ragulskienė, J., Pauliukas, A., Paškevičius, P., Maskeliūnas, R., Maskeliūnas, V., Murovanyi, I. and Ragulskis, L. Investigation of vibrations of ideally lubricated circular element of agricultural machines. Agricultural Engineering, Vol. 57, 2025, p. 17-21.

Jūratė RAGULSKIENĖ – Doctor, Associate Professor, Department of Mathematical Modeling, Kaunas University of Technology, e-mail: jurate.ragulskiene@ktu.lt

Arvydas PAULIUKAS – Doctor, Lecturer, Department of Mechanical, Energy and Biotechnology Engineering, Vytautas Magnus University, e-mail: arvydas.pauliukas@gmail.com

Petras PAŠKEVIČIUS – Doctor, Company “Vaivora”, e-mail: info@vaivorairko.lt

Rimas MASKELIŪNAS – Habilitated Doctor, Professor, Department of Printing Machines, Vilnius Gediminas Technical University, e-mail: rimas.maskeliunas@gmail.com

Vytautas MASKELIŪNAS – Bachelor, Graduate Student, Vilnius Gediminas Technical University, e-mail: vytautas.maskeliunas@stud.vgtu.lt

Igor MUROVANYI – Doctor, Associate Professor, Dean of the Faculty of Transport and Mechanical

Engineering, Department of Automobile and Transport Technology, Lutsk National Technical University, e-mail: igor_lntu@ukr.net
Liutauras RAGULSKIS – Doctor, Junior research associate, Department of Systems Analysis, Vytautas Magnus University, e-mail: liutaurasragulskis@gmail.com

УДК 656.073.7:519.246

В.В. Стельмащук, О.А. Коваль
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ ВАНТАЖОПОТОКУ ЯК ОСНОВА ПЛАНУВАННЯ ПРОВІЗНОЇ СПРОМОЖНОСТІ МІЖНАРОДНОГО АВТОМОБІЛЬНОГО ПЕРЕВІЗНИКА

Розглянуто задачу планування провізної спроможності міжнародного автомобільного перевізника на основі прогнозу місячного вантажопотоку. Показано, що для вибору чисельності власного парку потрібен не точковий прогноз, а розподіл попиту, і сформульовано умову оптимальної чисельності парку через співвідношення постійних витрат на тягач та надбавки за залучення стороннього перевізника. На умовному ряді порівняно сезонну наївну модель, модель Хольта–Вінтерса та SARIMA за процедурою ковзного походження; виконано розрахунок витрат за п'ятьма політиками формування парку. Визначено обмеження підходу та напрями подальшої роботи.

Ключові слова: вантажопотік, прогнозування, часові ряди, провізна спроможність, парк рухомого складу, залучені перевізники.

The problem of planning the carrying capacity of an international road carrier on the basis of a monthly freight flow forecast is considered. It is shown that fleet sizing requires a demand distribution rather than a point forecast, and the condition of the optimal own-fleet size is formulated through the ratio of the fixed cost per tractor to the premium paid for subcontracted carriers. On a conditional series, the seasonal naive model, the Holt–Winters model and SARIMA are compared using a rolling-origin procedure; expected costs are calculated for five fleet-sizing policies. The limitations of the approach and directions for further work are outlined.

Key words: freight flow, forecasting, time series, carrying capacity, vehicle fleet, subcontracted carriers.

Постановка проблеми. Міжнародний автомобільний перевізник щопівроку чи щороку приймає рішення, яке важко відкликати: скільки тягачів тримати у власному парку. Надлишок парку — це простій і постійні витрати на лізинг, страхування, базову оплату водіїв; нестача — передача рейсів залученим перевізникам за вищою ставкою або відмова клієнту. Обидві помилки коштують по-різному, і саме ця асиметрія визначає, як користуватися прогнозом. У практиці підприємств прогноз вантажопотоку здебільшого будується як одне число на місяць — за минулим роком чи експертною оцінкою, — а резерв парку закладається «на око». Для планування провізної спроможності цього недостатньо: потрібен не точковий прогноз, а розподіл майбутнього попиту, з якого вже виводиться чисельність парку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогнозування показників роботи автотранспорту на регіональному рівні за трендовими моделями розглянуто у [6]; для оцінювання вантажопотоку на території застосовано модель з факторами відстані та чисельності населення [5]. Резервування провізних можливостей парку в ланцюгах постачань споживчих товарів досліджено у [7]. Порівняння економетричних і нейромережевих моделей для європейського перевізника виконано у [1]: для попиту ARIMA дає прийнятні результати, тоді як для ставок фрахту кращими виявилися нейронні мережі, а контрактні ставки повторюють спотові з лагом близько шести місяців. У [2] на реальних місячних даних 2020–2025 рр. порівняно наївну модель, ковзне середнє, моделі Брауна, Хольта, ETS і ARIMA за ковзним походженням з показниками MAE, RMSE, MAPE, MASE; показано, що найкраща модель залежить від прогнозованого показника, а інтервали прогнозу 80 і 95 % придатні для планування резервів парку. Підхід з навчанням з підкріпленням для оперативного прогнозу попиту запропоновано у [3]. Методичну основу — вибір моделі, оцінювання на ковзному походженні, інтервали прогнозу — викладено у [4], а шкальовані показники точності — у [8]. Разом з тим зв'язок між прогнозом і правилом формування парку в цих роботах здебільшого не формалізовано: прогноз закінчується там, де починається планування.

Виклад основного матеріалу. *Постановка задачі.* Нехай D_i — випадковий попит у місяці i (завантажених міжнародних рейсів), π — продуктивність тягача, рейсів за місяць, N — чисельність власного парку, стала на горизонті планування H місяців. Витрати перевізника за горизонт

складаються з постійних $N{\cdot}c_f{\cdot}H$, змінних на власні рейси c_o та оплати залучених рейсів c_s ($c_s > c_o$). Для кожного N очікувані витрати обчислюються за розподілом D_i, і оптимальне N^* *мінімізує їх. Умова оптимуму виводиться порівнянням граничних витрат і вигід одного додаткового тягача: його варто додати, доки частка місяців, у яких попит перевищує місткість власного парку* $N\pi$, *залишається більшою за* $c_f/(\pi(c_s - c_o))$. Тобто правило формування парку задається не прогнозом, а співвідношенням витрат; прогноз постачає лише розподіл, за яким ця частка обчислюється. Звідси й вимога до моделі: вона має давати не лише точкове значення, а й інтервали, узгоджені з фактичним розкидом.

Ілюстративний розрахунок. Параметри умовні (реальні дані підприємства є предметом кваліфікаційної роботи). Ряд місячних завантажених рейсів за 2023–2025 рр. згенеровано з трендом +0,4 % на місяць, сезонністю (спад у січні–лютому, піки у квітні та жовтні) та випадковою складовою з коефіцієнтом варіації 7 %. Три моделі — сезонна наївна, адитивна модель Хольта–Вінтерса (ETS) і SARIMA$(1,1,1)(0,1,1)_{12}$ — оцінено за ковзним походженням: 12 прогнозів на один місяць уперед для кожного місяця 2025 р., кожен — на моделі, навченій на попередніх даних (табл. 1).

Таблиця 1

Точність прогнозів на один місяць уперед (12 ковзних походжень, 2025 р.)

Модель	MAE, рейсів	RMSE, рейсів	MAPE, %	Зміщення, рейсів
Сезонна наївна	17,2	22,5	8,4	+15,8
Хольта–Вінтерса (ETS)	13,4	15,5	6,8	+4,2
SARIMA$(1,1,1)(0,1,1)_{12}$	27,7	34,4	14,1	+9,1

Сезонна наївна модель систематично занижує попит — зміщення +15,8 рейса — бо не бачить тренду. SARIMA на 24–35 спостереженнях виявилася найгіршою: для оцінки сезонних параметрів потрібно принаймні 4–5 повних циклів, а у перевізника, який веде облік два-три роки, їх немає. Для короткого ряду експоненційне згладжування практичніше. Прогноз моделі Хольта–Вінтерса на перше півріччя 2026 р. з 80 % інтервалом (5000 імітацій) наведено на рис. 1.

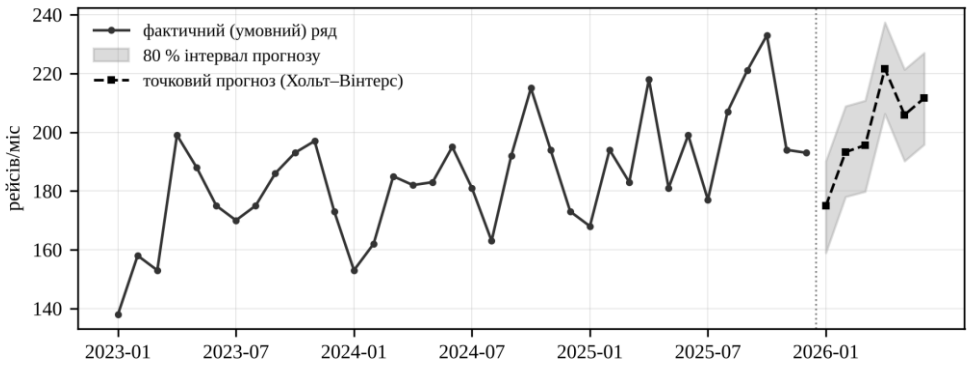


Рис. 1. Умовний ряд завантажених рейсів і прогноз на 2026 р.

Для розрахунку парку прийнято $\pi = 4$ рейси на тягач за місяць (цикл Луцьк – ЄС – Луцьк близько тижня з урахуванням простоїв), $c_f = 2000$ євро за тягач-місяць, $c_o = 1150$ і $c_s = 1700$ євро за рейс; горизонт — 6 місяців. Порівняно п'ять політик: парк за 10-, 50- та 90-процентним квантилем середньомісячного попиту (194, 200 і 207 рейсів), парк за верхньою межею пікового місяця і оптимум, знайдений перебором N за очікуваними витратами (табл. 2).

Таблиця 2

Очікувані витрати за політиками формування парку (6 місяців)

Політика формування власного парку	Тягачів, N	Частка залучених рейсів, %	Витрати, тис. євро
За нижньою межею середнього попиту (q_{10})	49	5,1	2004,4
За медіаною середнього попиту (q_{50})	51	3,0	2014,6
За верхньою межею середнього попиту (q_{90})	52	2,2	2021,3
За піковим місяцем (q_{90} квітня)	60	0,0	2102,8
Оптимум за очікуваними витратами	43	14,5	1994,5

Результат на перший погляд суперечить інтуїції: оптимальний парк (43 тягачі) менший за будь-який квантиль середнього попиту, а близько 15 % рейсів передається залученим перевізникам.

Пояснення — у співвідношенні витрат: простій одного рейсо-місця у власному парку коштує c_f/π = 500 євро, а надбавка за залучення — лише $c_s - c_o$ = 550 євро, тож гранична частка місяців з перевищенням попиту дорівнює 0,91, і власний парк доцільно тримати нижче попиту майже завжди. Формування парку «під пік» коштує на 5,4 % дорожче за оптимум, за медіаною — на 1,0 %. Чутливість до ставки залучення суттєва: при c_s = 1900 євро оптимум зсувається до 48 тягачів (частка залучених рейсів 6,4 %), при 2100 — до 50 (4,0 %). На дефіцитному ринку підрядників правило наближається до «парк за медіаною», на ринку з надлишком вільних перевізників — віддаляється від нього.

Вимоги до даних. Правило працює лише за умови, що ряд відображає попит, а не виконані рейси. Фактичний облік перевізника фіксує саме рейси, тобто попит, обрізаний згори місткістю парку: у місяці, коли замовлення відхилялися, ряд занижений, і модель, навчена на ньому, занижуватиме пік і наступного року. Тому поряд з виконаними рейсами підприємству доцільно вести облік відхилених і переданих стороннім перевізникам замовлень — без цього цензурування попиту непомітне, а помилка накопичується. Прогноз при цьому варто перераховувати щомісяця, а рішення про парк переглядати з тим кроком, з яким його чисельність реально змінити (квартал для лізингового парку, місяць для орендованого).

Обмеження. Розрахунок не враховує обмеження на залучення (у пікові місяці вільних перевізників може не бути за жодну ціну), втрату клієнта при відмові, лаг і витрати на зміну парку, а також різницю в якості сервісу власного та залученого рухомого складу. Ряд умовний; на реальних даних розподіл помилок може мати важкий правий хвіст через разові великі замовлення, і тоді імітація за нормальними залишками занижуватиме верхні квантилі.

Висновки. 1. Планування провізної спроможності потребує розподілу прогнозованого попиту, а не точкового значення; чисельність власного парку визначається співвідношенням постійних витрат на тягач і надбавки за залучення, тоді як прогноз лише задає розподіл, за яким обчислюється гранична частка місяців з перевищенням попиту.

2. Для коротких рядів (2–3 роки місячних даних) модель Хольта–Вінтерса дала MAPE 6,8 % проти 8,4 % у сезонної наївної та 14,1 % у SARIMA; остання на такому обсязі даних непридатна.

3. В ілюстративному розрахунку формування парку «під пік» коштує на 5,4 % дорожче за оптимум; подальша робота — калібрування моделі на фактичних даних перевізника, врахування обмеженої доступності залучених перевізників у пікові місяці та асиметрії розподілу помилок прогнозу.

Список використаних джерел

1. Liachovičius E., Šabanovič E., Skrickij V. Freight rate and demand forecasting in road freight transportation using econometric and artificial intelligence methods. *Transport.* 2023. Vol. 38, No. 4. P. 231–242. DOI: 10.3846/transport.2023.20932.

2. Konwerski J., Ziółkowski J. Multi-indicator forecasting of road freight transport workload for operational planning. *Applied Sciences.* 2026. Vol. 16, Iss. 13. Art. 6392. DOI: 10.3390/app16136392.

3. Al Hajj Hassan L., Mahmassani H. S., Chen Y. Reinforcement learning framework for freight demand forecasting to support operational planning decisions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review.* 2020. Vol. 137. Art. 101926. DOI: 10.1016/j.tre.2020.101926.

4. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and Practice. 3rd ed. Melbourne: OTexts, 2021. URL: https://otexts.com/fpp3/

5. Кочина А. А. До питання визначенні величини транспортного потоку при доставці вантажів у ланцюгах постачань. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті.* 2022. № 2(19). С. 102–107. DOI: 10.36910/automash.v2i19.908.

6. Григорук П. М., Завгородня Т. П. Прогнозування показників роботи автотранспорту Хмельницької області. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки.* 2015. № 3, Т. 3. С. 42–48.

7. Ковцур К. Г. Резервування провізних можливостей парку автомобілів у логістичних ланцюгах постачань споживчих товарів: дис. … канд. техн. наук: 05.22.01. Харків: ХНАДУ, 2015. 256 с.

8. Hyndman R. J., Koehler A. B. Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting.* 2006. Vol. 22, No. 4. P. 679–688. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.

СТЕЛЬМАЩУК Валерій Віталійович — к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортної логістики,

Луцький національний технічний університет, e-mail: v.stelmashchuk@lutsk-ntu.com.ua
КОВАЛЬ Олександр Анатолійович — здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти, група ТЛСм-11, Луцький національний технічний університет
Valerii STELMASHCHUK — Ph.D., Associate Professor, Department of Transport Logistics, Lutsk National Technical University, e-mail: v.stelmashchuk@lutsk-ntu.com.ua
Oleksandr KOVAL — Master's student, group TLSm-11, Lutsk National Technical University

УДК 656.073:004.9

В.В. Стельмащук
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

ЕЛЕКТРОННА НАКЛАДНА e-CMR У ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИЦІЙНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ: ПРАВОВІ ПЕРЕДУМОВИ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНІ НАСЛІДКИ ДЛЯ УКРАЇНСЬКОГО ЕКСПЕДИТОРА

Розглянуто перехід від паперової міжнародної накладної CMR до електронної e-CMR з позиції транспортного експедитора. Узагальнено правові передумови (Додатковий протокол 2008 р., приєднання України у 2020 р., Регламент ЄС 2020/1056) та кількісні оцінки ефекту за даними пілотних проєктів і галузевих досліджень. Запропоновано структуровану оцінку впливу e-CMR на документарні функції експедитора — складання накладної, контроль видачі вантажу, претензійну роботу, протидію нейтралізації, взаємодію з контролюючими органами та архівування. Виокремлено бар'єри впровадження для українського експедитора і сформульовано напрями подальших досліджень.

Ключові слова: транспортно-експедиційна діяльність, накладна CMR, e-CMR, цифровізація документообігу, міжнародні автомобільні перевезення.

The transition from the paper CMR consignment note to the electronic e-CMR is considered from the freight forwarder's perspective. The legal prerequisites (the 2008 Additional Protocol, Ukraine's accession in 2020, EU Regulation 2020/1056) and quantitative estimates of the effect from pilot projects and industry studies are summarised. A structured assessment of the impact of e-CMR on the forwarder's documentary functions is proposed: drawing up the consignment note, control of delivery, claims handling, prevention of neutralisation, interaction with control authorities and archiving. Implementation barriers for a Ukrainian forwarder are identified and directions for further research are outlined.

Key words: freight forwarding, CMR consignment note, e-CMR, digitalisation of document flow, international road haulage.

Постановка проблеми. Міжнародна накладна CMR залишається документом, навколо якого побудована документарна функція експедитора. Вона є доказом укладення договору перевезення, описом вантажу й умов, підставою для претензій, а після видачі вантажу — підставою для розрахунків. За Законом України «Про транспортно-експедиторську діяльність» перевезення супроводжується товарно-транспортними документами, і саме експедитор у типовій схемі організовує їх складання, контролює оформлення та збирає підтвердження доставки [3]. Паперова форма накладної має три оригінальні примірники, і кожен з них проходить власний шлях — через водія, одержувача, пошту, архів. Звідси й типові втрати: підтвердження доставки затримується на тижні, записи нерозбірливі, накладну можна підмінити (нейтралізувати).

Додатковий протокол до КДПВ 2008 р. надав електронній накладній ту саму доказову силу, що й паперовій. Україна приєдналася до нього Законом від 03.06.2020 № 660-IX [2]. Правова можливість існує вже кілька років, а практики застосування e-CMR українськими експедиторами фактично немає. Що саме зміниться у функціях експедитора з переходом на e-CMR і де лежать бар'єри цього переходу — питання, яке розглянуто нижче.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Функції накладної CMR — інформаційну, інструктивну, ідентифікаційну та підтверджувальну — і перші пілотні перевезення з e-CMR описано у [8]; там же наведено оцінку скорочення витрат на обробку документа у 3–4 рази. Практику нейтралізації накладної та її ризики для перевізника досліджено у [9], де показано, що підміна документа під час перевезення є поширеною й лише частково врегульованою. Узагальнення пілотних проєктів (Бенілюкс, DIGINNO-Proto у Балтії та Польщі, AEOLIX) виконано робочою групою ЄЕК ООН [5]: економія часу оцінюється у 5–20 хв, а адміністративних витрат — у 2–13 євро на одну відправку. Детальний розрахунок на прикладі одного підприємства наведено у [7] — обробка паперової накладної займає 20 хв і коштує 6,23 євро, електронної — 5,5 хв і 1,69 євро, а інвестиції у впровадження складають близько 27,6 тис. євро. Стан впровадження в Європі станом на 2025 р. проаналізовано у [6]: 38 держав ратифікували протокол, 20 учасниць КДПВ — ще ні; упровадження йде з запізненням; з 9 липня 2027 р. повною мірою застосовуватиметься Регламент (ЄС) 2020/1056

про електронну інформацію про вантажні перевезення [4], за яким органи влади держав-членів зобов'язані приймати таку інформацію в електронній формі.

В Україні увага зосереджена на внутрішній електронній накладній е-ТТН — з 2024 р. діє експериментальний проєкт [10], а система будується за міжнародними стандартами обміну даними, що розглядається як крок до e-CMR. Помітна прогалина: наявні роботи дивляться на e-CMR очима перевізника, вантажовідправника або держави, тоді як експедитор — сторона, яка фактично керує документообігом у міжнародному перевезенні, — залишається поза фокусом.

Виклад основного матеріалу. *Правова рамка.* Для українського експедитора вона складається з трьох шарів. Перший — КДПВ 1956 р. [1], яка визначає зміст накладної та режим відповідальності. Другий — Додатковий протокол, за яким електронна накладна еквівалентна паперовій за умови її засвідчення надійним електронним підписом і забезпечення цілісності даних; протокол не визначає технології, і це свідомий вибір його авторів [5]. Третій — Регламент (ЄС) 2020/1056 [4], який стосується не сторін договору, а органів влади ЄС: з 2027 р. вони не зможуть вимагати паперу, якщо інформація надана через сертифіковану платформу eFTI. Для експедитора це означає, що зникає останній аргумент на користь паперу — побоювання, що на дорозі чи на митниці електронний документ не приймуть.

Економіка операцій з накладною. Пооператорний розклад витрат часу й коштів на один примірник накладної, за даними [7], наведено у табл. 1. Основна економія досягається не на підписанні (воно займає однаковий час), а на операціях, які в паперовому режимі виконує саме експедиторський персонал — передача документа, відновлення статусу, архівування, надсилання підтвердження доставки.

Таблиця 1

Витрати часу й коштів на обробку одного примірника накладної [7]

Операція	CMR, хв	e-CMR, хв	CMR, євро	e-CMR, євро
Друк	1	0	0,31	0
Передача перевізнику (водію)	3	0,5	0,93	0,15
Підписання	5	5	1,54	1,54
Виправлення (частка 1 %)	0,15	0	0,05	0
Відновлення статусу відправки	3	0	0,93	0
Архівування	3	0	0,93	0
Надсилання підтвердження доставки	5	0	1,54	0
Разом	20,15	5,5	6,23	1,69

Наведені цифри походять з розрахунків постачальника платформи e-CMR, і тут слабке місце аргументу — незалежних хронометражів у відкритому доступі обмаль. Проте оцінки ЄЕК ООН, отримані з інших джерел, лежать у тому самому діапазоні [5].

Вплив на функції експедитора. Експедитор виконує документарні операції не для себе, а в інтересах клієнта, тому ефект e-CMR доречно оцінювати за функціями, а не за операціями. Результат такої оцінки — у табл. 2.

Таблиця 2

Зміна документарних функцій експедитора при переході на e-CMR

Функція експедитора	Паперова CMR	e-CMR
Складання накладної, контроль заповнення граф	Ручне заповнення, розбіжності між примірниками, нерозбірливі записи	Єдина версія даних, валідація на платформі, довідники контрагентів
Контроль видачі вантажу, підстава для рахунку	Підтвердження повертається поштою чи сканом за дні–тижні	Підпис одержувача з геоміткою та часом; рахунок — у момент доставки
Претензійна робота (застереження, акти)	Застереження в рукописній формі, спори про момент їх внесення	Застереження з фотофіксацією та позначкою часу в тому самому документі
Протидія нейтралізації накладної	Підміна документа в дорозі практично не контролюється [9]	Доступ до оригіналу всіх сторін, історія змін
Взаємодія з контролюючими органами	Пред'явлення паперу на пункті пропуску	Доступ за QR-кодом чи через реєстр індексів [5]
Архівування, аудит, податкове підтвердження	Фізичний архів, пошук паперових оригіналів	Електронний архів, вибірка за будь-якою ознакою

Окремо стоїть функція, яка в табл. 2 не ввійшла, — розподіл замовлень між власним рухомим складом і залученими перевізниками. e-CMR перетворює накладну з документа на структуровані дані про кожну відправку (маршрут, вага, час навантаження і розвантаження, фактичні затримки). Саме ці дані потрібні експедитору для оцінювання перевізників і планування провізної спроможності, а в паперовому режимі їх збирати доводиться повторно, з первинних документів.

Бар'єри для українського експедитора. Перший — асиметрія вигід: економія від e-CMR розподіляється між відправником, одержувачем і експедитором, а витрати на платформу, пристрої для водіїв та навчання несе перевізник; за оцінками Європейської комісії, наведеними у [5], для підприємства на 200 автомобілів перехід коштує 70–75 тис. євро. Другий — двосторонність: e-CMR діє, лише коли обидві держави маршруту є учасницями протоколу, а національні органи фактично приймають електронний документ; досвід Польщі [6] свідчить, що ратифікація і робоча практика — різні речі. Третій — сумісність платформ: до запуску сертифікованих платформ eFTI кожен провайдер має власний формат, і експедитор, який працює з кількома перевізниками, ризикує отримати кілька несумісних систем. Четвертий — відсутність в Україні судової практики щодо доказової сили e-CMR і неврегульованість її використання для митних цілей. Останнє найістотніше: без прийняття e-CMR митницею документ доведеться дублювати папером, і більша частина ефекту з табл. 1 зникне.

Висновки. 1. Правові передумови для застосування e-CMR українським експедитором сформовано: Україна є учасницею Додаткового протоколу з 2020 р., а з 2027 р. органи влади ЄС зобов'язані приймати електронну інформацію про перевезення. Стримує не право, а відсутність практики й інфраструктури.

2. Найбільший ефект e-CMR для експедитора лежить не в економії на одному примірнику (4,5 євро та близько 15 хв за даними [7]), а в зміні функцій — миттєвому підтвердженні доставки як підставі для розрахунків, доказовій претензійній роботі та отриманні структурованих даних про відправки для планування провізної спроможності.

3. Подальші дослідження доцільно спрямувати на хронометраж документарних операцій українського експедитора в паперовому режимі (щоб замінити вендорські оцінки незалежними) та на моделювання порогу обсягу відправок, за яким інвестиції в e-CMR окупаються для підприємства, що не має власного рухомого складу.

Список використаних джерел

1. Конвенція про договір міжнародного автомобільного перевезення вантажів (КДПВ) від 19.05.1956. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_234

2. Про приєднання України до Додаткового протоколу до Конвенції про договір міжнародного автомобільного перевезення вантажів (КДПВ) про електронну накладну: Закон України від 03.06.2020 № 660-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/660-20

3. Про транспортно-експедиторську діяльність: Закон України від 01.07.2004 № 1955-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1955-15

4. Regulation (EU) 2020/1056 of the European Parliament and of the Council of 15 July 2020 on electronic freight transport information. *Official Journal of the European Union.* 2020. L 249. P. 33–48.

5. Paper on the operationalization of the Additional Protocol to the CMR concerning the Electronic Consignment Note (e-CMR): ECE/TRANS/SC.1/2021/1. Geneva: UNECE, Inland Transport Committee, Working Party on Road Transport, 2021. 15 p.

6. Miklinska J. Conditions for implementing e-CMR in Europe in the view of supply chain digitalisation focussing Polish experiences. *European Research Studies Journal.* 2025. Vol. XXVIII, Iss. 4. P. 386–400. DOI: 10.35808/ersj/4119.

7. Licite-Kurbe L., Ozolina Z. Gains from introducing e-CMR by international manufacturing company. *Engineering for Rural Development.* 2022. Vol. 21. P. 146–152. DOI: 10.22616/ERDev.2022.21.TF042.

8. Dziechciarz M. Zastosowanie elektronicznego listu przewozowego (e-CMR). *Europa Regionum.* 2018. T. 35. S. 21–32. DOI: 10.18276/er.2018.35-02.

9. Poliak M., Tomicová J., Jaśkiewicz M., Zhuravleva N., Fedorko G. Neutralization of transport documents in road transport. *Transport Problems.* 2021. Vol. 16, No. 2. P. 87–99. DOI: 10.21307/tp-2021-025.

10. Питання реалізації експериментального проекту з впровадження товарно-транспортної накладної в електронній формі у сфері внутрішніх вантажних перевезень: Постанова Кабінету

Міністрів України від 30.05.2024 № 629. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/629-2024-п

СТЕЛЬМАЩУК Валерій Віталійович — к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортної логістики, Луцький національний технічний університет, e-mail: v.stelmashchuk@lutsk-ntu.com.ua
Valerii STELMASHCHUK — Ph.D., Associate Professor, Department of Transport Logistics, Lutsk National Technical University, e-mail: v.stelmashchuk@lutsk-ntu.com.ua

УДК 656.13

M. Afonin, O. Maksymiuk, R. Mickiene
Lviv Polytechnic National University

OPTIMIZATION OF BULK ROOT-CROP TRANSPORTATION: A LITERATURE REVIEW AND A CONCEPTUAL MODEL FOR UKRAINE

This paper reviews Vehicle Routing Problem (VRP) approaches for bulk root-crop transportation and proposes a conceptual model adapted to Ukrainian inter-regional logistics. The review covers the operational specifics of farm-to-plant flows, relevant VRP variants, and dominant solution methods. Building on these foundations, the paper formulates a conceptual model in which Ukraine-specific factors – accelerated plant consolidation, an extended hauling shoulder, plant-gate queueing, a heterogeneous and aged truck fleet, and pavement-quality dependent travel costs – modify the classical VRP and tighten its operational constraints. The principal contribution is to move the discussion beyond the observation that no Ukrainian VRP study exists for bulk root crops, towards a concrete characterisation of how such a model should differ from its Serbian, Egyptian, Thai, or Australian analogues.

Keywords: vehicle routing problem, bulk root crops, sugar beet, agricultural logistics, metaheuristics, Ukrainian context.

У роботі представлено огляд підходів до задачі маршрутизації транспорту (Vehicle Routing Problem, VRP) у контексті перевезення навалочних плодових культур та запропоновано концептуальну теоретичну модель, адаптовану до української внутрішньорегіональної логістики. Огляд охоплює операційні особливості потоків «поле – переробне підприємство», релевантні варіанти VRP та переважаючі методи їх розв'язання. На цій основі сформульовано концептуальну модель, у якій українські специфічні чинники – прискорена консолідація переробних підприємств, подовжене транспортне плече, черги на прийомних пунктах, однорідний та зношений автопарк, а також залежність витрат на перевезення від якості дорожнього покриття – модифікують класичну постановку VRP та посилюють її експлуатаційні обмеження. Основна суть огляду полягає в переході від простої констатації відсутності українських VRP-досліджень для навалочних плодових культур до конкретної характеристики того, чим така модель має відрізнятися від її сербських, єгипетських, тайських та австралійських аналогів.

Ключові слова: задача маршрутизації транспорту, навалочні плодові культури, цукровий буряк, агрологістика, метаевристики, український контекст.

Introduction

Bulk root crops – sugar beet first of all, alongside potato and onion – combine three properties that make their transportation a classic operations-research problem. The harvesting campaign is short, quality decays within hours of lifting, and a small set of processing plants must absorb large volumes under tight intake schedules. Routing decisions translate directly into hauling cost and into product losses at the plant gate. The Vehicle Routing Problem (VRP), introduced by Dantzig and Ramser in 1959 [1] and matured into a broad family of variants and algorithms [2], is the natural framework. International literature has applied it intensively to sugar beet and sugarcane campaigns. Ukrainian work on the subject is essentially absent. This review summarises the relevant literature and then formulates a conceptual VRP model that reflects Ukrainian operating conditions.

Bulk Root-Crop Logistics and Relevant VRP Variants

Bulk root-crop transportation has three features that drive model selection. The campaign concentrates peak demand for trucks into a few weeks. The product deteriorates: every hour of delay between lifting and slicing costs sucrose and dry matter. The network is many-to-few – many pickup piles serve a small number of plants, each with strict per-shift intake capacity. These features map onto specific VRP variants: a capacitated base case, time-window constraints on plant intake and harvest freshness, multi-depot structure across plants, and multi-trip operation during peak days. Field-logistics work by Bochtis and Sørensen established the link between operational VRP and agricultural machinery, treating field traversal and service-unit coordination as routing decisions [3].

Country-level case studies confirm the value of formal optimisation. Higgins solved a road-vehicle scheduling problem at an Australian sugar mill using mixed-integer programming, achieving substantial real-

fleet savings [4]. Anokić and colleagues formulated Serbian sugar beet transport as a vehicle scheduling problem and cut campaign transportation time with metaheuristics [5]. Fikry, Gheith and Eltawil integrated production, logistics and crop-rotation decisions for Egyptian sugar beet supply chains, showing that decisions taken in isolation leave measurable value on the table [6]. Pitakaso and Sethanan attacked the same problem on the Thai sugarcane side with an Adaptive Large Neighborhood Search algorithm for harvester assignment and routing under shared field resources [7]. Every major beet- or cane-producing country has produced its own VRP-based study. Ukraine has not such number of completed researches and implemented solutions in this field.

Solution Methods

VRP is NP-hard, so exact methods scale poorly beyond toy instances. For realistic campaigns the literature relies on heuristics and metaheuristics: the Clarke-Wright savings algorithm as constructive baseline [8], and Variable Neighborhood Search, GRASP, Adaptive Large Neighborhood Search and Genetic Algorithms as the dominant improvement frameworks [5, 7]. A recent systematic review of VRPTW literature (2018–2022) confirms the pattern: approximate methods dominate, and hybrid algorithms now account for roughly forty per cent of studies [9]. For bulk root crops hybridisation is particularly attractive because the problem combines truck-to-pile assignment, route sequencing, and timing within plant intake windows – three sub-problems with different algorithmic affinities.

The Ukrainian Context: Industry Dynamics

Three structural shifts make the Ukrainian VRP problem qualitatively different from its peers. First, plant consolidation. The number of operating sugar factories has fallen from over a hundred in the 1990s to twenty-seven in the 2025 campaign, and industry forecasts point to eighteen–twenty in the medium term. Closures concentrate the remaining plants in the Vinnytsia, Khmelnytskyi, Ternopil and Poltava regions. Second, the hauling shoulder has lengthened. Fields that previously delivered to a local plant now serve a more distant one, which sharpens the trade-off between travel time and sucrose loss. Third, the operating environment is harder: an aged and heterogeneous truck fleet, road surfaces of uneven quality, plant-gate queueing during peak shifts, and wartime fuel-price volatility. Existing Ukrainian transport-optimisation research has focused on grain export, where rail-to-port logistics dominate and the planning horizon is months rather than hours [10]. That work is methodologically valuable but operationally distant from the root-crop case.

5. A Conceptual VRP Model for Ukrainian Conditions

Building on the reviewed literature, a Ukraine-adapted VRP for bulk root crops should retain the capacitated multi-depot multi-trip backbone but extend it along five lines. The objective should minimise total campaign cost – fuel, driver, and plant-gate idle time – augmented by a quality-loss penalty proportional to the delay between lifting and processing, in line with the sucrose-decay logic central to [5] and [6]. Time-window constraints should be two-sided: a freshness window at the field side and an intake-shift window at the plant side, with the latter narrowed by realistic queueing rather than treated as a hard gate. Travel cost should be road-class dependent rather than purely distance-based, reflecting Ukrainian pavement heterogeneity and its effect on average speed and fuel burn. The fleet should be heterogeneous: capacity, fuel consumption and availability differ across truck classes, which most international studies abstract away. Finally, the post-consolidation network – fewer plants, longer arcs – should be the structural premise of the instance design, not an afterthought. None of these extensions is individually novel; their combination is what makes the model Ukrainian.

Conclusion

VRP and its agricultural extensions are a mature toolkit for routing bulk root crops, with proven gains in international practice. Metaheuristic and hybrid algorithms are the operational standard. The principal gap is not the absence of a Ukrainian VRP study in isolation, but the absence of a problem formulation that captures plant consolidation, longer hauling shoulders, queueing, fleet heterogeneity and road-quality effects together. The conceptual model proposed here is a step in that direction and a basis for subsequent computational work on real fleet and plant data.

References

1. Dantzig GB, Ramser JH. The truck dispatching problem. Management Science. 1959;6(1):80–91.
2. Toth P, Vigo D, editors. Vehicle routing: problems, methods, and applications. 2nd ed. Philadelphia: SIAM; 2014. ISBN: 978-1-61197-358-7.
3. Bochtis DD, Sørensen CG. The vehicle routing problem in field logistics part I. Biosystems Engineering. 2009;104(4):447–457.

4. Higgins A. Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: a case study at an Australian sugar mill. European Journal of Operational Research. 2006;170(3):987–1000.
5. Anokić A, Stanimirović Z, Stakić Đ, Davidović T. Metaheuristic approaches to a vehicle scheduling problem in sugar beet transportation. Operational Research. 2021;21(3):2021–2053.
6. Fikry I, Gheith M, Eltawil A. An integrated production-logistics-crop rotation planning model for sugar beet supply chains. Computers & Industrial Engineering. 2021;157:107300.
7. Pitakaso R, Sethanan K. Adaptive large neighborhood search for scheduling sugarcane inbound logistics equipment and machinery under a sharing infield resource system. Computers and Electronics in Agriculture. 2019;158:313–325.
8. Clarke G, Wright JW. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations Research. 1964;12(4):568–581.
9. Liu X, Chen Y-L, Por LY, Ku CS. A systematic literature review of vehicle routing problems with time windows. Sustainability. 2023;15(15):12004.
10. Kozachenko DM, Vernigora RV, Rustamov RS. Creation of export-oriented network of grain elevators in Ukraine. Science and Transport Progress. 2017;(2(68)):56–70.

Афонін Максим Олександрович – к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: maksym.o.afonin@lpnu.ua

Максимюк Олександр Андрійович – аспірант кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: oleksandr.a.maksymiuk@lpnu.ua

Ріма Міцкєне – аспірантка кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: rima.mitskiene.asp.2025@lpnu.ua

Maksym Afonin – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor, Department of Transport Technologies, Lviv Polytechnic National University, e-mail: maksym.o.afonin@lpnu.ua

Oleksandr Maksymiuk – Ph.D. Student, Department of Transport Technologies, Lviv Polytechnic National University, e-mail: oleksandr.a.maksymiuk@lpnu.ua

Rima Mickiene – Ph.D. Student, Department of Transport Technologies, Lviv Polytechnic National University, e-mail: rima.mitskiene.asp.2025@lpnu.ua