

8. János Z., Hanamoto B. Analytical Determination of Drawbar Pull as a Function of Slip for Tracked Vehicles // Proc. 1st Int. Conf. on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems. — Turin, 1961.

9. OECD Tractor Codes. Standard Code for the Official Testing of Agricultural and Forestry Tractor Performance (Code 2). — Paris: OECD, (ост. вид.).

10. ASABE Standards. Agricultural Machinery Management Data (D497). — St. Joseph (MI): ASABE).

УДК 629.33:656.07

ОЦІНКА ПОТРЕБИ В ЗАПАСНИХ ЧАСТИНАХ ЯК ЕЛЕМЕНТ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Москалюк Микола Леонідович, аспірант, кафедра автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: moskalyuk255@gmail.com, ORCID: [0009-0002-4660-8858](https://orcid.org/0009-0002-4660-8858)

Кашканов Андрій Альбертович, д.т.н., професор, кафедра автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua, ORCID: [0000-0003-3294-6135](https://orcid.org/0000-0003-3294-6135)

Сучасне забезпечення запасними частинами автомобільного транспорту (АТ) стає стратегічно важливим напрямом управління, який визначає не лише безперебійність руху, а й загальну ефективність роботи автопарків та імідж компаній на ринку [1]. В умовах стрімкої цифровізації, поширення IoT-рішень і впровадження штучного інтелекту для прогнозування технічного стану транспортних засобів [2] управління запасами виходить на новий рівень складності та відповідальності.

Розвиток інтелектуальних транспортних систем та екотехнологій підвищує вимоги до екологічної безпеки й оптимізації викидів у процесі експлуатації. У цьому контексті забезпечення запасними частинами інтегрується з концепціями циркулярної економіки: застосуванням відновлених компонентів, реалізацією зворотної логістики та використанням 3D-друку для оперативного відтворення критичних деталей прямо на місці експлуатації [3].

Сучасні підходи до оцінки потреби в запасних частинах поєднують:

- прогнозу аналітику на основі машинного навчання для раннього виявлення потенційних відмов [4];
- цифрові двійники транспортних засобів, які моделюють ресурс кожного вузла з урахуванням стилю водіння та умов експлуатації [5];
- блокчейн-платформи для забезпечення прозорості ланцюжків постачання та підтвердження сертифікації запчастин [6];
- адаптивні системи управління запасами, що поєднують практики Just-In-Time та мінімальної безпечної політики запасів (safety stock) [7].

Ефективна організація технічного обслуговування і ремонту (ТОiP) ґрунтується на інтегрованих інформаційних платформах, які об'єднують дані

телеметрії, результати діагностики в мобільних сервісних бригадах і показники KPI (Key Performance Indicator) щодо швидкості реакції та рівня задоволеності клієнтів. Завдяки цьому збільшується точність планування закупівель, знижується час простою автомобілів і скорочуються витрати на зберігання [8].

Упровадження єдиних стандартів узгодження технічних характеристик запчастин і сервісної документації відповідає вимогам міжнародних регуляторів та сприяє розширенню глобальних мереж обслуговування. При цьому виробники і постачальники переходять до моделей співпраці, заснованих на спільному прогнозуванні попиту й обміні даними в режимі реального часу.

Метою роботи є обґрунтування методичних підходів до оцінки потреби в запасних частинах у контексті розвитку транспортних технологій та сучасних стандартів підтримки експлуатаційної надійності АТ.

Оцінювання потреби в запасних частинах є багаторівневим процесом, що поєднує статистичні, модельні та інтелектуальні методи. Кожен із них має власні переваги та обмеження, а їх інтеграція дозволяє сформувавши адаптивну систему прогнозування (табл. 1), здатну враховувати як нормативні вимоги, так і реальні умови експлуатації.

Таблиця 1 – Функціональні блоки адаптивної системи

Назва блоку	Функціональне призначення	Тип даних	Приклади реалізації
Вхідні дані	Збір та агрегування інформації, необхідної для оцінки потреби	Історичні записи, телематика, нормативи, сенсорні потоки	Дані про відмови, пробіг, навантаження, умови середовища, стандарти ISO/UNECE
Аналітичні модулі	Обробка вхідних даних для формування базових прогнозів	Статистичні масиви, математичні моделі, алгоритми ML	Вейбулівські моделі, регресійний аналіз, класифікатори стану, цифрові двійники
Адаптаційний блок	Узгодження прогнозів, корекція з урахуванням нормативів, формування інтегрованого результату	Вагові коефіцієнти, порогові значення, сценарні коригування	Байєсівська оптимізація, нечітка логіка, мультикритеріальна інтеграція
Вихідні результати	Формування остаточного прогнозу, рекомендацій для ТОiP та логістики	Прогнозовані обсяги, графіки заміни, логістичні сценарії	Планування закупівель, оптимізація складу, відповідність нормативам безпеки та ресурсу

Адаптивна система функціонує як послідовна багаторівнева модель, де кожен блок виконує специфічну роль у формуванні точного прогнозу потреби в запасних частинах. Вхідні дані надходять із різних джерел: експлуатаційних журналів, телематичних систем, сенсорних пристроїв, нормативних баз. Ці дані агрегуються та передаються до аналітичних модулів. Аналітична обробка даних здійснюється через три паралельні канали: статистичний аналіз формує базові інтервали заміни; моделювання зношування прогнозує ресурс вузлів; інтелектуальні алгоритми адаптують прогноз до реального стану об'єкта. Результати кожного каналу передаються до адаптаційного блоку. Адаптаційний

блок виконує порівняння прогнозів, коригує їх з урахуванням нормативних обмежень і фактичних умов експлуатації. Застосовуються вагові коефіцієнти, що визначають вплив кожного методу. Формується інтегрований прогноз, який відповідає як технічним, так і регуляторним критеріям. На основі інтегрованого прогнозу генеруються вихідні дані: обсяги потреби в запасних частинах; графіки заміни; рекомендації для планування ТОiP; сценарії оптимізації логістики. Ці результати можуть бути інтегровані в ERP (Enterprise Resource Planning) системи, CMMS платформи (Computerized Maintenance Management System) або передані до управлінських структур.

Потребу в запасних частинах для певної групи деталей у момент часу t можна визначити з виразу

$$D(t) = \alpha \cdot S(t) + \beta \cdot W(t) + \gamma \cdot I(t), \quad (1)$$

де $S(t)$ – статистична оцінка потреби (на основі історичних даних);

$W(t)$ – прогноз за моделями зношування;

$I(t)$ – прогноз інтелектуальної системи (телематика, ML алгоритми);

α, β, γ – вагові коефіцієнти, що визначаються шляхом калібрування моделі (наприклад, методом найменших квадратів або байєсівською оптимізацією).

Додатково вводиться обмеження нормативної відповідності

$$D(t) \geq D_{norm}(t), \quad (2)$$

де $D_{norm}(t)$ – нормативно визначена мінімальна потреба, згідно з чинними стандартами безпеки, технічного обслуговування та регламентами (ISO 55000, UNECE WP.29, ДСТУ тощо).

На основі аналізу сучасних тенденцій у транспортній галузі, нормативно-методичних вимог та технологічних можливостей, сформульовано практичні рекомендації, подані у таблиці 2.

Таблиця 2 – Короткий план впровадження адаптивної моделі на автотранспортному підприємстві

Етап	Опис дій	Очікуваний результат
1. Аудит даних	Аналіз наявної інформації: історія відмов, пробіг, умови експлуатації, нормативи	Формування бази для моделювання та прогнозування
2. Вибір цифрових платформ	Визначення оптимальних ERP/CMMS/ІoT-рішень з урахуванням масштабу підприємства	Підготовка до інтеграції систем управління запасами та ТОiP
3. Розробка адаптивної моделі	Побудова математичної моделі з урахуванням типу транспорту, умов	Створення прогнозного механізму з ваговими

Етап	Опис дій	Очікуваний результат
	експлуатації	коефіцієнтами
4. Інтеграція з цифровими системами	Зв'язок моделі з ERP/CMMS/ІоТ для автоматичного оновлення даних та генерації прогнозів	Динамічне управління потребою в запасних частинах
5. Пілотне впровадження	Тестування моделі на окремій групі транспортних засобів	Верифікація точності прогнозів, корекція параметрів моделі
6. Масштабування та навчання персоналу	Розгортання моделі на весь автопарк, навчання користувачів	Повноцінне функціонування системи, підвищення ефективності ТОiP і логістики

Застосування запропонованої моделі дозволить підприємству перейти від реактивного до проактивного управління запасними частинами, зменшити витрати, підвищити надійність перевезень і відповідність нормативним вимогам.

Висновки

Розвиток транспортних технологій потребує перегляду традиційних методів оцінки потреби в запасних частинах. Замість статичних нормативів слід застосовувати адаптивні моделі, що враховують тип транспортного засобу, технологічну платформу, умови експлуатації та цифрові інструменти управління. Це забезпечує точне прогнозування, оптимізацію витрат і відповідність сучасним вимогам безпеки.

Водночас нормативно-методичне забезпечення залишається ключовою основою ефективного управління. Його розвиток має спиратися на міжнародну гармонізацію, цифрову інтеграцію та ризик-орієнтовані принципи, що гарантують надійність транспортних систем і сприяють сталому розвитку галузі.

Література

1. Zhang S., Huang K., Yuan Y. Spare Parts Inventory Management: A Literature Review. *Sustainability*, 2021, 13(5), 2460. <https://doi.org/10.3390/su13052460>.
2. Volkov V., Volkova T., Kuzhel V., Verkhloshchuk V., Nikiforov N. (2024). Basics of integration of vehicle technical operation system into intelligent transport systems. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 21-30. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.21.
3. Kashkanov A., Moskaliuk M. Uncertainty and its impact on the formation of spare parts inventories to ensuring the efficiency of transport processes. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 2024, 10(2), 74-80. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.74.
4. Bhojani A.H., Gohel D.P. Evaluating Advancements and Identifying Research Gaps in Automotive Spare Parts Demand Forecasting. *Journal of Computer Technology & Applications*, 2024, 15(3), 47-58.

5. Mohanraj E., Eniyavan N., Sidarth S., Sridharan S. Digital Twins for Automotive Predictive Maintenance. International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Lalitpur, Nepal, 2024, 1579-1584, doi: 10.1109/ICICT60155.2024.10544392.

6. Le T.V., Hsu C.L. A systematic literature review of blockchain technology: Security properties, applications and challenges. J Internet Technol, 2021, 22(4), 789-802. <https://doi.org/10.53106/160792642021072204007>.

7. Panchyshyn S., Krupka I., Pushkar T. On the use of modern inventory management methods in international business. Social Development: Economic and Legal Issues, 2025, 3. <https://doi.org/10.70651/3083-6018/2025.3.16>.

8. Кашканов А.А., Москалюк М.Л. Методи обґрунтування запасів запасних частин у системі управління транспортним процесом. Вісник машинобудування та транспорту, 2024, 1(19), 68-74. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-68-74>.

УДК 656.025.4:004.94

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ У РОЗУМНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ

Никончук Вікторія Миколаївна, д.е.н., професор, професор кафедри ТТіТС, Національний університет водного господарства і природокористування, м. Рівне, e-mail: v.m.nykonchuk@nuwm.edu.ua; ORCID:0000-0001-7515-6016

Никончук Софія Андріївна – бакалавр Національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, e-mail: sofiia.nykonchuk@kname.edu.ua

У сучасних умовах цифрової трансформації транспортна галузь потребує впровадження інновацій, які забезпечують ефективність, безпеку та сталість розвитку. Одним із таких рішень є технологія цифрових двійників (Digital Twin) — інтегрована цифрова модель фізичного об'єкта, системи або процесу, що відображає його функціонування у реальному часі.

Для транспортного сектору цифрові двійники відкривають можливості моделювання динаміки руху, прогнозування заторів, ефективного управління інфраструктурою та зменшення екологічного навантаження, що робить їх впровадження актуальним у контексті адаптації транспортної системи України до стандартів розумних міст (Smart City) та інтеграції в європейський цифровий простір.

Тому метою роботи є дослідити можливості застосування цифрових двійників у розумних транспортних системах для підвищення ефективності управління транспортними потоками та логістичними процесами.

Об'єктом дослідження є транспортна інфраструктура міських і міжміських мереж, а також логістичні процеси, що можуть бути моделюванні та оптимізовані за допомогою цифрових двійників.