

УДК 656.073:330.131.7
JEL: L91; O33; R41
DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2026-4-344-353>

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТИСКУ ТА АВТОМАТИЧНОГО НАКАЧУВАННЯ КОЛІСНИХ ШИН ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

©2026 ВОЛІКОВ В. В., ГОРОТЬ А. Я.

УДК 656.073:330.131.7
JEL: L91; O33; R41

Воліков В. В., Гороть А. Я. Оцінка економічної ефективності автономних систем контролю тиску та автоматичного накачування колісних шин транспортних засобів

У статті запропоновано комплексний підхід до економічного обґрунтування впровадження систем TPMS та ATIS для зниження операційних витрат логістичних компаній в умовах високої конкуренції. Метою дослідження є кількісна та якісна оцінка економічної ефективності використання автономних систем моніторингу та накачування шин на вантажному транспорті як інструменту зниження операційних витрат логістичних компаній. Методологія дослідження базується на комплексному підході: системний та структурний аналіз – для вивчення операційних витрат та впливу тиску на показники експлуатації ТЗ; порівняльний аналіз – для оцінки ефективності TPMS та ATIS; економіко-математичне моделювання – для верифікації ефекту через показники паливної економічності та ресурсу шин; інвестиційний аналіз – для оцінки окупності рішень; загальнонаукові методи (індукція, дедукція) – для узагальнення висновків. Встановлено, що використання TPMS/ATIS забезпечує: мінімізацію відхилення тиску в шинах з 1,5 бар до рівня менше 0,1 бар; підвищує енергоефективність руху; запобігає передчасному зносу протектора колісних шин до 17%; запобігає зростанню витрат дизельного пального з базових 30,00 л/100 км до 30,51 л/100 км, що становить на рік 615,16 л (у грошовому еквіваленті в поточних цінах – 54,2 тис. грн) на одну транспортну одиницю. Сукупний економічний ефект від впровадження TPMS/ATIS у базовому сценарії становить 102,849 тис. грн на рік на одну транспортну одиницю. Масштабування цього рішення на рівень автопарку має мультиплікативний характер, що суттєво підвищує рентабельність логістичної діяльності. Результати інвестиційного аналізу підтверджують високу ефективність впровадження TPMS/ATIS. У базовому сценарії період окупності (PP) становить 17 місяців при рентабельності інвестицій (ROI) 71,9%. Оптимістичний сценарій передбачає скорочення терміну окупності до 7 місяців (ROI = 171,4%), а песимістичний укладається в 28,5 місяця (ROI = 32,1%). Наукова новизна роботи полягає у розробленні комплексного методичного підходу, який на відміну від існуючих інтегрує технічні параметри деградації ресурсу шин безпосередньо у фінансові показники ефективності логістичного підприємства. Встановлено стійкість інвестиційної привабливості проєкту навіть у песимістичному сценарії (ROI = 32,1%), що підтверджує доцільність інтеграції TPMS/ATIS. Отримані результати та розроблені практичні рекомендації можуть бути використані стейкхолдерами транспортної галузі для техніко-економічного обґрунтування стратегій модернізації автопарків. Впровадження запропонованого інструментарію дає змогу логістичним компаніям знизити собівартість перевезень, підвищити термін експлуатації активів та зміцнити конкурентні позиції на ринку.

Ключові слова: логістичні витрати; TPMS; ATIS; енергоефективність; ресурс шин; магістральний транспорт; опір коченню.

Табл.: 3. Формул.: 11. Бібл.: 20.

Воліков Володимир Володимирович – кандидат економічних наук, провідний інженер, Інститут монокристалів Національної академії наук України (просп. Науки, 60, Харків, 61072, Україна)

E-mail: valdemar12@meta.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4107-6277>

Гороть Андрій Ярославович – керівник, PRIMARILY LLC (1317 Edgewater dr., #514, Орlando, FL32821, США)

E-mail: horotandriy79@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8715-9752>

UDC 656.073:330.131.7
JEL: L91; O33; R41

Volikov V. V., Horot A. Ya. Economic Efficiency Assessment of Autonomous Tire Pressure Control and Automatic Inflation Systems for Vehicles

The article proposes a comprehensive approach to the economic substantiation of the implementation of TPMS and ATIS systems to reduce operating costs of logistics companies in conditions of high competition. The aim of the study is to quantitatively and qualitatively assess the economic efficiency of using autonomous tire monitoring and inflation systems in freight transport as a tool for reducing operating costs of logistics companies. The research methodology is based on a comprehensive approach: system and structural analysis – to study operating costs and the impact of pressure on vehicle operation indicators; comparative analysis – to assess the effectiveness of TPMS and ATIS; economic and mathematical modeling – to verify the effect through fuel economy and tire life indicators; investment analysis – to assess the payback of decisions; general scientific methods (induction, deduction) – to generalize conclusions. It was found that the use of TPMS/ATIS ensures: minimization of tire pressure deviation from 1.5 bar to a level of less than 0.1 bar; increases energy efficiency of movement; prevents premature tire tread wear by up to 17%; prevents the increase in diesel fuel consumption from the base 30.00 l/100 km to 30.51 l/100 km, which amounts to 615.16 l per year (in monetary equivalent in current prices – UAH 54.2 thousand) per transport unit. The total economic effect of implementing TPMS/ATIS in the baseline scenario is UAH 102.849 thousand per year per transport unit. Scaling this solution to the fleet level is multiplicative in nature, which significantly increases the profitability of logistics activities. The results of the investment analysis confirm the high efficiency of implementing TPMS/ATIS. In the baseline scenario, the payback period (PP) is 17 months with a return on investment (ROI) of 71.9%. The optimistic scenario assumes a reduction in the payback period to 7 months (ROI = 171.4%), and the pessimistic one is invested up to 28.5 months (ROI = 32.1%). The scientific novelty of the work lies in the development of a comprehensive methodological approach, which, unlike existing ones, integrates the technical parameters of tire degradation directly into the financial indicators of the efficiency of the logistics enterprise. The sustainability of the project's investment attractiveness has been established even in the pessimistic scenario (ROI =

32.1%), which confirms the feasibility of integrating TPMS/ATIS. The results obtained and the developed practical recommendations can be used by stakeholders in the transport industry for the feasibility study of fleet modernization strategies. The implementation of the proposed tool allows logistics companies to reduce the cost of transportation, increase the service life of assets and strengthen their competitive positions in the market.

Keywords: logistics costs; TPMS; ATIS; energy efficiency; tire life; highway transport; rolling resistance

Tabl.: 3. Formulae: 11. **Bibl.:** 20.

Volikov Volodymyr V. – PhD (Economics), Leading Engineer, Institute for Single Crystals of National Academy of Sciences of Ukraine (60 Nauky Ave., Kharkiv, 61072, Ukraine)

E-mail: valdemar12@meta.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4107-6277>

Horot Andriy Ya. – Chief, PRIMARILY LLC (1317 Edgewater dr., #514, Orlando, FL32821, USA)

E-mail: horotandriy79@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8715-9752>

У сучасних умовах розвитку транспортно-логістичної галузі та зростання конкуренції автотранспортні підприємства перебувають у безперервному пошуку шляхів оптимізації операційних витрат. Однією з найбільш вагомих статей видатків у структурі утримання автопарку є регулярне відновлення ресурсу ходової частини транспортних засобів (ТЗ). Витрати на заміну зношених деталей складають суттєву частку загального бюджету на технічне обслуговування (ТО), зокрема колісних шин, що піддаються прискореному зношенню в умовах інтенсивної експлуатації та динамічних навантажень.

Витрати на пальне формують основну складову операційних видатків, зменшення яких частково залежить від дотримання нормативних параметрів тиску в шинах. Пріоритетність впровадження інтелектуальних рішень для контролю стану шин розглядається фахівцями як критичний детермінант мінімізації операційних витрат через кореляцію між рівнем тиску в шинах, показниками паливної економічності, зносостійкості гуми та загального рівня безпеки дорожнього руху. За таких обставин перспективним напрямом підвищення ефективності функціонування автотранспортних підприємств є впровадження автономних систем моніторингу (Tire Pressure Monitoring System, TPMS) та накачування шин (Automatic Tire Inflation System, ATIS), які забезпечують автоматичний контроль та підтримання нормативного тиску в режимі реального часу. З огляду на зазначене набуває актуальності обґрунтування економічної доцільності впровадження TPMS/ATIS як інструментів підвищення рентабельності діяльності транспортних підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема підвищення економічної ефективності експлуатації ТЗ у логістичних ланцюгах є предметом глибокого дослідження як вітчизняних, так і зарубіжних вчених та фахівців. Особлива увага в сучасних наукових працях приділяється структурі операційних видатків, де домінують витрати на ТО та пально-мастильні матеріали.

Шляхи підвищення техніко-економічних показників ефективності експлуатації вантажних автомобілів, які пов'язані з експлуатаційною надійністю, розглянуто в роботі І. Шаша та О. Путро [1]. Дослідження Л. Ковалевич [2] підтверджує значну частку витрат на шини в загальній структурі експлуатаційних витрат кар'єрного автотранспорту, демонструючи їх високу чутливість до умов експлуатації та режимів роботи. М. Кусков [3] довів, що стабілізація тиску в шинах дозволяє покращити прямолінійність руху ТЗ, підвищити його тягові показники і знизити питомі експлуатаційні витрати. Результати емпіричних досліджень [4] показали, що стабілізація тиску в шинах у важкому комерційному транспорті зменшує їхній знос та знижує витрати пального на 6,89–8,37%. А. Sharaf [5] обґрунтував, що на м'яких ґрунтах тиск у шинах значно впливає на тягову ефективність і витрати пального. Аналогічні показники в результаті випробувань [6] підтвердили наявність кореляції між тиском у шинах, витратами пального та досягнутими показниками енергоспоживання. Експериментальні значення коефіцієнту опору коченню на різних поверхнях показує його зв'язок із тяговим зусиллям, що безпосередньо впливає на витрати пального [7]. У праці Р. Шевчук та ін. [8] встановлено взаємозв'язок між коефіцієнтом опору коченню шин та курсовою стійкістю, керованістю, прохідністю та паливною економічністю автомобіля. Інші результати експериментальних досліджень підтвердили, що «... в стаціонарних умовах опір коченню змінюється нелінійно з тиском у шинах, тоді як витрата пального змінюється майже лінійно» [9, р. 1459].

Фундаментальні підходи до оцінки економічної ефективності телематичних систем викладено в дисертації Р. Симоненко [10]. Сучасні енерго-ефективні бездротові системи моніторингу шин (Wireless Tire Sensing System, WTSS) працюють в реальному часі та допомагають знизити витрати пального, зменшувати знос шин і підвищувати без-

пеку дорожнього руху [11]. При цьому, трансформація систем моніторингу тиску у цілісні інтелектуальні системи на основі мікроелектромеханічних систем (*Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS*) та хмарної аналітики забезпечує комплексну предиктивну діагностику стану колісних шин в межах єдиної архітектури транспортного засобу [12].

Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених системам моніторингу тиску та автоматичному накачуванню шин, більшість з них зосереджені переважно на технічних характеристиках TPMS та ATIS або аналізі їх впливу на окремі експлуатаційні параметри ТЗ без урахування сукупного економічного ефекту для автопарку. Це зумовлює необхідність розроблення комплексної моделі економічного оцінювання доцільності застосування TPMS та ATIS у логістичних компаніях з урахуванням інтегрального впливу таких систем на економію пального, ресурс шин, витрати на ТО, аварійність та простої транспорту.

Метою дослідження є кількісна та якісна оцінка економічної ефективності використання автономних систем моніторингу та накачування шин на вантажному транспорті як інструменту зниження операційних витрат логістичних компаній.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

1) Проаналізувати вплив стану шин на операційні витрати та ефективність експлуатації автономних систем моніторингу та накачування шин на вантажному транспорті.

2) Розробити економіко-математичну модель оцінювання доцільності впровадження TPMS та ATIS.

3) Обґрунтувати техніко-економічну ефективність рішень та надати практичні рекомендації для стейкхолдерів галузі.

Методологія дослідження базується на комплексному підході: системний та структурний аналіз – для вивчення операційних витрат та впливу тиску на показники експлуатації ТЗ; порівняльний аналіз – для оцінки ефективності систем TPMS та ATIS; економіко-математичне моделювання – для верифікації ефекту через показники паливної економічності та ресурсу шин; інвестиційний аналіз – для оцінки окупності рішень; загальнонаукові методи (індукція, дедукція) – для узагальнення висновків.

Результати. Наукові розвідки, спрямовані на підвищення ефективності експлуатації ТЗ логістичних компаній, демонструють зростаючий інтерес до TPMS та ATIS, що пов'язано з їхнім прямим впливом на витрати пального, ресурс шин, незаплановані простої та безпеку перевезень. Сучасні інтелектуальні датчики здатні автоматично визначати топологію встановлення шин, ідентифікувати у них

механічні пошкодження та критичні навантаження у реальному часі, ініціюючи роботу ATIS, у тому числі надають можливість віддаленого доступу до системи керування для корекції внутрішнього тиску повітря в шинах. Використання цифрових платформ дозволяє диспетчерам оптимізувати профілі швидкості та періоди технічного обслуговування. Наприклад, представлена у 2023 році інтегрована система підкачування шин ActivAir дозволяє регулювати тиск у шинах на ходу для пересічної місцевості, залежно від ландшафту (дороги з твердим покриттям, каміння, пісок, бруд) [12; 13].

Умовно технологічні рішення щодо керування тиском повітря в шинах можна згрупувати за двома конструктивними особливостями: централізовані та децентралізовані системи. Аналіз близько 18 тис. патентів за останні 20 років дозволяє класифікувати розробки систем централізованого підкачування шин за трьома основними векторами, це: програмно-алгоритмічний (автоматизація), конструкторсько-механічний (вузли подачі повітря) та контрольно-діагностичний (моніторинг стану). Такий розподіл патентування забезпечує комплексний захист інтелектуальної власності: від алгоритмічної логіки керування процесами та механічних рішень до діагностичного інструментарію контролю цілісності системи. Технології TPMS/ATIS застосовуються в першу чергу на вантажних та спеціальних ТЗ, де контроль тиску в шинах є визначальним для забезпечення: курсової стійкості, безпеки перевезень, підвищення прохідності та аварійного підкачування. Серед основних власників патентів на ці технологічні рішення є відомі підприємства транспортної галузі такі, як: Dana Corporation, Vehicle Inflation Technologies, AM General, Meritor, Eaton Corporation та ін. [14, с. 290–291].

Отже, слід зазначити, що функціональні можливості TPMS та ATIS мають різний вплив на ефективність експлуатації ТЗ, що і обумовлює доцільність їх комплексного застосування для досягнення максимального ефекту зниження операційних витрат автопарку. Системи моніторингу тиску забезпечують своєчасне інформування водія, що дозволяє знизити ризик поломок, дорожньо-транспортних пригод (ДТП) і непродуктивних витрат пального, однак не усувають відхилення автоматично, що знижує ефективність у випадках несвоечасного реагування. Згідно зі статистикою, близько 70% ДТП трапляється через невідповідність тиску експлуатаційним нормам [15]. Системи автоматичного накачування шин у реальному часі підтримують номінальний тиск, що зменшує опір коченню та забезпечує оптимальну витрату пального і зношення шин [8; 9; 14].

Таким чином, інтеграція TPMS/ATIS надає такі технічні результати: *по-перше*, забезпечується стабільність параметрів роботи шин упродовж усього циклу їхньої експлуатації [14; 15]; *по-друге*, мінімізується коефіцієнт опору коченню та підвищується енергоефективність руху [7; 8]; *по-третє*, досягаються оптимальні витрати пального [4; 5; 9; 11]; *по-четверте*, знижується інтенсивність зношуваності та збільшується ресурс шин [2; 4]; *по-п'яте*, з'являються додаткові ефекти: мінімізація простоїв ТЗ; підвищення безпеки руху; зменшення техногенного навантаження на довкілля [10; 15; 16].

У 2022 році глобальний ринок ATIS оцінювався приблизно в 0,85 млрд дол. США, при цьому за прогнозами його середньорічне зростання очікується на рівні 10% до 2032 року. Фахівці прогнозують такі ключові тенденції це: зростання попиту на важкі ТЗ і сільськогосподарську техніку; глобальне впровадження телематики; підвищення уваги до паливної ефективності; посилення регуляторних вимог; розвиток та впровадження інноваційних технологій [13]. Для підвищення ефективності експлуатації ТЗ та зниження негативних наслідків від ДТП в Європі застосовуються суворі глобальні правила безпеки стосовно шин, спрямовані на підвищення дисципліни щодо їх обслуговування. Так, загальний регламент безпеки II Європейського Союзу вимагає контролю тиску в шинах у всіх нових ТЗ, а додаткові правила Євро-7 встановлюють обмеження щодо зношуваності шин [12].

Витрати на шини становлять 15–20% експлуатаційних бюджетів важких вантажівок. До 95% виходу з ладу шин у рейсі є наслідком порушення нормативного тиску в них. Після встановлення ATIS економія пального у комерційних автопарках досягає до 1,4%, а термін служби шин збільшується на 10%. На думку фахівців, впровадження централізованої системи регулювання тиску від Michelin забезпечує зростання продуктивності на 4% та економію пального на 10%, паралельно зменшуючи глибину ущільнення ґрунту на 33% та енергоємність наступної обробки ріллі [12]. У зв'язку з тим, що навіть незначне відхилення тиску від нормативного рівня може підвищити витрати пального [5], особливого значення інтеграція технологій TPMS/ATIS набуває для провідних логістичних компаній, що забезпечують міжнародні автомобільні перевезення з високою інтенсивністю експлуатації вантажних автомобілів від 400 тис. км до 900 тис. км на рік [1, с. 142], адже при експлуатації вантажного транспорту найбільшою статтею видатків є саме витрати на пальне до 30% [4], що в умовах великих автопарків трансформується в суттєві фінансові втрати.

Крім того, інтеграція TPMS/ATIS у телематичні платформи дозволяє здійснювати централізований моніторинг технічного стану автопарку, підвищуючи ефективність управлінських рішень, що забезпечує перехід від реактивного до превентивного управління технічним станом на основі даних у реальному часі [10; 11; 15]. При цьому синергетичний ефект полягає в оптимізації паливної економічності та подовженні експлуатаційного ресурсу шин, що через цифрову трансформацію процесів гарантує стійке зниження операційних витрат логістичного підприємства [4; 9; 14].

Для обґрунтування економічної доцільності інтеграції технологій TPMS/ATIS застосовано **комплексний методичний підхід**, що базується на поєднанні математичного моделювання деградації ресурсу шин та економічного аналізу багатосценарної окупності інвестицій. Теоретико-методологічну базу для нього становить синтез підходів до оцінювання енергоефективності та експлуатації ТЗ [2; 4; 7; 8; 10], що інтегрує телематичні дані про технічний стан шин [9] у процес прийняття управлінських рішень щодо мінімізації операційних витрат.

Математична модель впливу тиску в шинах на коефіцієнт опору коченню має такий вигляд. Залежність коефіцієнта опору коченню (f_r) від тиску в шині описується узагальненою функціональною залежністю:

$$f_r = f_0 \left(\frac{p_0}{p} \right)^\alpha, \quad (1)$$

де f_r – поточний коефіцієнт опору коченню; f_0 – базовий коефіцієнт опору коченню при номінальному тиску в шині; p_0 – номінальний (рекомендований) тиск в шині; p – фактичний тиск в шині; α – емпіричний коефіцієнт. При зниженні тиску ($p < p_0$) коефіцієнт опору коченню (f_r) зростає, що призводить до перевитрати пального.

Модель розрахунку витрат пального залежно від тиску в шинах має такий вигляд:

$$Q = Q_0 \left(1 + \beta \frac{p_0 - p}{p_0} \right), \quad (2)$$

де Q – фактичні витрати пального; Q_0 – базові витрати; β – коефіцієнт чутливості.

Економіко-математична модель оцінки ефективності впровадження ATIS має такий вигляд:

$$E_t = (Q_{base} - Q_{atis}) \cdot C_f + S_t, \quad (3)$$

де E_t – агрегований показник ефективності за один період (рік); Q_{base} – базові витрати пального транспортним засобом (або автопарку) без використання ATIS; Q_{atis} – фактичні витрати пального після впровадження ATIS; C_f – вартість пального; S_t – економія на зносі шин та обслуговуванні.

Модель економічної ефективності S_t (додаткова річна економія, пов'язана зі зменшенням зношення шин і витрат на їх обслуговування) має такий вигляд:

$$S_t = (C_{u base} - C_{u atis}) + (C_{TO base} - C_{TO atis}), \quad (4)$$

де S_t – економічний ефект (економія) у t -му році експлуатації ATIS; $C_{u base}$ – витрати на заміну шин без використання ATIS; $C_{u atis}$ – витрати на заміну шин після впровадження ATIS; $C_{TO base}$ – витрати на технічне обслуговування шин (регулювання тиску, перевірки) без ATIS; $C_{TO atis}$ – витрати на технічне обслуговування шин після впровадження ATIS.

Для більш точної оцінки ефективності впровадження ATIS, з урахуванням чинників впливу на певне автотранспортне підприємство, модель розширюється додатковим компонентом економії від зменшення простоїв та має такий вигляд:

$$E_t = (C_{u base} - C_{u atis}) + (C_{TO base} - C_{TO atis}) + (C_{downtime base} - C_{downtime atis}), \quad (5)$$

де $C_{downtime base}$ – сукупні витрати, пов'язані з простоями ТЗ без використання ATIS (втрати доходу через невиконані рейси; витрати на аварійні ремонти шин; простої через необхідність перевірки та підкачування шин; непрямі витрати (порушення графіків доставки, штрафи тощо); $C_{downtime atis}$ – сукупні витрати, пов'язані з простоями ТЗ після інтеграції ATIS.

Ця частина економічного ефекту виникає не безпосередньо через витрати на пальне чи шини, а через підвищення експлуатаційної надійності та безперервності роботи логістичного підприємства.

Розрахунок строку окупності (*Payback Period*, *PP*) та рентабельності інвестицій (*ROI*) базується на зіставленні капітальних витрат (*IC*) і щорічної економії (*CF*). Для оцінки ефективності використано дві формули:

$$PP = \frac{IC}{CF}, \quad (6)$$

де *IC* – початкові інвестиційні витрати (вартість системи та монтажу); *CF* – сумарна річна економія.

$$ROI = \frac{CF}{IC} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Запропонований **комплексний методичний підхід** базується на таких припущеннях: 1) експлуатація ТЗ відбувається у стандартних умовах – магістральні перевезення; 2) тиск у шинах має динамічний характер і втрачається поступово протягом тижневого експлуатаційного циклу (7 діб); 3) вартість пального та ТО є сталою протягом розрахункового періоду; 4) ефект від впровадження TPMS і ATIS проявляється переважно через зменшення витрат пального та зменшення зносу шин.

Основні техніко-економічні показники використання ТЗ умовно можна поділити на чотири групи [4]: 1) показники кількісного використання транспорту; 2) показники роботи транспорту на лінії; 3) показники продуктивності ТЗ; 4) вимірники собівартості транспортної роботи.

Відповідно до галузевих досліджень American Transportation Research Institute (ATRI), видатки на експлуатацію вантажного транспорту мають чітко виражену ієрархічну структуру, у якій домінують витрати на пальне (30–35%), оплату праці (30–35%) та технічне обслуговування і ремонт (10–15%). При цьому витрати на шини складають 3–5% загальної структури видатків [17]. Однак, незважаючи на відносно невелику частку витрат на шини, вони мають значний непрямий вплив на інші статті видатків, зокрема на витрати пального та простої транспорту.

Аналіз структури видатків дозволяє виділити прямі та непрямі витрати, пов'язані з експлуатацією шин [2; 10; 17; 18]: 1) *прямі*: придбання шин і ремонт; 2) *непрямі*: збільшення витрат пального, додаткове навантаження на ходову частину ТЗ, зростання частоти ТО, позапланові простої та ремонти, ліквідація аварійних ситуацій.

Для розрахунку економічного ефекту інтеграції TPMS/ATIS було застосовано метод імітаційного моделювання. Вихідними даними для нього використано релевантні галузеві показники з відкритих джерел [1; 2; 4; 6–9; 12; 13; 17–19], а саме: результати експериментальних досліджень, присвячених відхиленню тиску в шинах; прайс-листи та/або комерційні пропозиції виробників (вендорів) обладнання та автомобілів; галузеві аналітичні звіти ринку та поточна середня ціна на дизельне пальне по Україні.

Для проведення розрахунків визначено такий базис. Обрано базову модель магістрального автопоїзда: тягач Volvo FH 460 4x2 (двигун D13K, Euro 6) та триосьовий шторний напівпричіп Schmitz Cargobull S.CS UNIVERSAL (колісна формула 0-3-0). Умови експлуатації: повна вага автопоїзда ≈ 40 т; типовий маршрут – магістральні перевезення; базові витрати пального – 30 л/100 км (за вартістю 88,10 грн/л); середньорічний пробіг ТЗ – 120 000 км; питомі витрати на ТО та ремонт – 7,23–10,30 грн/км. Номінальні параметри пневматичних шин: тягач (передні/ведучі осі): 315/70 R22.5, номінальний тиск $p_0 = 8,5/8,0$ бар; напівпричіп: 385/65 R22.5, номінальний тиск $p_0 = 9,0$ бар. Норми експлуатаційного пробігу шин «MICHELIN» [20]: сидельні тягачі «Вольво» – 175 тис. км, напівпричіп з тентом – 175 тис. км. Моделювання впливу відхилення тиску на опір коченню: визначається коефіцієнт (f_r) при па-

дінні тиску на 10%, 15% та 20%. Зниження тиску в шинах на 1 бар підвищує витрати пального на 2% та зменшує ресурс шини на 20% [18, с. 5]. Початкові інвестиції (вартість системних пакетів) складають \$1500–\$5000 [12], курс перерахунку: 44,00 грн/\$.

Для врахування поступової зміни тиску в шинах протягом тижневого циклу експлуатації (7 діб) застосовано модель лінійної апроксимації, яка передбачає лінійне зростання перевитрати пального в часі. За таких умов середньотижневе значення перевитрати пального (ΔQ) визначається як середнє арифметичне між показниками першого та сьомого днів експлуатації:

$$\Delta Q = \frac{Q_1 + Q_7}{2}, \quad (8)$$

де ΔQ – середньотижневе значення перевитрати пального за один тижневий цикл експлуатації ТЗ; Q_1 – перевитрата пального наприкінці першої доби; Q_7 – пікова перевитрата пального наприкінці сьомої доби.

Результати розрахунку порівняльної ефективності впровадження інтелектуальних систем для автопоїзда Volvo FH наведено в *табл. 1*.

Аналіз результатів моделювання (див. *табл. 1*) свідчить, що впровадження TPMS/ATIS дозволяє стабілізувати тиск у шинах у межах номінальних значень із відхиленням менше 0,1 бар протягом тижневого циклу експлуатації. За рахунок нівелювання лінійного зростання опору коченню досягається зниження середніх витрат дизельного пального для Volvo FH 460 на 0,51 л/100 км, що протягом року забезпечує економію 615,16 л і дозволяє скоротити прямі експлуатаційні витрати за поточними цінами на 54,196 тис. грн за цією статтею видатків.

Базове значення середньотижневої втрати ресурсу пневматичних шин (ΔR) протягом експлуатаційного циклу визначено за формулою:

$$\Delta R = \frac{R_1 + R_7}{2}, \quad (9)$$

де R_1 – втрата ресурсу наприкінці першої доби; R_7 – втрата ресурсу наприкінці сьомої доби.

Для більш детального врахування кумулятивного ефекту подовгої деградації протектора сумарне еквівалентне зношення за тиждень ($\Delta R_{\text{тиж}}$) розраховується шляхом дискретного підсумування щоденних втрат:

$$\Delta R_{\text{тиж}} = \sum_{i=1}^7 l_{\text{день}} \cdot (1 + \Delta p_i \cdot k), \quad (10)$$

де $l_{\text{день}}$ – добовий пробіг ТЗ; Δp_i – падіння тиску в шинах на i -тий день; k – коефіцієнт інтенсивності зносу.

Узагальнення наведеної залежності дозволяє отримати фінальну розрахункову формулу для визначення надлишкових втрат ресурсу ($L_{\text{надл}}$) залежно від тривалості циклу n (демонструє «еквівалентну втрату пробігу»):

$$L_{\text{надл}} = L_{\text{факт}} \cdot \left(\frac{n+1}{2n} \cdot \Delta p_{\text{max}} \cdot k \right), \quad (11)$$

де $L_{\text{факт}}$ – фактичний пробіг за тиждень; n – кількість діб у циклі моніторингу; Δp_{max} – максимальне відхилення (падіння) тиску від номінального значення.

Для кількісної оцінки впливу нестабільного тиску на ресурс шин було проведено моделювання їхнього зносу в межах річного циклу експлуатації. З метою врахування динаміки падіння тиску застосовано коефіцієнт інтенсивності зносу. Порівняння показників зношення шин та амортизаційних витрат на комплект шин (12 од.) до і після впровадження TPMS/ATIS наведено в *табл. 2*.

Аналіз даних (див. *табл. 2*) дозволяє стверджувати, що за умови відсутності TPMS/ATIS фактичний знос шин випереджає реальний пробіг понад 17%, у результаті чого фактичний знос шин еквівалентний пробігу 144,824 тис. км замість 120,000 тис. км. Інтеграція систем інтелектуального моніторингу та підкачування дозволяє зберегти до 30,0 тис. км ресурсу кожної шини, що у фінансовому еквіваленті забезпечує зниження собівартості логістичних послуг на 48,653 тис. грн за рік на одну транспортну одиницю.

Таблиця 1

Експлуатаційні витрати до та після впровадження TPMS/ATIS

№ з/п	Параметри	Сценарій без TPMS/ATIS	Сценарій з TPMS/ATIS	Відхилення
1	Середнє відхилення тиску від норми, бар	1,5	< 0,1	1,4
2	Середня витрата пального, л/100 км	30,51	30,00	0,51
3	Витрата пального за тиждень, л	701,83	690,00	11,83
4	Витрата пального за рік, л	36495,16	35880,00	615,16
5	Видатки на пальне за рік, тис. грн	3215,223	3161,028	54,196

Джерело: розраховано авторами на основі [1; 17–19].

Таблиця 2

Порівняльна оцінка впливу TPMS/ATIS на ресурс шин та амортизаційні витрати вантажного транспортного засобу

№ з/п	Параметри	Сценарій без TPMS/ATIS	Сценарій з TPMS/ATIS	Відхилення (ефект)
1	Середнє відхилення тиску від норми, бар	1,5	< 0,1	1,4
2	Прогнозний ресурс шини, тис. км	145,005	175,000	29,995
3	Еквівалентний знос за тиждень (пробіг 2307 км), км	2785	2307	478
4	Еквівалентний знос шин за рік (пробіг 120 тис. км), тис. км	144,823	120,000	24,823
5	Амортизація витрат на 1 комплект шин за рік, тис. грн	283,853	235,200	48,653

Джерело: розраховано авторами на основі [17–19].

Економічну ефективність інтеграції TPMS/ATIS оцінено на основі даних, отриманих під час попередніх обчислень. Результати розрахунків за трьома сценаріями на один транспортний засіб наведено в *табл. 3*.

Для забезпечення високого ступеня достовірності прогнозів (див. *табл. 3*) було застосовано метод варіації параметрів із симетричним інтервалом $\pm 10\%$. Оптимістичний сценарій враховує додатковий синергетичний ефект. Песимістичний сценарій враховує ймовірні непередбачені операційні витрати. Такий підхід дозволяє визначити діапазон окупності інтеграції TPMS/ATIS від 7 до 28,6 місяців, що підтверджує стійкість економічної моделі до зовнішніх чинників.

Обговорення. Об'єктом моделювання у цьому дослідженні обрано типову середньостатистичну логістичну компанію України, що спеціалізується на внутрішніх та міжнародних вантажних перевезеннях з середнім річним пробігом одного автомобіля 100–120 тис. км, які працюють у сегменті контрактної логістики та експедирування, що відповідає інтенсивній експлуатації на автомагістралях і міжнародних маршрутах. Такий підхід забезпечує репрезентативність висновків, їхню адаптивність до більшості вітчизняних перевізників, уникаючи при цьому використання конфіденційних даних певних суб'єктів господарювання.

Проте в Україні також експлуатуються морально та технічно застарілі автомобілі (наприклад, УАЗ, ГАЗ, ЗІЛ, Урал, КраЗ, МАЗ, КАМАЗ), конструкції яких були розроблені понад 40 років тому і не були суттєво змінені протягом останніх років. При цьому, за оцінкою експертів, витрати на установку TPMS та ATIS на ці ТЗ починається від 88,0 тис. грн, а розрахунковий період окупності складає 4,8 року, що робить установку таких систем економічно не доцільним [14, с. 295].

На основі проведених досліджень перевізникам рекомендується розглядати впровадження TPMS та ATIS як один із пріоритетних інструментів зниження собівартості перевезень. Основним сценарієм для більшості компаній, що експлуатують техніку рівня Volvo FH, має стати базовий варіант із терміном окупності до 17 місяців, що робить інвестицію високоефективною. Основні практичні рекомендації такі:

- ✦ *по-перше*, застосовувати комплексний підхід, що надає можливість досягти найбільшого синергетичного ефекту за одночасного використання TPMS та ATIS, особливо для осей напівпричепа;
- ✦ *по-друге*, для підвищення ефективності управління автопарком доцільним є використання TPMS та ATIS, інтегрованих із телематичними платформами, здатними

Таблиця 3

Сценарії окупності інтеграції TPMS/ATIS на одну транспортну одиницю

Сценарій	ІС, тис. грн	Spік, тис. грн	PP, років	ROI, %
Песимістичний	220,000	92,564 (–10%)	2,38	42,1
Оптимістичний	66,000	113,134 (+10%)	0,58	171,4
Базовий	143,000	102,849 (згідно з розрахунком)	1,39	71,9

Джерело: розраховано авторами на основі [12; 17–19].

передавати дані в режимі реального часу до централізованої системи моніторингу. Це створює передумови для впровадження превентивного технічного обслуговування на основі концепції цифрового двійника транспортного підприємства;

- ✦ *по-третє*, при виборі обладнання необхідно враховувати ціну купівлі, загальну вартість володіння (Total Cost of Ownership, TCO) та наявність сервісної підтримки.

Автори статті звертають увагу на те, що представлені в цій роботі розрахунки та сценарії окупності є результатом наукових досліджень, мають на меті продемонструвати загальний потенціал економічної ефективності TPMS та ATIS і не є готовим бізнес-планом. Для фактичної оцінки економічної доцільності впровадження цих технологій у діяльність певної логістичної компанії потребується доопрацювання розрахунків під реальні конкретного підприємства з урахуванням впливу внутрішніх і зовнішніх чинників.

ВИСНОВКИ

Результати проведених досліджень підтвердили економічну доцільність впровадження автономних систем моніторингу та автоматичного накачування шин у діяльність логістичних компаній. Узагальнення теоретичних положень і результатів моделювання дозволило підтвердити причинно-наслідковий зв'язок між стабілізацією тиску в шинах, зменшенням коефіцієнта опору коченню та зниженням експлуатаційних витрат.

Встановлено, що використання систем TPMS/ATIS забезпечує мінімізацію відхилення тиску в шинах (з 1,5 бар до рівня менше 0,1 бар), що є передумовою для підвищення енергоефективності руху. Результати моделювання підтверджують, що контроль тиску дозволяє запобігти зростанню витрат пального з базових 30,00 л/100 км до 30,51 л/100 км, спричиненому підвищенням опору коченню деформованих шин. Це дозволяє уникнути надлишкового споживання 615,16 л пального на рік, що у грошовому еквіваленті в поточних цінах становить 54,2 тис. грн на одну транспортну одиницю.

Доведено, що підтримання номінального тиску подовжує експлуатаційний ресурс шин, запобігаючи їх передчасному зношенню на 17,2%. У грошовому еквіваленті це забезпечує економію у розмірі 48,653 тис. грн на один комплект (у цінах поточного періоду).

Сукупний економічний ефект від впровадження систем TPMS/ATIS у базовому сценарії становить 102,849 тис. грн на рік на одну транспортну одиницю (за рахунок економії пального та

ресурсу шин). Масштабування цього рішення на рівень автопарку має мультиплікативний характер, що суттєво підвищує рентабельність логістичної діяльності.

Результати інвестиційного аналізу підтверджують високу ефективність впровадження TPMS/ATIS. У базовому сценарії період окупності (PP) становить 17 місяців при рентабельності інвестицій (ROI) 71,9%. Оптимістичний сценарій передбачає скорочення терміну окупності до 7 місяців (ROI = 171,4%), а песимістичний вкладається до 28,5 місяців (ROI = 32,1%), що підтверджує стійку доцільність проекту навіть за несприятливих умов.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що впровадження автономних систем моніторингу та накачування шин є ефективним інструментом зниження операційних витрат логістичних компаній. Найбільший ефект досягається за рахунок комплексного впливу на витрати пального, ресурс шин і надійність експлуатації транспортних засобів. Отримані результати можуть бути використані як методична основа для обґрунтування інвестиційних рішень у сфері управління автопарками. ■

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Шаша І. К., Путро О. О. Шляхи підвищення техніко-економічних показників ефективності експлуатації вантажних автомобілів. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2025. № 1 (45). С. 141–147.
DOI: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2025/1/45/339297>
2. Ковалевич Л. А. Обґрунтування параметрів роботи технологічного транспорту в умовах щелепних кар'єрів : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.03. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. 134 с.
3. Кусков М. А. Підвищення ефективності експлуатації посівного агрегату шляхом покращення його динамічних показників : дис. ... д-ра філософії : 133 Галузеве машинобудування. Харків, 2025. 183 с.
4. Na X., Cebon D. Quantifying fuel-saving benefit of low-rolling-resistance tyres from heavy goods vehicle in-service operations. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2022. Vol. 113. Art. 103501.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103501>
5. Sharaf A. An investigation of tire inflation pressure on fuel consumption for off-road vehicles. *WCX SAE World Congress Experience*. Detroit, 18 April 2023.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2023-01-0751>
6. Haryana K., Arifin Z., Yoga I. N., Purnomo N. W., Naresworo M. Z. The effect of tire pressure on car fuel

- consumption Garuda urban gasoline 19, in the Shell Eco-Marathon competition Asia 2019, Malaysia. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3145. No. 1. Art. 020025. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/3145/1/020025/3304277>
7. Сукач О. О., Худавердян Г. А., Сопець О. В. Результати дослідження коефіцієнтів опору коченню та зчеплення автомобільних шин. *Енергоефективність, екологічність та безпечність автомобіля*. Львів : ЛДУ БЖД, 2024. С. 52–54.
 8. Шевчук Р. С., Сукач О. М., Шевчук В. В. Методика дослідження коефіцієнтів опору коченню та зчеплення автомобільних шин. *Енергоефективність, екологічність та безпечність автомобіля*. Львів : ЛДУ БЖД, 2024. С. 49–51.
 9. Das R. K., Hossain M. A. M., Islam M. T. et al. Effect of tire inflation pressure and wheel front toe angle on fuel consumption of a light-duty vehicle. *International Journal of Automotive Technology*. 2023. Vol. 24. P. 1459–1473. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0118-2>
 10. Симоненко Р. В. Підвищення ефективності експлуатації колісних транспортних засобів на основі інтелектуальних телематичних технологій : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.20. Київ, 2021. 374 с.
 11. Mishra S., Liang J.-M. Design and implementation of energy-efficient wireless tire sensing system with delay analysis for intelligent vehicles. *arXiv preprint*. 2024. arXiv:2405.05757. URL: <https://arxiv.org/html/2405.05757v3>
 12. Automotive Automatic Tire Inflation System Market: Size, Share & Industry Analysis, Growth Trends and Forecasts (2024–2029). *Mordor Intelligence*. 2024. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/automotive-automatic-tire-inflation-system-atis-market>
 13. Automatic Tire Inflation System (ATIS) Market Size – By Type, Vehicle, Distribution Channel & Forecast 2023–2032. *Global Market Insight*. 2023. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/automatic-tire-inflation-system-market>
 14. Просяк О. Л. Системи управління тиском повітря в шинах транспортних засобів: їх конструктивні та функціональні особливості. *Центральнотрапезський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч. I. С. 289–298. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.289-298](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.289-298)
 15. Датчики тиску в шинах TPMS: особливості та переваги. AAC. URL: <https://aac.com.ua/ua/datchiki-tisku-v-shinah-tpms-teyes.html>
 16. What tyre pressure for my car? *Michelin*. URL: <https://www.michelin.co.uk/auto/advice/tyre-pressure/what-tyre-pressure>
 17. Analysis of the Operational Costs of Trucking: 2024 Update. *American Transportation Research Institute (ATRI)*. June 2024. P. 62. URL: <https://truck-ingresearch.org>
 18. Tyres and how they impact fuel consumption: Guide. *Volvo Trucks*. 2019. 7 p. URL: <https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo-trucks/markets/master/home/news/insights/articles/pdfs/2019/oct/how-aerodynamics-and-rolling-resistance-impact-your-trucks-fuel-consumption/Guide-Tyres-and>
 19. Середня ціна на дизельне паливо в Україні. *Мінфін*. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/dt/>
 20. Норми експлуатаційного пробігу автомобільних шин : Наказ Мінтрансу України від 08.12.1997 № 420. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0420361-97#Text>

REFERENCES

- AAC. *Datchyky tysku v shynakh TPMS: osoblyvosti ta perevahy* [TPMS tire pressure sensors: features and benefits]. <https://aac.com.ua/ua/datchiki-tisku-v-shinah-tpms-teyes.html>
- American Transportation Research Institute (ATRI). *Analysis of the Operational Costs of Trucking: 2024 Update*. <https://truck-ingresearch.org>
- Das R. K., Hossain M. A. M. & Islam M. T. et al. (2023). Effect of tire inflation pressure and wheel front toe angle on fuel consumption of a light-duty vehicle. *International Journal of Automotive Technology*, 24, 1459–1473. <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0118-2>
- Global Market Insight. (2023). *Automatic Tire Inflation System (ATIS) Market Size – By Type, Vehicle, Distribution Channel & Forecast 2023–2032*. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/automatic-tire-inflation-system-market>
- Haryana K., Arifin Z., Yoga I. N., Purnomo N. W. & Naresworo M. Z. (2024). The effect of tire pressure on car fuel consumption Garuda urban gasoline 19, in the Shell Eco-Marathon competition Asia 2019, Malaysia. *AIP Conference Proceedings*. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/3145/1/020025/3304277>
- Kovalevych L. A. (2023). *Obgruntuvannia parametriv raboty tekhnologichnoho transportu v umovakh shchebenevykh karieriv*: 05.15.03 [Substantiation of operational parameters of technological transport in the conditions of crushed stone quarries: 05.15.03]. Zhytomyr: Derzhavnyi unyversytet «Zhytomyrska politekhnika».
- Kuskov M. A. (2025). *Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii posivnogo ahrehatu shliakhom pokrashchennia yoho dynamichnykh pokaznykiv*: dys. ... d-ra filosofii: 133 Haluzeve mashynobuduvannia [Increasing the efficiency of sowing unit operation by improving its dynamic performance: PhD thesis: 133 Branch mechanical engineering]. Kharkiv.
- Michelin. *What tyre pressure for my car?* <https://www.michelin.co.uk/auto/advice/tyre-pressure/what-tyre-pressure>
- Minfin. *Serednia tsina na dyzelne palyvo v Ukraini* [Average price of diesel fuel in Ukraine]. <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/dt/>
- Mishra S. & Liang J.-M. (2024). Design and implementation of energy-efficient wireless tire sensing system with delay analysis for intelligent vehicles. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/html/2405.05757v3>

- Mordor Intelligence. (2024). *Automotive Automatic Tire Inflation System Market: Size, Share & Industry Analysis, Growth Trends and Forecasts (2024–2029)*. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/automotive-automatic-tire-inflation-system-atis-market>
- Na X. & Cebon D. (2022). Quantifying fuel-saving benefit of low-rolling-resistance tyres from heavy goods vehicle in-service operations. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, 113, Art. 103501. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103501>
- Prosiak O. L. (2022). Systemy upravlennia tyskom povitria v shynakh transportnykh zasobiv: yikh konstruktyvni ta funktsionalni osoblyvosti [Vehicle tire air pressure control systems: their design and functional features]. *Tsentrálnoukrajinskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, Vyp. 5(36), ch. I, 289–298. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.289-298](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.289-298)
- Sharaf A. (2023). An investigation of tire inflation pressure on fuel consumption for off-road vehicles. *WCX SAE World Congress Experience*. Detroit. <https://doi.org/10.4271/2023-01-0751>
- Shasha I. K. & Putro O. O. (2025). Shliakhy pidvyshchennia tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv efektyvnosti ekspluatatsii vantazhnykh avtomobiliv [Ways to increase technical and economic indicators of the efficiency of commercial vehicle operation]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy*, 1 (45), 141–147. <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2025/1/45/339297>
- Shevchuk R. S., Sukach O. M. & Shevchuk V. V. (2024). Metodyka doslidzhennia koefitsientiv oporu kochenniu ta zcheplennia avtomobilnykh shyn [Methodology for studying rolling resistance and adhesion coefficients of car tires]. *Enerhoefektyvnist, ekolohichnist ta bezpechnist avtomobilia* [Energy efficiency, environmental friendliness and safety of the car] (p. 49–51). Lviv: LDU BZhD.
- Sukach O. O., Khudaverdian H. A. & Sopets O. V. (2024). Rezultaty doslidzhennia koefitsientiv oporu kochenniu ta zcheplennia avtomobilnykh shyn [Results of the study of rolling resistance and adhesion coefficients of car tires]. *Enerhoefektyvnist, ekolohichnist ta bezpechnist avtomobilia* [Energy efficiency, environmental friendliness and safety of the car] (p. 52–54). Lviv: LDU BZhD.
- Symonenko R. V. (2021). *Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii kolisnykh transportnykh zasobiv na osnovi intelektualnykh telematichnykh tekhnolohii: dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.20* [Increasing the efficiency of wheeled vehicles operation based on intelligent telematics technologies: Doctor of Technical Sciences thesis: 05.22.20]. Kyiv.
- Volvo Trucks. (2019). *Tyres and how they impact fuel consumption: Guide*. <https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo-trucks/markets/master/home/news/insights/articles/pdfs/2019/oct/how-aerodynamics-and-rolling-resistance-impact-your-trucks-fuel-consumption/Guide-Tyres-and>
- zakon.rada.gov.ua. (1997, December 8). Normy ekspluatatsiinoho probihu avtomobilnykh shyn: Nakaz Ministransu Ukrainy vid 08.12.1997 № 420 [Operational mileage standards for automobile tires: Order of the Ministry of Transport of Ukraine dated 08.12.1997 No. 420]. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0420361-97#Text>

Стаття надійшла до редакції / Received: 07.04.2026
Статтю прийнято до публікації / Accepted: 20.04.2026
Оприлюднено / Published: 11.06.2026