

УДК 656.13:004.94:004.056

doi: <https://doi.org/10.20998/3083-6298.2026.01.02>Володимир Волюков¹, Ігор Панченко²¹ Інститут монокристалів Національної академії наук України, м. Харків, Україна² Valera Logistics Inc., м. Ірпінь, Україна

ПРЕДИКТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИФРОВОЇ СТІЙКОСТІ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ SMS У ЗАХИЩЕНІ ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ

Анотація. **Актуальність.** У статті обґрунтовано концептуальний підхід до оптимізації логістичних витрат автотранспортних підприємств шляхом інтеграції камерних систем моніторингу (CMS) у цифрові двійники. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю цифрової трансформації логістики та переходу від реактивного до предиктивного управління автопарком в умовах волатильності цін на ресурси та геополітичних ризиків. **Метою роботи** є розробка та апробація науково-методичного підходу до інтелектуального управління логістичними витратами на основі синергії візуальної телеметрії та динамічного моделювання. У ході дослідження використано методи системного аналізу, імітаційного моделювання та експертних оцінок. **Отримані результати.** Сформовано архітектуру цифрового двійника підприємства, де CMS виступає основним джерелом даних про рух, стан транспортних засобів та психофізіологічну поведінку водіїв. Розроблено матрицю предиктивного управління з 13 показників (групи: безпека, експлуатація, економіка). Запропоновано модель, яка враховує не лише внутрішні параметри парку, а й зовнішні детермінанти (ціни на ресурси, метеоумови, регуляторні норми), що дозволяє адаптувати логістичні операції в режимі реального часу. **Висновок.** Результати апробації моделі на основі галузевих даних (2022–2025 рр.) підтвердили економічну ефективність підходу. Встановлено, що впровадження системи забезпечує рентабельність інвестицій (ROI) на рівні 277% при базовому сценарії (окупність 4-6 місяців). Аналіз чутливості за песимістичним сценарієм (відхилення факторів на 10%) продемонстрував стійкість моделі (ROI 134%) та окупність протягом 9 місяців. Практична значущість роботи полягає у наданні конкретних рекомендацій щодо зниження собівартості перевезень, скорочення непланових простоїв та мінімізації ризиків, що сприяє сталому розвитку та інвестиційній привабливості сучасних транспортних підприємств.

Ключові слова: цифровий двійник; CMS; логістичні витрати; предиктивне управління; транспортне підприємство; ROI; оптимізація.

Вступ

Актуальність проблеми. Цифровізація транспортних систем є ключовою детермінантою технологічного оновлення галузі. Транспортні оператори реалізують концепцію Industry 4.0 через синергію сенсорних мереж, телематичних платформ та інструментів обробки великих масивів даних (Big Data), що забезпечує суттєве підвищення ефективності логістичного менеджменту. Однією з перспективних технологій для підвищення ефективності управління автотранспортним підприємством та логістичними процесами є концепція цифрового двійника (Digital Twin, DT) [1, 2]. Джерелом оперативної інформації для DT є сенсорні та візуальні системи транспортних засобів (ТЗ), зокрема камерні системи моніторингу (Camera Monitoring System, CMS), застосування яких забезпечує отримання значних обсягів даних про дорожню ситуацію, поведінку водія, параметри руху та умови експлуатації транспортних засобів. Інтеграція цих даних у віртуальні моделі управління транспортними процесами створює передумови для формування динамічних цифрових двійників логістичних систем [3, 4].

Сучасна цифровізація транспортної галузі та масове впровадження IoT-пристроїв (Internet of Things devices), зокрема камерних систем моніторингу (CMS), створюють нові виклики для інформаційної безпеки критичної інфраструктури. Оскільки цифровий двійник автотранспортного

підприємства (АТП) акумулює значні масиви конфіденційних даних про маршрути, технічний стан засобів та психофізіологічний стан водіїв, питання захисту вбудованих систем від кіберзагроз та забезпечення цілісності телеметричної інформації стають пріоритетними. Отже, розробка предиктивних моделей управління повинна базуватися не лише на критеріях економічної ефективності, а й на принципах цифрової стійкості та надійності каналів обміну даними в умовах зростаючої інтенсивності кібератак.

Попередні дослідження авторів були присвячені комплексному аналізу впровадження інтелектуальних транспортних технологій у діяльність автотранспортних підприємств. На першому етапі [5] було розглянуто економічні передумови впровадження технології CMS на транспорті як альтернативи традиційним дзеркалам. Стратегічному аналізу впровадження камерних систем моніторингу на рухомому складі України присвячено наступний (другий) етап [6], в межах якого із застосуванням методів PEST- та SWOT-аналізу було визначено ключові чинники зовнішнього та внутрішнього середовища, що впливають на поширення цих технологій. Методичний підхід до оцінки інноваційних ризиків інтеграції систем штучного інтелекту (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS/CMS) у діяльність АТП, що дозволяє системно оцінювати технологічні, економічні та організаційні ризики застосування інтелектуальних транспортних систем,

було запропоновано на третьому етапі [7]. Дослідження операційного ефекту інтеграції CMS у систему управління транспортними процесами є логічним продовженням сформованого авторами теоретичного та методичного підґрунтя для впровадження камерних систем моніторингу в транспортній галузі. Саме питання зниження логістичних витрат через інтеграцію камерних систем моніторингу та цифрового двійника визначає актуальність цього дослідження.

Огляд літератури. У сучасних умовах цифрової трансформації економіки одним із важливих напрямів розвитку транспортної галузі є інтеграція інтелектуальних технологій управління, що базуються на використанні сенсорних систем, аналітиці великих даних та алгоритмів штучного інтелекту (ШІ). Особлива увага у наукових розвідках останніх років приділяється концепції DT, яка передбачає створення цифрової моделі фізичного об'єкта або процесу з можливістю синхронізації з реальними експлуатаційними даними, що дає змогу вибудовувати прогностичні моделі та підвищувати ефективність системи.

Інтеграція даних з різних джерел, в тому числі з сенсорних систем ТЗ, телематичних платформ та систем моніторингу інфраструктури забезпечують можливість цифровому двійнику моделювати транспортні процеси, аналізувати експлуатаційні параметри та реалізовувати управлінські рішення в режимі реального часу [8], що сприяє підвищенню ефективності управління логістичними мережами та оптимізації експлуатаційних процесів [2]. Важливим вектором досліджень є використання DT у логістичних системах міста, що дозволяє аналізувати ефективність транспортних операцій та оптимізувати маршрути перевезень. Запропонована в роботі [3] концептуальна модель цифрового двійника для логістики міста передбачає інтеграцію даних транспортних потоків, сенсорних систем та логістичних операцій в єдину інформаційну платформу. Автори [9] також пропонують подібну комплексну структуру для інтеграції DT із системами оптимізації дорожнього руху в режимі реального часу. Обидва підходи [3, 9] забезпечують динамічне регулювання транспортних потоків та зменшують навантаження на транспортну інфраструктуру міста.

Важливим елементом формування цифрових моделей транспортних процесів є сенсорні технології транспортних засобів. Завдяки їхньому розвитку поступово замінюються традиційні дзеркала «заднього виду» на камерні системи моніторингу. Використання CMS дозволяє збільшити поле зору водія до 360°, що позитивно впливає на безпеку дорожнього руху, покращує маневреність та підвищує аеродинамічну ефективність, зменшує витрати палива [10]. Водночас результати експериментальних досліджень свідчать про впливовість CMS на сприйняття дорожньої ситуації водієм та його поведінку під час керування транспортним засобом.

Зокрема, це стосується сприйняття водієм дистанції до інших учасників дорожнього руху та прийняття рішень у процесі руху [11], що підтверджує важливість врахування аспектів ергономічності таких систем при їх застосуванні на сучасних транспортних засобах.

Значний потенціал використання технологій DT наукова спільнота демонструє у публікаціях присвячених транспортно-логістичним системам. Основними напрямками застосування цифрових двійників є прогнозування транспортних потоків, оптимізація маршрутів перевезень, управління комунікаційними активами та підтримка прийняття управлінських рішень у логістичних системах [12]. Крім того, інтеграція технологій інформаційного моделювання будівель (Building Information Modeling, BIM), інтернет речей (Internet of Things, IoT) та штучного інтелекту дозволяє створювати комплексні цифрові моделі моніторингу транспортної інфраструктури для прогнозування її технічного стану та оптимізації процесів експлуатації у міських агломераціях [13].

Отже, аналіз джерел свідчить про активний розвиток технологій DT та сенсорних систем моніторингу транспортних процесів. Водночас у науковій літературі недостатньо дослідженим залишається питання використання CMS як джерела даних для формування DT логістичних процесів АТП, а також оцінки їхнього впливу на оптимізацію логістичних витрат. Це обумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

Метою дослідження є розробка підходу до інтелектуальної оптимізації логістичних витрат автотранспортних підприємств через інтеграцію камерних систем моніторингу (CMS) у цифрові двійники транспортних процесів, що дозволяє підвищити ефективність управління парком автомобілів та забезпечити раціоналізацію маршрутів, скорочення непланових простоїв та зниження експлуатаційних витрат.

Для досягнення мети визначено такі завдання: дослідити технології CMS для моніторингу дорожнього руху, водіїв та технічного стану транспортних засобів; визначити логістичні витрати АТП, що підлягають оптимізації через цифрові моделі; розробити концептуальну модель цифрового двійника АТП на основі даних CMS; обґрунтувати методику оцінки економічного ефекту (паливо, сервіс, простої, дорожньо-транспортні пригоди – ДТП); довести комплексність підходу через зв'язок із попередніми дослідженнями у сфері ADAS/CMS.

Реалізація завдань дозволить сформувати науково обґрунтований підхід до цифровізації АТП та надати практичні рекомендації щодо підвищення ефективності управління.

1. Концепція цифрового двійника

Стрімкий розвиток сучасної транспортно-логістичної системи стимулює запит на інтелектуальний інструментарій для забезпечення інтеграції даних, глибокого аналізу та оптимізації

управління. Однією з таких технологій є концепція цифрового двійника у транспортній галузі, що розглядається як інтегрована цифрова платформа, яка відображає функціонування транспортної інфраструктури, ТЗ та логістичних процесів у реальному часі [1, 2].

У науковій літературі цифровий двійник визначається як динамічна цифрова копія об'єкту або системи, яка створюється на основі реальних даних сенсорних систем, телематики та інформаційних платформ, що дозволяє проводити складний аналіз, прогнозування та оптимізацію фізичного аналога в різних експлуатаційних умовах в режимі реального часу [8, 12]. У контексті транспортних систем цифровий двійник може відображати процеси руху ТЗ та параметри їхнього технічного стану, характеристики транспортних потоків та інші чинники, що впливають на функціонування логістичних мереж. При цьому синхронізація реальних та віртуальних даних забезпечує постійне оновлення цифрової моделі [1], що дозволяє здійснювати моніторинг транспортних процесів та оцінювати результативність управлінських рішень [3]. Важлива роль у формуванні DT належить сенсорним технологіям, зокрема CMS, що забезпечують збір первинних даних, що позитивно впливають на безпеку руху [10]. Також, камерні системи можуть використовуватись як джерело інформації про ситуацію на дорогах, рух ТЗ та поведінку водія [11]. Ці дані мають інтегруватись у віртуальні платформи управління АТП та використовуватись для формування цифрових моделей з подальшим аналізом ефективності логістичних операцій та оптимізації використання ресурсів [12]. На думку фахівців [4, 9] застосування цифрового двійника дозволяє здійснювати прогнози функціонування транспортних систем, розробляти різні сценарії їхнього розвитку та оптимізувати процеси експлуатації. В першу чергу це стосується прогнозування транспортних потоків, оптимізації маршрутів перевезень, оцінки чинників впливу на систему. При цьому створення комплексних систем управління транспортною інфраструктурою на основі інтеграції технологій DT, BIM, IoT та III створює нові можливості для більш точного прогнозування технічного стану транспортних засобів, оптимізації процесів експлуатації та підвищення використання ресурсів [13]. Автори [14] пропонують систему синхронізації виробництва та логістики (Digital Twin-driven Production Line Scheduling System, DT-PLSS) на основі цифрового двійника для SMAS (Satellite Mass Assembly Shop). Також на світовому ринку пропонуються різні технологічні рішення, зокрема для обслуговування мобільного парку транспортних засобів та обладнання в гірничо-добувній галузі [15].

2. Доцільність впровадження інтелектуальних технологій

Результати попередніх досліджень авторів підтверджують доцільність використання камерних систем моніторингу на ТЗ як інноваційного інструменту підвищення безпеки та ефективності транспортних операцій [5]. Крім того, стратегічний аналіз впровадження CMS на транспорті України показав наявність потенціалу інтеграції цих технологій у цифрові системи управління АТП [6]. Запропонований методичний підхід до оцінки ризиків інтеграції систем ADAS/CMS дозволяє враховувати технологічні та організаційні аспекти їх використання у діяльності транспортних підприємств [7]. Результати досліджень інших авторів доводять, що: покращення аеродинаміки за одними даними дає 1,5% економії пального [16], а в іншому джерелі завдяки заміні традиційних дзеркал на камерні системи моніторингу паливна ефективність підвищується до 2-3% [10]. Персональний коуч для водія допомагає скоротити витрати пального до 5% [17]. Комплексне цифрове обслуговування надає перспективу збільшити доступність активів на 5-15%, зменшити витрати на обслуговування на 18-25%, скоротити незаплановані простої на 5-15%, підвищити продуктивність праці на 5-20% [18]. Інші джерела припускають, що інтелектуальні технології зменшують витрати на технічне обслуговування на 20-25%, незаплановані простої на 35-50%, а термін служби обладнання збільшується на 20-40%. Фахівці Razor Labs стверджують, що використання прогнозованого обслуговування на основі штучного інтелекту скорочує незаплановані простої мобільного парку в гірничо-добувній промисловості на 30-50%, подовжуючи при цьому термін служби компонентів [15]. Аналіз Deloitte показує, що витрати на прогнозне обслуговування можуть окупитись за 1-2 роки за рахунок економії, тому близько 51% великих корпорацій у світі ввели його ще до 2021 року [18].

Створення цифрового двійника транспортної системи на базі даних CMS є перспективним напрямком розвитку. Цей вектор дозволяє суттєво підвищити якість управління, удосконалити виробничі процеси, оптимізувати логістику, підвищити ефективність використання ресурсів та скоротити операційні витрати. Одним із головних джерел даних для створення DT є технології CMS, що інтегрують камери, сенсорні модулі, обчислювальні блоки та програмні алгоритми обробки зображень, що дозволяє не лише покращити оглядовість водія, а й формувати масив цифрових даних про функціонування ТЗ (маневрування: зміна смуги руху, повороти, обгони, швидкісні режими та ін.) та дорожню ситуацію [10, 12]. Це має важливе значення для підвищення безпеки дорожнього руху. Встановлені на ТЗ камери фіксують дорожню обстановку, транспортні потоки, знаки та інші об'єкти. Важливим аспектом технологій CMS є можливість фіксації дорожніх умов (стан дорожнього покриття, погодні умови, рівень освітленості тощо) на різних ділянках маршруту ТЗ, особливо це стосується фіксації

ситуацій з підвищеним ризиком (різке гальмування, небезпечне зближення з іншим учасником руху, перешкоди на дорозі, порушення правил дорожнього руху його учасниками тощо). Отримані дані дозволяють аналізувати умови руху, визначати його інтенсивність, оцінювати складність дорожньої ситуації та чинники, що впливають на виникнення аварійних ситуацій [3, 4, 11]. Також, зібрані дані можуть використовуватись для аналізу дорожньої ситуації, інтенсивності потоків та оптимізації маршрутів перевезень [9]. Застосування алгоритмів комп'ютерного зору дозволяє автоматично ідентифікувати об'єкти оточуючого середовища, формувати структуровані дані, готові для подальшого аналізу. Застосування технологій обробки зображень дозволяє автоматично визначати наявність опадів, туману або пошкоджень дорожнього покриття, що може впливати на безпеку та ефективність транспортних перевезень [13]. Таким чином, використання CMS надає можливість:

- 1) оцінити та покращити якість керування ТЗ;
- 2) сформувати інформаційну основу для моделювання ситуації та оптимізації логістичних процесів;
- 3) забезпечити цифрового двійника релевантними даними в режимі реального часу;
- 4) підвищити безпеку дорожнього руху.

3. Інтеграція інтелектуальних технологій

Рівень логістичних витрат, пов'язаних з виконанням транспортних операцій, визначає результативність функціонування АТП, підвищити ефективність яких можливо завдяки інтеграції інтелектуальних технологій в систему управління підприємством. Зібрані дані з CMS у поєднанні з концепцією DT дозволяють створювати цифрові моделі транспортних процесів, аналізувати детермінанти впливу на витрати, пов'язані з перевезеннями, та створювати передумови для оптимізації логістичних процесів. Основні групи чинників, які впливають на витрати транспортних підприємств наступні [1, 3, 9, 10]: 1) технічний стан ТЗ; 2) дорожні (погодні) умови; 3) логістика; 4) поведінка водіїв; 5) вартість пального, ремонту та технічного обслуговування ТЗ. Значну частину у

видатках складає вартість пального, витрати якого залежать від наступних чинників [9]: технічний стан ТЗ, швидкісний режим руху, дорожні умови та стиль керування. Наступна важлива група чинників належить до експлуатації ТЗ [8]: ступінь зносу конструктивних елементів, інтенсивність експлуатації ТЗ, якість дорожнього покриття, вплив зовнішнього середовища, умови руху, якість прогнозування та проведення технічного обслуговування і ремонту ТЗ (дотримання регламентів, запобігання виникненню технічних поломок). Значний вплив на витрати складає група чинників пов'язаних з неплановим простоєм ТЗ, до них належать [3]: затори на дорогах, несприятливі погодні умови, наслідки аварій, евакуації ТЗ з міст ДТП, поломки та не заплановані ремонти ТЗ (особливо під час здійснення перевезень, на маршруті). Наступна група це економіко-правові чинники [4]: страхові полюси, видатки на відшкодування наслідків ДТП і т.ін. Отже, логістичні витрати АТП мають складну структуру та залежать від багатьох чинників, пов'язаних з організацією транспортних процесів і технічним станом ТЗ.

Основний механізм впливу на підвищення ефективності діяльності автотранспортних підприємств реалізовується через інтеграцію CMS та цифрового двійника в систему управління, що пов'язано з можливістю використання отриманих візуальних даних в режимі реального часу. На основі проведеного синтезу джерел [1, 3, 9, 10, 12, 19, 20], авторами представлено логістичні витрати АТП через сукупність взаємопов'язаних чинників та відповідних економічних ефектів (табл. 1).

Запропонована матриця (табл. 1) демонструє логіку переходу від фізичного рівня (камери/огляд) через процесний рівень (керування/ремонт) до фінансового результату (прибуток). Цифровий двійник виконує роль «мозку», який об'єднує дані з CMS та перетворює їх на управлінські рішення.

Таблиця 1 – Матриця предиктивного управління ефективністю АТП на основі інтеграції CMS та цифрового двійника*

Ідентифікатор (ID)	Чинники	Вплив інтеграції CMS та цифрового двійника
1. Показники безпеки та ризиків - S (Safety)		
S1	Покращення оглядовості	Ліквідація «сліпих зон»; стабільність видимості незалежно від погодних умов; зменшення витрат на ліквідацію наслідків ДТП.
S2	Аналіз стану та поведінки водія	Зменшення кількості ДТП; оптимізація фонду оплати праці та мотивації; економія палива; зменшення незапланованих ремонтів ТЗ; амортизація ТЗ; доказова база при інцидентах; точність планування графіків роботи водіїв.
S3	Аналіз дорожніх ситуацій та ADAS	Чотири ключові ефекти: фінансовий (оптимізація витрат на страхування, ремонт), управлінський (оптимізація маршрутів перевезення, рейтинг водіїв та перепідготовка персоналу), безпековий (зниження психологічного навантаження, доказова база при інцидентах, стиль водіння ТЗ) та операційний (точність часу доставки).
S4	Прогнозування ризиків	Зменшення простоїв ТЗ; зменшення кількості ДТП та збитків від них; стабільність логістичних ланцюгів; оптимізація страхових витрат; продовження життєвого циклу активів; покращення репутації бренду; моделювання сценаріїв;

Ідентифікатор (ID)	Чинники	Вплив інтеграції CMS та цифрового двійника
		управління ліквідністю автомобільного парку.
2. Показники експлуатації - O (Operational)		
O1	Коефіцієнт аеродинамічного опору	Зменшення витрат пального та викидів CO ₂ ; зниження рівня шуму від завихрень потоків повітря (знижує акустичну втому водія); зниження навантаження на систему охолодження та двигун.
O2	Час виконання маневрів	Швидкість паркування та маневреність в обмеженому просторі; зменшення ризиків пошкодження ТЗ під час маневрування; динамічне панорумування під час поворотів; скорочення простоїв у логістичних хабах.
O3	Індекс технічного стану вузлів	Оперативне проведення технічного огляду ТЗ без відвідування ремонтних майстерень (дистанційний моніторинг); визначення реального зносу агрегатів під час експлуатації (збільшує інтервали між сервісним обслуговуванням без втрати безпеки); зменшення простоїв ТЗ через неплановані ремонти; автоматизація замовлення запасних частин; збереження залишкової вартості ТЗ; автоматичне формування плану сервісного обслуговування та ремонту.
O4	Показник завантаження та цілісності вантажу	Максимальне ущільнення завантаження; миттєва реакція на пошкодження вантажу під час руху ТЗ; контроль несанкціонованого доступу; зниження собівартості перевезень.
3. Економіко-правові показники - E (Economic & Legal)		
E1	Зниження страхових витрат	Мінімальні тарифи на страхування; зниження витрат на страхові франшизи; прискорення страхових виплат; мінімальні витрати на юридичні послуги.
E2	Показник доказової бази при інцидентах	Доказова база для суду чи страхової компанії; мінімальні витрати на штрафи та судові витрати; захист від шахрайства та неправдивих свідчень; скорочення адміністративних витрат на внутрішнє розслідування.
E3	Оптимізація амортизаційних відрахувань	Перехід від лінійної до фактичної амортизації; управління залишковою вартістю; оптимізація податкового навантаження; обґрунтоване планування інвестицій.
E4	Показник відповідності регуляторним нормам	Автоматичний контроль за режимом роботи та відпочинку водія; точний розрахунок викидів CO ₂ ; уникнення штрафів за порушення нормативної бази; підвищення інвестиційної привабливості підприємства.
E5	Чистий прибуток на кілометр пробігу	Демонструє реальну рентабельність певного ТЗ та маршруту; дозволяє відмовитись від збиткових маршрутів та масштабувати найбільш прибуткові.
4. Показники зовнішнього середовища - E (External)		
X1	Кон'юнктура ринка	Динаміка цін на паливо та запчастини; актуальні ставки фрахту; вартість ремонту, сервісного обслуговування та страхування.
X2	Інфраструктура та природні умови	Метеоумови; затори; стан дорожнього покриття на маршруті.
X3	Регуляторне поле	Зміни у законодавстві; оподаткування; митні правила.
X4	Фінансове середовище	Середні ринкові ставки за кредитами, лізингом та страхуванням.

Примітка: показник E5 (чистий прибуток на кілометр пробігу) є цільовою функцією моделі, значення якої залежить від синергії внутрішніх та зовнішніх факторів: $E5 = f(S_{1..4}, O_{1..4}, E_{1..4}, X_{1..4})$, де $S_{1..4}$ - показники безпеки та мінімізації ризиків; $O_{1..4}$ - показники операційної ефективності та експлуатації; $E_{1..4}$ - економіко-правові показники оптимізації витрат; $X_{1..4}$ - коригувальні коефіцієнти зовнішнього середовища.

4. Модель формування цифрового двійника

Наступним кроком є розробка моделі формування цифрового двійника логістичної системи АТП, в основу якої покладено матрицю предиктивного управління (табл. 1). Цей інструментарій забезпечує перехід від реактивного адміністрування до проактивного менеджменту, де дані CMS у реальному часі синхронізуються з віртуальною моделлю підприємства. Це дозволяє не лише фіксувати поточний стан активів, а й прогнозувати ризики, оптимізувати експлуатаційні витрати та моделювати фінансові результати ще до моменту виникнення критичних ситуацій. У межах забезпечення цифрової стійкості системи на першому рівні архітектури передбачено шифрування телеметричного потоку безпосередньо в модулі CMS, що дозволяє запобігти перехопленню даних та реалізації атак типу Man-in-the-Middle під час їх передачі до аналітичного ядра. На рівні

управління впроваджено механізм багатофакторної автентифікації для доступу диспетчерського персоналу до інтерфейсу цифрового двійника, що у поєднанні з протоколами логування дій користувачів дозволяє мінімізувати ризики несанкціонованого втручання в логістичні команди та гарантувати цілісність управлінських імпульсів у критичних ситуаціях.

Комплексна модель цифрового двійника АТП.

Рівень 1. Генерація даних.

Джерела первинної інформації: CMS; бортова телеметрія ТЗ; геопозиціонування.

Захист даних. Шифрування телеметричного потоку безпосередньо в модулі CMS для запобігання перехопленню даних (Man-in-the-Middle attack).

Рівень 2. Зовнішнє середовище.

Чинники: X1-X4.

Рівень 3. Аналітичне ядро.

Матриця предиктивного управління: синхронізація; предиктивна аналітика (Ш); віртуальне тестування.

Рівень 4. Управління.

Перетворення прогнозів у певні дії, що передбачає: НМІ-інтерфейс; диспетчерський контроль; технічний менеджмент.

Захист даних. Двофакторна автентифікація для доступу диспетчерів до системи управління.

Рівень 5. Економічний результат.

Мета функціонування моделі: максимізація показника E5; економічна стійкість; ринкова перевага.

Комплексна модель цифрового двійника транспортного підприємства має п'ятирівневу архітектуру, що включає рівень збору даних (P1), рівень зовнішнього контексту (P2), аналітичне ядро (P3), рівень управління (P4) та рівень економічного результату (P5).

Логіка роботи моделі: система працює за циклом: P1 + P2 → P3 → P4 → P5.

Такий підхід дозволяє забезпечити безперервний цикл обробки інформації від моменту її генерації сенсорними системами до формування управлінських рішень та отримання економічного ефекту. Цифровий двійник виступає інтегратором, який отримує дані з CMS та коригує бізнес-процеси відповідно до ринкових змін у реальному часі. Ця модель надає можливість візуалізувати шлях трансформації «сирих» даних із CMS у стратегічний прибуток.

5. Оцінка економічної ефективності інтеграції цифрового двійника АТП

5.1. Методологічні засади оцінки.

Економічний ефект від впровадження системи предиктивного управління базується на порівняльному аналізі витрат АТП «до» та «після» інтеграції цифрового двійника та CMS. Оцінка проводиться за інтегральним показником сукупного економічного ефекту ($EE_{ЗАГ}$).

5.2. Розрахунок сукупного економічного ефекту.

5.2.1. Загальна сума річної економії формується як синергія чотирьох ключових векторів оптимізації:

$$EE_{ЗАГ} = (\Delta E_{нал} + \Delta E_{ТО} + \Delta E_{ВМП} + \Delta E_{рвз}) - IC \quad (2)$$

де: $\Delta E_{нал}$ – економія витрат на паливо; $\Delta E_{ТО}$ – економія витрат на технічне обслуговування ТЗ; $\Delta E_{ВМП}$ – мінімізація збитків від непланових простоїв; $\Delta E_{рвз}$ – зниження витрат на страхові премії, штрафи, відшкодування наслідків ДТП, відновлення ТЗ; IC – інвестиції на впровадження та підтримку цифрового двійника (Investment Cost, IC).

5.2.2. Економія пального ($\Delta E_{нал}$) – базується на синергії показників O1 (аеродинаміка) та S3 (стиль водіння).

$$\Delta E_{нал} = P_{ц} * L_{проб} * (q_1 - q_2) \quad (3)$$

де: $P_{ц}$ – ціна палива (X1); q_1, q_2 – питома витрата палива до та після впровадження; $L_{проб}$ – реальний пробіг транспортного засобу за період часу (км/рік).

5.2.3. Економія на технічному обслуговуванні та ремонтах ($\Delta E_{ТО}$) – базується на показнику O3. Розрахунок економії завдяки переходу від регламентного ТО до обслуговування за реальним станом, що передбачає збільшення міжсервісного інтервалу та зменшення витрат на передчасну заміну запчастин, з надлишковим ресурсом без загрози для безпеки експлуатації.

$$\Delta E_{ТО} = (C_{ТО1} - C_{ТО2}) \quad (4)$$

де: $C_{ТО1}$ – витрати на ТО до впровадження ДТ; $C_{ТО2}$ – витрати на ТО після впровадження ДТ.

5.2.4. Мінімізація збитків від простоїв ($\Delta E_{ВМП}$), передбачає оцінку втраченого прибутку через непланований ремонт. Пов'язано з показниками O3.

$$\Delta E_{ВМП} = \Delta T_{stop} * Pr \quad (5)$$

де: ΔT_{stop} – кількість годин скорочення позапланових простоїв; Pr – актуальна ціна фрахту за годину.

5.2.5. Оптимізація витрат на ризики та ДТП ($\Delta E_{рвз}$). Баується на показниках S1–S4, E1–E2. Прямая економія на страхових преміях, юридичних послугах, відсутності штрафів та витратах на відновлення техніки.

$$\Delta E_{рвз} = (C_{ДТП1} - C_{ДТП2}) + (C_{страх1} - C_{страх2}) + (C_{штраф1} - C_{штраф2}) + \dots + (C_{рем1} - C_{рем2}) \quad (6)$$

де: $C_{ДТП}$ – витрати, пов'язані з ліквідацією наслідків ДТП; $C_{страх}$ – витрати на страхування; $C_{штраф}$ – витрати на штрафи; $C_{рем}$ – витрати на відновлення техніки.

Показники з індексом 1 характеризують витрати до впровадження ДТ, а з індексом 2 – витрати після його інтеграції в систему управління АТП.

5.3. Показник рентабельності інвестицій (Return on Investment, ROI).

Для оцінки економічної доцільності впровадження цифрового двійника АТП застосовується показник рентабельності інвестицій (ROI), який характеризує співвідношення отриманого економічного ефекту до обсягу інвестицій, необхідних для створення та підтримки системи.

$$ROI = \frac{EE_{ЗАГ}}{IC} \quad (7)$$

де: $EE_{ЗАГ}$ – загальний економічний ефект від впровадження цифрового двійника; IC – інвестиції на його впровадження та підтримку.

Критерії оцінки ROI: ROI>1 – проект економічно доцільний; ROI=1 – точка беззбитковості; ROI<1 – інвестиції економічно неефективні.

5.4. Період окупності проекту (Payback Period, PP).

Показник (PP) визначає термін, за який зекономлені кошти повністю повертають початкові інвестиції:

$$PP = \frac{IC}{EE_{заг}} \quad (8)$$

Проект вважається високоефективним, якщо не перевищує нормативний термін окупності для IT-інновацій у логістиці (зазвичай 1,5–2,5 роки).

5.5. Врахування чинників зовнішнього середовища (X1-X4).

Фінальний розрахунок коригується з урахуванням динаміки зовнішнього середовища:

$$E5_{\text{фінал}} = EE_{заг} * k(X_{1..4}) \quad (9)$$

де: $k(X)$ - коефіцієнти впливу цін на пальне, запасні частини, ремонт та сервісне обслуговування ТЗ, погодних умов і змін у законодавстві, що інтегровані у модель предиктивного управління.

Таким чином, впровадження цифрового двійника на базі CMS дозволяє перетворити систему безпеки на інструмент генерації прибутку. Основним драйвером ефективності є перехід від реактивного усунення наслідків до предиктивного запобігання втратам, що забезпечує сталий розвиток транспортного підприємства у довгостроковій перспективі.

Обговорення результатів

Для апробації Методичного підходу до оцінки економічної ефективності інтеграції цифрового двійника АТП на базі CMS було застосовано метод імітаційного моделювання. Вихідними даними для нього використано релевантні галузеві показники з відкритих джерел [1, 16-21], а саме: прайс-листи та/або комерційні пропозиції виробників (вендорів) обладнання; витрати на усунення наслідків ДТП; результати досліджень щодо використання предиктивної діагностики та галузеві аналітичні

звіти ринку. Для проведення розрахунків визначено наступний базис.

1. Початкові інвестиційні витрати (IC): вартість обладнання, монтаж, ліцензійне програмне забезпечення (ПЗ) та навчання персоналу.

2. Операційні витрати: технічне обслуговування, гарантійний сервіс та оновлення ПЗ / підписки.

3. Прогнозована економія: оптимізація витрат палива, скорочення витрат на технічне обслуговування, мінімізація простоїв, збитків та страхових виплат.

4. Параметри одного транспортного засобу: середньорічний пробіг – 120 000 км; питомі витрати на технічне обслуговування та ремонт – 0,15–0,20 €/км; базові витрати пального 27 л/100 км (за вартістю 1,35 €/л). Прогнозований сукупний ефект економії пального в моделі варіюється в межах 4,0–6,5% залежно від сценарію, що враховує синергію покращення аеродинаміки та предиктивної корекції стилю водіння водія.

Результати розрахунків за трьома сценаріями на один транспортний засіб наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Сценарії вигоди на один транспортний засіб

Сценарій	IC, €	EE _{заг}				PP, років	ROI, %
		ΔE _{пал} , €	ΔE _{ТО} , €	ΔE _{вмп} , €	ΔE _{риз} , €		
Песимістичний	5000	1750	3600	800	2090	0,61	165
Оптимістичний	2700	2340	4350	1100	2610	0,26	385
Базовий	3400	2075	4080	900	2350	0,36	277

За результатами розрахунків (табл. 2) строк простої окупності початкових інвестицій за трьома сценаріями не перевищує одного року (0,61; 0,26; 0,36), що свідчить про економічну доцільність впровадження цифрового двійника у діяльність транспортного підприємства. Аналіз чутливості впливу на ROI було зроблено для ключових змін песимістичного сценарію (табл. 3).

Проведений аналіз чутливості (табл. 3) підтверджує високу інвестиційну стійкість проекту, оскільки навіть за кумулятивного впливу негативних чинників показник ROI залишається на рівні 134%, що гарантує повну окупність системи протягом 9 місяців.

Таблиця 3 – Результати аналізу чутливості

№ з/п	Зміна	Песимістичний базове значення, €	%	Песимістичний зі змінами, €	Абсолютна зміна, €	Ранг чутливості
1	IC	5 000	+10	5 500	500	1
2	ΔE _{ТО}	3 600	-10	3 240	-360	2
3	ΔE _{риз}	2 090	-10	1 881	-209	3
4	ΔE _{пал}	1 750	-10	1 575	-175	4
5	ΔE _{вмп}	800	-10	720	-80	5

За результатами проведених розрахунків доцільно рекомендувати впровадження запропонованої системи, оскільки отримане

значення рентабельності інвестицій (ROI ≈ 1,34) та високий рівень стійкості моделі забезпечують гарантоване повернення вкладеного капіталу навіть

за умов несприятливої ринкової кон'юнктури. Основну увагу на етапі реалізації варто зосередити на фінансовому контролі вартості закупівлі (IC) та точності предиктивних алгоритмів, як найбільш чутливих детермінант прибутку.

Практичні рекомендації щодо впровадження предиктивного управління АТП полягають в наступному.

1. Етап стратегічного планування та аудиту (Ранг 1: Контроль IC).

Вибір технологічного стеку. Пріоритет слід надавати системам CMS, що мають відкриті протоколи передачі даних для безшовної інтеграції з існуючими ERP-системами. Це дозволить мінімізувати інвестиційні витрати (IC) на етапі розробки програмного ядра цифрового двійника.

Додаткове оснащення на етапах інтеграції. Рекомендується починати впровадження з найбільш інтенсивно експлуатованих одиниць флоту, де ефект економії пального та зниження зносу буде максимальним. Пілотне впровадження на 10–15 % флоту (найінтенсивніші одиниці з пробігом понад 120 тис. км/рік) дозволить отримати перші дані для калібрування цифрового двійника вже за 2–3 місяці та підтвердити економічний ефект до повномасштабного розгортання.

2. Налаштування аналітичного ядра (Ранг 2: Точність).

Калібрування матриці показників. Необхідно адаптувати систему показників S1–E5, розроблену авторами під специфіку певних маршрутів. Особливу увагу приділити показнику O3 (індекс технічного стану), налаштувавши алгоритми на виявлення критичних відмов за 500–1000 км до їх імовірного виникнення.

Інтеграція «поведінкового шару». Використовувати дані CMS для корекції стилю водіння (S3), що, за результатами моделювання, забезпечує стабільну економію пального на рівні 3–5%.

3. Операційне управління та моніторинг (ΔЕпал, ΔЕриз, ΔЕвміТ).

Перехід до PdM-стратегії. Перехід до прогнозного обслуговування (PdM) на базі цифрового двійника дозволить подовжити життєвий цикл вузлів на 15–20 %, зменшити непланові простої на 20–50 % (за даними галузевих звітів 2022-2026 рр.) та уникнути втрат у розмірі 400–600 EUR/доба (залежно від типу перевезень) за кожне авто. Рекомендується впровадити автоматичні сповіщення в ERP-системі про наближення критичних подій.

Робота зі страховим сектором. Використовувати верифіковані дані цифрового двійника про зниження аварійності як інструмент для отримання дисконту на страхування та зниження страхових премій. Це додатково підвищить економічний ефект за показником E1.

4. Фінансовий контроль та аналіз стійкості.

Моніторинг ROI в реальному часі. Впровадити автоматизований розрахунок рентабельності

інвестицій на основі фактичних даних економії. Рекомендується впровадити автоматизований «дашборд» у ERP (або окремому модулі цифрового двійника), який щоденно/щотижня перераховує фактичний ROI та ΔЕпал на основі даних CAN-шини, що дозволяє оперативного коригувати параметри.

Хеджування ризиків. Враховувати результати аналізу чутливості: при зростанні цін на пальне та запчастини на 10%, актуальність використання цифрового двійника зростає, що робить його ефективним інструментом захисту від інфляційних шоків.

Резюме для керівництва АТП. Впровадження запропонованого підходу забезпечує термін окупності інвестицій на рівні 6,5–9 місяців, що свідчить про високу економічну ефективність цифрового двійника автотранспортного підприємства. Ключовим фактором успіху є синергія технічних можливостей камерних систем моніторингу та аналітичного потенціалу цифрового двійника, що дозволяє трансформувати підвищення безпеки руху у фінансовий результат. Загальний очікуваний річний економічний ефект для парку з 50 транспортних засобів (тягачів) становить понад 150 тис. EUR (з урахуванням економії пального, технічного обслуговування, простоїв та страхування), що підтверджує трансформацію безпеки руху в прямий економічний прибуток підприємства та конкурентну перевагу на ринку автотранспортних послуг.

Автори наголошують, що викладені рекомендації мають концептуальний характер і не можуть слугувати підставою для безпосереднього впровадження без розробки повноцінного техніко-економічного обґрунтування з урахуванням специфіки певного автотранспортного підприємства.

Висновки

У статті розроблено та обґрунтовано комплексний підхід до оптимізації логістичних витрат автотранспортних підприємств через інтеграцію камерних систем моніторингу (CMS) у цифрові двійники транспортних процесів. Проведене дослідження дозволило отримати такі ключові наукові та практичні результати.

Сформовано архітектуру цифрового двійника АТП, яка використовує CMS як основне джерело візуальної телеметрії для предиктивного аналізу технічного стану транспортних засобів та поведінки водіїв.

Розроблено матрицю предиктивного управління, що об'єднує 13 ключових показників у систему підтримки прийняття рішень і забезпечує перехід від реактивного до проактивного менеджменту.

Доведено економічну ефективність запропонованого підходу шляхом апробації на імітаційних моделях: встановлено, що синергія технічних рішень забезпечує ROI на рівні 277% на

рік (базовий сценарій) із періодом окупності інвестицій 4-6 місяців.

Підтверджено стійкість моделі: аналіз чутливості за песимістичним сценарієм показав, що навіть при негативному відхиленні ключових параметрів на 10%, проєкт зберігає високу рентабельність (ROI 134%), що робить його надійним інструментом цифровізації в умовах ринкової волатильності.

Практична реалізація запропонованих рекомендацій забезпечує оптимізацію маршрутів, скорочення непланових простоїв та суттєве зниження експлуатаційних витрат, що є критично важливим для підвищення конкурентоспроможності сучасних логістичних систем.

Окремим аспектом стійкості запропонованої моделі є забезпечення кібербезпеки вбудованих систем (IoT) та захист каналів передачі візуальної телеметрії від CMS до аналітичного ядра цифрового двійника. Впровадження предиктивного управління логістичними процесами АТП потребує застосування методів криптографічного захисту даних та алгоритмів виявлення аномалій у мережевому трафіку для запобігання несанкціонованому доступу до систем керування автопарком. Це дозволяє розглядати цифровий двійник не лише як інструмент економічної оптимізації, а й як елемент безпеки критичної інфраструктури, що забезпечує цілісність та конфіденційність інформаційних потоків у системі інтелектуального транспорту.

REFERENCES

1. Werbińska-Wojciechowska, S., Giel, R. and Winiarska, K. (2024), "Digital Twin Approach for Operation and Maintenance of Transportation System—Systematic Review", *Sensors*, Vol. 24(18):6069, <https://doi.org/10.3390/s24186069>
2. Yan, B., Yang, F., Qiu, S. et al. (2023), "Digital twin in Transportation Infrastructure management: A systematic review", *Intelligent Transportation Infrastructure 2*, DOI:10.1093/iti/liad024
3. Belfadel A., Hörl S., Tapia R. J. et al. (2023), "A conceptual digital twin framework for city logistics", *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 103, <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.101989>
4. Enyejo J. O., Fajana O. P., Jok I. S. et al. (2024), "Digital Twin Technology, Predictive Analytics, and Sustainable Project Management in Global Supply Chains for Risk Mitigation, Optimization, and Carbon Footprint Reduction through Green Initiatives", *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, Vol. 9, iss.11, pp. 609-630, <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24NOV1344>
5. Volikov, V. and Panchenko, I. (2025), "The Economic Feasibility of Implementing Optical Surveillance Systems in Vehicles: Between Innovative Necessity and Economic Excess", *Business Inform*, Vol. 10:325–333, <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2025-10-325-333>
6. Volikov, V. and Panchenko, I. (2025), "Strategic analysis of the implementation of camera monitoring systems (CMS) in Ukrainian transport (PEST and SWOT)", *Modeling the development of the economic systems*, Vol. (4), pp. 225–233, <https://doi.org/10.31891/mdes/2025-18-28>
7. Volikov, V. and Panchenko, I. (2025), "Methodological approach to the assessment of innovation risks in the integration of AI systems (ADAS/CMS) into the operations of transport enterprises", *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, Vol. 348(6), pp. 423-431, <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-348-6-1>
8. Wang, W., Zaheer, Q., Qiu, S. et al. (2023), "Digital Twin Technologies in Transportation Infrastructure Management". URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-99-5804-7>
9. Lis, M. and Mądział, M. (2026), "Green Transportation Planning for Smart Cities: Digital Twins and Real-Time Traffic Optimization in Urban Mobility Networks", *Applied Sciences*, Vol. 16(2), <https://doi.org/10.3390/app16020678>
10. Moore, A., Yuan, J., Ou, S. et al. (2023), "Key Considerations in Assessing the Safety and Performance of Camera-Based Mirror Systems", *Safety*, Vol. 9(4), <https://doi.org/10.3390/safety9040073>
11. Pang, Y., Li, H., Ma, S. et al. (2024), "The impact of camera-monitor system viewing angles on drivers' distance perception: A simulated driving study", *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 104, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2024.103657>
12. Galkin, A., Samchuk, G., Kopytkov, D. et al. (2025), "Digital twins in logistics: a comprehensive bibliometric analysis for advancing smart cities and sustainable development", *Discov Sustain*, Vol. 6, <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01754-0>
13. Kornilova, Z. (2025), "Digital twin roadways: integrating BIM, IOT and AI for intelligent infrastructure management". *European Science*, Vol. 3, <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2025-41-03>
14. Liu, W., Zou, X., Wen, Z. et al. (2024), "Digital Twin-Based Production-Logistics Synchronization System for Satellite Mass Assembly Shop-Floor", *Chin. J. Mech. Eng.*, Vol. 37, <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01148-9>
15. How AI Is Changing Mining Fleet Management (2026), *Razor Labs*. URL: <https://www.razor-labs.com/predictive-maintenance-haul-trucks-ai/>
16. Economy from good aerodynamics: the new Actros is trimmed for efficiency (2024), *Daimler Truck Global Media*. URL: <https://www.daimlertruck.com>
17. Save up to 5% fuel and keep it there. Fuel Advice (2024), *Volvo Trucks Global*. URL: www.volvotrucks.com
18. Nagy, M., Valaskova, K. and Lazaroiu, G. (2026), "Digitalization-Based Predictive Maintenance Systems, Internet of Things Sensor Networks, and Machine Intelligence Algorithms for Industry 4.0/5.0 Manufacturing Processes", *Systems*, Vol. 14(3), <https://doi.org/10.3390/systems14030281>
19. Analysis of the Operational Costs of Trucking: 2024 Update (2024), *American Transportation Research Institute (ATRI)*. URL: <https://truckingresearch.org/>
20. CME Truck Digital Mirror. URL: https://www.accio.com/plp/cme-truck-digital-mirror?utm_source=chatgpt.com
21. Automotive Camera. Market Research Report – 2022 (2023), *ResearchGate ICV TAnK*. URL: <https://icvtank.oss-ap-southeast-1.aliyuncs.com/INTELLIGENT%20DRIVING-REPORTS/Automotive%20Camera%20Market%20Research%20Report%282022%20H1%29.pdf>

Received (Надійшла) 05.02 2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

Воліков Володимир Володимирович – кандидат економічних наук, провідний інженер, Інститут монокристалів Національної академії наук України, м. Харків, Україна;

Volodymyr Volikov – PhD in Economics, Senior Engineer at Institute for Single Crystals of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: valdemar12@meta.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-4107-6277>.

Панченко Ігор Валерійович – керівник Valera Logistics Inc., м. Ірпінь, Україна;

Ihor Panchenko – Head of Valera Logistics Inc., Irpin, Ukraine;

e-mail: cruze5823@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0006-3449-9614>.

PREDICTIVE MANAGEMENT AND ENSURING DIGITAL SUSTAINABILITY OF LOGISTICS PROCESSES OF TRANSPORT ENTERPRISES BASED ON CMS INTEGRATION INTO SECURE DIGITAL TWINS

V. Volikov, I. Panchenko

Abstract. Topicality. The article substantiates a conceptual approach to optimizing logistics costs of motor transport enterprises by integrating camera monitoring systems (CMS) into digital twins. The relevance of the study is driven by the need for digital transformation of logistics and the shift from reactive to predictive fleet management amid resource price volatility and geopolitical risks. **The purpose of the work** is to develop and validate a scientific-methodological approach to intelligent management of logistics costs based on the synergy of visual telemetry and dynamic modeling. The research applies methods of systems analysis, simulation modeling, and expert assessments. **The following results** were obtained. The architecture of a digital twin of the enterprise is formed, with CMS serving as the primary data source on vehicle movement, technical condition, and psychophysiological behavior of drivers. A predictive management matrix incorporating 13 key indicators (grouped into safety, operation, and economics categories) has been developed. A model is proposed that accounts not only for internal fleet parameters but also for external determinants (resource prices, weather conditions, regulatory requirements), enabling real-time adaptation of logistics operations. **Conclusion.** Validation results based on industry data (2022–2025) confirmed the economic efficiency of the approach. Implementation of the system yields a return on investment (ROI) of 277% in the base scenario with a payback period of 4–6 months. Sensitivity analysis under a pessimistic scenario (10% deviation of factors) demonstrated model robustness with an ROI of 134% and payback within 9 months. The practical significance of the work lies in providing specific recommendations for reducing transportation unit costs, minimizing unplanned downtime, and lowering risks, thereby contributing to the sustainable development and investment attractiveness of modern transport enterprises.

Keywords: digital twin; CMS; logistics costs; predictive management; transport enterprise; ROI; optimization.