

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-17>

УДК 629.3

ДОСКОЧИНСЬКИЙ Денис

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0000-1177-6953>

doskochynska83@gmail.com

ІВАСЬКІВ Роман

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-8035-4404>

ivaskivroman1024@gmail.com

ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ У ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

Дослідження присвячено розробці інноваційної системи діагностики гальмівного вузла транспортного засобу з використанням сучасних технологій, таких як інтелектуальні датчики для вимірювання температури та вібрації, а також алгоритми машинного навчання. У даній статті розглянуто архітектуру системи, яка складається з апаратної частини, серверної платформи для обробки даних та користувацького інтерфейсу. Особливу увагу приділено процесу обробки сигналу, який включає центрування, фільтрацію та перетворення в частотну область вхідного сигналу, що дозволяє виділити релевантні компоненти сигналу для подальшого аналізу.

Запропоновано три підходи до реалізації обробки вхідних даних з транспортного засобу: хмарне середовище, локальна обробка та комбінований підхід. Зроблено акцент на ефективності кластеризації та виявленні аномалій у потоках даних для підвищення точності діагностики. Використання системи дозволяє користувачу своєчасно бути проінформованим про несправності засобу, через мобільний додаток або інформаційну консоль автомобіля, що сприяє підвищенню загальної безпеки транспортного засобу. У статті також проаналізовано можливість застосування методу FMEA для оцінки ризиків та наслідків відмов.

Ключові слова: транспортний засіб, гальмівна система, машинне навчання, обробка сигналів, FMEA.

DOSKOCHYNSKYI Denys, IVASKIV Roman

Lviv Polytechnic National University

INNOVATIVE METHODS OF DIAGNOSTIC BRAKING SYSTEMS IN VEHICLES

Modern vehicle manufacturers are actively implementing new technologies to improve the safety of their products. The main emphasis is on the implementation of self-diagnostic methods that notify the user of potential malfunctions. In vehicles (hereinafter referred to as vehicles) of the premium segment, integration with virtual assistants is offered, which can automatically send requests for repair or diagnostics to authorized service centers.

From the point of view of the safety of a car or truck, the health of the brake system is particularly important. Most of them are equipped with only basic sensors, such as a brake fluid level sensor and a brake pad wear indicator, which does not provide sufficient information to timely warn of potential malfunctions, such as wear or damage to brake discs, calipers or hubs. For the diagnosis of such cases, it is important to take into account the temperature and vibration indicators of the brake system elements, since they can indicate the presence or development of problems. According to research, brake system malfunctions are one of the main causes of road accidents.

The study is dedicated to the development of an innovative diagnostic system for the braking unit of a vehicle using modern technologies, such as intelligent sensors for measuring temperature and vibration, as well as machine learning algorithms. This paper examines the system's architecture, which consists of a hardware component, a server platform for data processing, and a user interface. Special attention is given to the signal processing procedure, which includes centering, filtering, and transforming the input signal into the frequency domain, enabling the extraction of relevant signal components for further analysis.

Three approaches to processing input data from the vehicle are proposed: cloud-based processing, local processing, and a hybrid approach. Emphasis is placed on clustering efficiency and anomaly detection in data streams to improve diagnostic accuracy. The system allows the user to be promptly informed about vehicle malfunctions via a mobile application or the vehicle's information console, contributing to the overall safety of the vehicle. The article also analyzes the possibility of applying the FMEA method to assess risks and the effects of failures.

Keywords: vehicle, braking system, machine learning, signal processing, FMEA.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасні виробники транспортних засобів активно впроваджують нові технології для підвищення безпеки своїх виробів. Основний акцент робиться на впровадження методів самодіагностики, які сповіщають користувача про потенційні несправності. У транспортних засобах (далі ТЗ) преміум-сегменту пропонується інтеграція з віртуальними асистентами, які можуть автоматично надсилати запити на ремонт або діагностику до авторизованих сервісних центрів.

З точки зору безпеки автомобіля або вантажівки, справність гальмівної системи є особливо важливою. Більшість з них оснащені лише базовими датчиками, такими як датчик рівня гальмівної рідини та індикатор зносу гальмівних колодок, що не забезпечує достатньої інформації для своєчасного попередження

про потенційні несправності, такі як вироблення чи ушкодження гальмівних дисків, супортів або маточин. Для діагностики подібних випадків важливо враховувати показники температури та вібрації елементів гальмівної системи, оскільки саме вони можуть свідчити про наявність або розвиток проблем. За даними дослідження, несправності гальмівної системи є однією з основних причин дорожньо-транспортних пригод [1].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Використання сучасних технологій для збору та аналізу даних, таких як інтелектуальні датчики для вимірювання температури та вібрації і алгоритми машинного навчання, може значно підвищити рівень безпеки та ефективності самодіагностики транспортних засобів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Можливість інтелектуальної системи діагностики надавати попереджати про несправність гальмівного вузла залежить від якості використаної моделі обробки даних. Особливістю такого рішення є потреба у значному обсягу початкової інформації та ресурсів для її опрацювання. З метою вибору оптимального варіанту реалізації було розглянуто три основні підходи (рис.1), кожен із яких має свої особливості, переваги та недоліки.



Рис.1 Способи реалізації інтелектуальної системи діагностики

Перший підхід базується на обробці даних лише у хмарному середовищі. Дані, котрі зібрані давачами температури, вібрації та інших параметрів, передаються на сервер, де здійснюється їхній аналіз. Хмарні обчислення дозволяють використовувати комплексні алгоритми кластеризації та прогнозування для виявлення аномалій. Після цього інформація передається для подальшого опрацювання. Даний підхід забезпечує високу обчислювальну потужність і гнучкість, завдяки можливості використання вертикального та горизонтального розширення, але вимагає постійного інтернет-з'єднання, що може призводити до затримок у роботі системи.

Другий підхід передбачає локальну обробку даних безпосередньо на ТЗ. Таким чином усі операції з аналізу, кластеризації та виявлення аномалій виконуються лише локально, роблячи систему повністю автономною і незалежною від хмарного середовища. Такий підхід усуває залежність від зовнішніх сервісів і забезпечує миттєве реагування. Проте для його реалізації потрібні значні обчислювальні ресурси котрі необхідно розмістити в транспортному засобі, що збільшує вартість обладнання та може обмежувати його доступність. Також важливо зазначити, що дане рішення також повинне включати комунікацію з хмарним середовищем для надання інформації на персональний пристрій користувача.

Тому найбільш оптимальним є третій підхід, що поєднує переваги двох попередніх. Початкове навчання моделі здійснюється в хмарному середовищі з використанням великих обсягів даних. Після цього

спрощена версія моделі завантажується на локальний мікроконтролер, наприклад Raspberry Pi, що дозволяє проводити обробку та кластеризацію без значних витрат ресурсів. Локальна модель функціонує автономно, інформуючи користувача в реальному часі про несправності. Зібрані дані періодично передаються до хмарного сервісу для оновлення моделі, що забезпечує її актуальність та вдосконалення.

Таким чином, комбіноване рішення дозволяє зменшити навантаження на локальне обладнання, підтримуючи автономність і точність діагностики, одночасно забезпечуючи постійне вдосконалення системи на основі аналізу нових даних.

Реалізація систем, котрі призначені для проведення діагностики гальмівних систем, вимагає чіткого опису структури рішення. Даний підхід передбачає використання трьох компонент, а саме: апаратна частина, серверна частина(аналіз даних), а також користувацький інтерфейс (рис. 2).

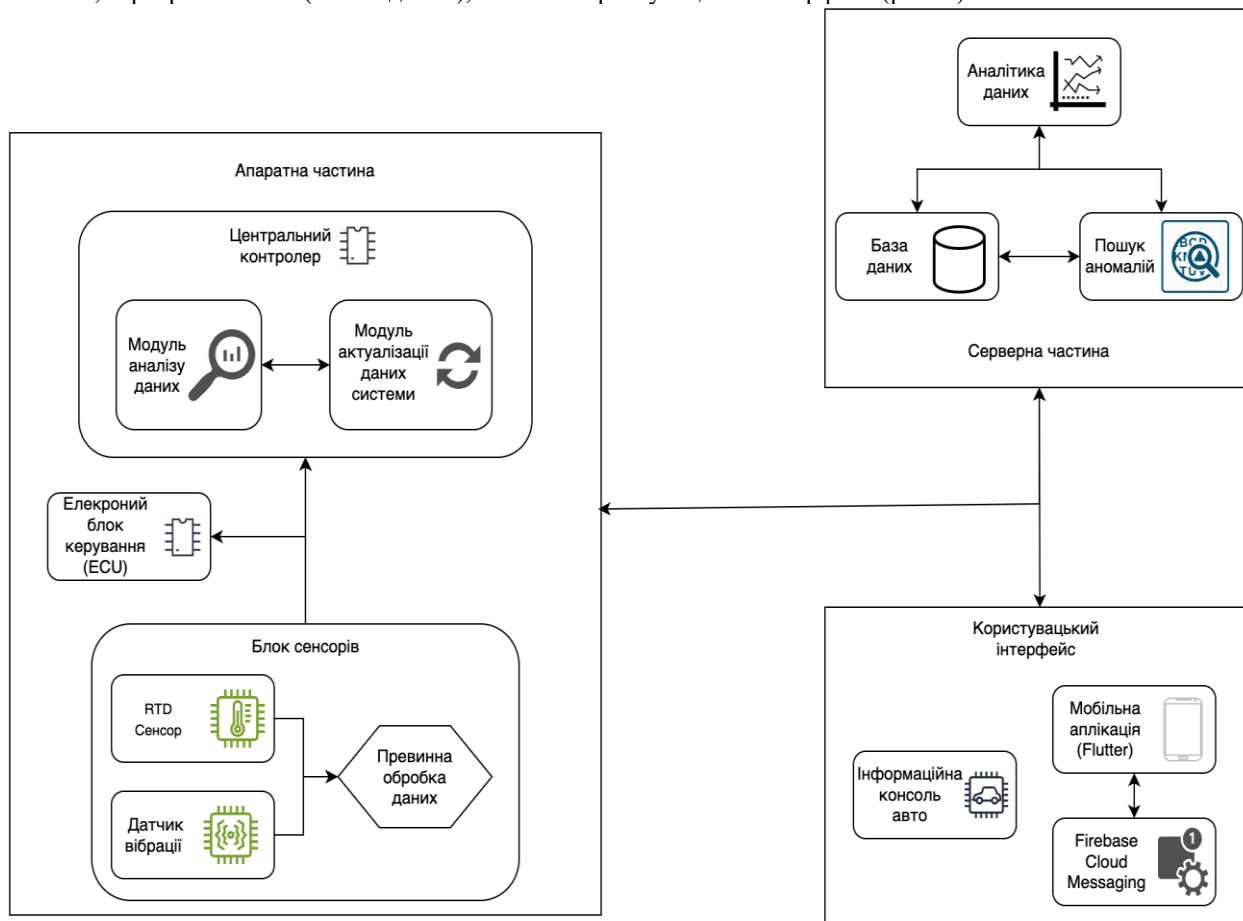


Рис.2 Архітектура інтелектуальної системи

Після того як система здійснила фіксування показників з сенсорів та провела їх первину обробку (видалення шумів, приведення до частотної області), оброблені дані надходять до центрального контролера. В свою чергу плата також надсилає запит на отримання даних про телеметрію ТЗ до електронного блоку керування (ECU). Після сформування інформаційного пакету даних здійснюється обробка інформації з використанням модуля аналізу даних, який використовує попередньо збережені дані, що необхідні діагностики системи. Для забезпечення актуальності та стабільності такого модуля передбачається його своєчасне оновлення “по повітрю” із заданою регулярністю, чи при наявності критичних змін у роботі алгоритму обробки.

Далі інформація котра була зібрана з ТЗ передається до серверної частини, де вона зберігається і використовується для подальшого удосконалення наявного модуля аналізу даних. Для проведення обробки та систематизації інформації використовуються методи машинного навчання, які дозволять виявляти аномалії (нетипові вібрації або температурні показники), котрі свідчитимуть про несправність в гальмівній системі.

Результати аналізу, отримані апаратною частиною та збережені в хмарному середовищі, інтегруються в користувацький інтерфейс, який складається з інформаційної консолі автомобіля та мобільного додатку. Варто зазначити, що доцільним є застосування кросплатформеного підходу при розробці мобільного додатку, зокрема використання Flutter/Dart, що забезпечує єдину кодову базу для різних платформ [2]. Це дозволяє користувачам у режимі реального часу отримувати інформацію про стан

системи з можливістю інтеграції з іншими вузлами. У разі виявлення аномалій сервер ініціює надсилання сповіщення через Firebase Cloud Messaging [3], нотифікуючи користувача про потенційну загрозу. Попередження про можливу несправність також відображається на панелі приладів транспортного засобу, оскільки ця інформація синхронізується між апаратною та серверною частинами.

Узагальнюючи гальмівна система складається з п'ятих елементів, а саме супорт (каліпер), стоянкове гальмо, гальмівний диск, колодки а також ABS. Розглядаючи варіативність впливів несправностей одної(чи декількох) компоненти в системі, усе зводиться до сторонньої(аномальної) вібрації, а також збільшення температури елементів. Варто звернути увагу, що гальмівний диск, в даній системі відіграє роль індикатора. Тобто при несправності системи саме він нагрівається.

Також, зміну температури гальмівного диска можна відстежувати шляхом порівняння питомого опору гальмівних дисків між собою, спосіб також відомий як резистометричний. Цей підхід часто використовується для моніторингу корозії в різних областях, зокрема в нафтовій і газовій промисловості [4]. Проте на практиці ця реалізація зазнає провалу через незначні зміни провідності при зміні температури, а також через знос, корозію або забруднення диска, що ускладнює точність вимірювань. Тому варто розглянути альтернативний спосіб, а саме використання термопар як джерело інформації про температуру системи. Оскільки гальмівний диск є постійно обертовим елементом, сенсор можна закріпити на поверхні брудовідбивного щитка. Завдяки цьому розташуванню, інформація буде акумулюватися з мінімум однієї осі авто, що дозволить аналізувати дані щонайменше з двох сенсорів і сповіщати користувача про потенційну проблему.

Проте для ширшого аналізу недостатньо лише показників температури, необхідно також збирати інформацію про вібрацію системи. Різні види вібрації (або їх представлення у вигляді коливань) [5] можуть надавати інформацію, яка допоможе локалізувати аспект дефекту. Найпростішим способом отримати необхідну інформацію з системи є використання трьохосевого акселерометра.

Задля забезпечення високої чутливості сенсора до змін у вібраціях гальмівної системи його слід інсталювати безпосередньо на самому супорті. Оскільки завдяки прямому контакту з вузлом, датчик зможе забезпечити точні вимірювання вібрацій, які виникають під час гальмування. При конструюванні корпусу для акселерометра також варто звернути увагу на використання термостійких матеріалів для кріплення, оскільки сам по собі вузол може значно нагріватися за період активного використання ТЗ.

Після того як дані було зібрано з сенсорів, спочатку варто здійснити попередню обробку даних зазвичай здійснюється перехід одразу до аналізу інформації, проте (рис. 3).



Рис.3 Принцип опрацювання даних з акселерометра

Спочатку необхідно провести центрування даних з використанням наступної формули:

$$y_i = x_i - x_{avg}, \quad x_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j$$

де x_i , це початкове значення сигналу, яке було отримане в момент часу i . Наприклад, це може бути виміряна величина, яка є отримана з акселерометра, та відображає прискорення в одній з осей ТЗ в певний момент часу. Середнє значення сигналу це x_{avg} , яке обчислюється як сума всіх вимірних значень сигналу x_j протягом періоду N , поділена на кількість вимірювань N . Дане рівняння використовується для визначення базового рівня або фону сигналу, який потрібно усунути, щоб центр даних був на нулі, таким чином ми зможемо усунути зміщення постійного струму. Далі застосовуємо цифровий фільтр для видалення шуму (наприклад, ФНЧ для усунення низькочастотного шуму).

Наступне, що необхідно це перетворити дані з часової області в частотну, щоб подальший аналіз здійснювався лише з релевантною інформацією. Для обробки попередньо відфільтрованої інформації розглядається можливість використання швидкого перетворення Фур'є. Однак перетворення в частотну область за допомогою Фур'є вимагає періодичності сигналу та призводить до втрати часової прив'язки, що може бути недоліком при аналізі нестационарних або перехідних процесів.

Навіть при використанні алгоритмів швидкого перетворення Фур'є обчислювальний обсяг залишається значним, оскільки спектральні лінії рівновіддалені за частотою. Більш доцільним є застосування малошвидкового (вейвлет) перетворення [6], яке зберігає як часову, так і спектральну прив'язку, пов'язану з результатами отриманого сигналу. Це дозволяє більш точно аналізувати сигнали, пропорційні напрузі та струму, та виявляти спотворення і впливи гармонік без втрати часової інформації. Такий підхід забезпечує розподіл енергії за окремими частотними октавами, пов'язаними з кожним рівнем вейвлет-аналізу, що сприяє кращому розпізнаванню характерних особливостей різних вібрацій.

Після виконання вейвлет-перетворення дані (включно з температурними показниками) переходять до наступного етапу—аналізу з використанням методів машинного навчання. На основі цього інтелектуальна система надаватиме інформацію про потенційну несправність гальмівної системи, виявляючи аномальні кластери та прогножуючи можливі поломки.

У процесі реалізації інтелектуальної системи діагностики важливим аспектом є впровадження систематичного підходу до аналізу несправностей, таких як FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Цей метод дозволяє ідентифікувати потенційні режими відмов, а також оцінити їхній вплив на загальну працездатність і безпеку системи. Застосування FMEA сприяє пріоритизації несправностей, що дозволяє зосередити ресурси на вирішенні найбільш критичних проблем [7]. FMEA забезпечує структурований підхід до виявлення потенційних недоліків на етапах проектування, виробництва та експлуатації системи. У контексті запропонованої системи діагностики гальмівного вузла, даний метод може використовуватися для аналізу впливу різних несправностей, таких як вихід з ладу сенсорів температури або акселерометрів, і визначення найбільш важливих параметрів для моніторингу.

Самі ж результати, що були отримані за допомогою FMEA, будуть інтегровані в моделі машинного навчання для підвищення їхньої точності та ефективності. Таким чином, застосування цього підходу дозволить не лише ідентифікувати потенційні ризики, а й оптимізувати алгоритми обробки даних, що підвищить загальну надійність системи.

У процесі обробки даних з системи варто зазначити, що просте порівняння інформації з n -коліс не надасть чіткого уявлення про несправність. Важливо зауважити, що амплітудна характеристика, яка спричинена гальмуванням, має певну характерну хаотичність даних (вона отримується в наслідок неоднорідності гальмівних колодок, дорожнього покриття, тощо). Тому при лінійному аналізі є імовірність відкинути частину інформації, яка характерна несправності системи. У свою чергу машинне навчання є потужним інструментом для аналізу великих обсягів даних і виявлення складних закономірностей (на перший погляд не очевидних для людини). У контексті моніторингу гальмівних систем, машинне навчання може бути використано для: класифікації станів системи, прогнозування недоліків системи, а також виявлення аномалій [8]. На останньому варто сконцентрувати увагу, оскільки такий підхід здатний автоматично локалізувати значення нетипової вібрації або температури, а ті вже можуть свідчити про несправність елемента гальмівної системи. Найпопулярнішим є підхід який полягає в кластеризації даних. Тобто здійснюється групування набору об'єктів таким чином, щоб в одному кластері перебували ті елементи, які є симетричні за властивостями один на одного, проте були асиметричні до даних з інших кластерів.

По завершенню аналізу, система формує звіт і надсилає його кінцевому користувачу. Проте якщо продовж обчислення вдалося ідентифікувати аномалію, то до технічного документа також висилається екстрене сповіщення користувачу на його телефон (або ж бортову систему за умови, що дану опцію було обговорено в вбудовану інтеграцію в ТЗ), щоб запобігти виникненню потенційно небезпечної ситуації під час руху.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Сучасні технології здатні значно покращити безпеку та функціональність транспортних засобів, особливо в контексті моніторингу та діагностики. У даному дослідженні було розроблено архітектурне рішення реалізації системи інтелектуальної діагностики гальмівного вузла, яке в подальшому буде інтегроване в комплекс нотифікацій користувача (як власника, оператора ТЗ) щодо його стану здоров'я за кермом та стану автомобіля. Включно з інформацією про ресурс і ризики несправності гальмівної системи. Використання інтелектуальних датчиків для вимірювання температури та вібрацій, а також алгоритмів машинного навчання для аналізу даних, дозволяє своєчасно виявляти потенційні несправності, підвищуючи загальну безпеку експлуатації. Дані з сенсорів проходять локальну первинну обробку та подальший аналіз із використанням внутрішньої полегшеної моделі обробки даних. У випадку виявлення несправності система інформує користувача шляхом передачі даних на інформаційну консоль транспортного засобу або мобільний додаток. Для аналізу даних було застосовано підхід кластеризації, що дозволяє не лише отримувати необхідну інформацію, але й візуально оглядати виділені кластери, спрощуючи інтерпретацію результатів.

Використання даних від декількох коліс усуває потребу в попередній калібрації сенсорів та навчанні моделі, роблячи систему більш адаптивною та легкою в впровадженні. Проте, потенційно кластеризацію можна покращити або поєднати з моделями, навченими на попередньо зібраних даних, для підвищення точності та ефективності діагностики.

Таким чином, результати цього дослідження є корисними для подальшого розвитку методів моніторингу й діагностики транспортних засобів. Інтеграція запропонованих підходів у систему нотифікацій сприятиме покращенню безпеки водія та надійності роботи автомобіля, що дозволить забезпечити своєчасне виявлення та усунення потенційних несправностей.

Література

1. Trucking Accidents Caused By Brake Or Tire Failure. URL: <https://www.thetruckinglawyers.com/trucking-accidents-caused-by-brake-or-tire-failure/>
2. Д. Доскочинський, Дослідження доцільності використання кросплатформених мов програмування при розробці застосунків керування доступом до транспортних засобів, 82-га Студентська науково-технічна конференція: збірник тез доповідей. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2024.
3. Firebase Cloud Messaging. URL: <https://firebase.google.com/docs/cloud-messaging>
4. Bell, G.E.C.; Moore, C.G. Low-profile electrical resistance corrosion sensor. U.S. Patent 7,915,901, 29 March 2011.
5. Zhang H, Qiao J, Zhang X. Nonlinear Dynamics Analysis of Disc Brake Frictional Vibration. Applied Sciences, 2022, 12(23), 12104.
6. Наконечний А.Й., Лагун І.І., Верес З.Є., Наконечний Р.А., Федак В.І. Теорія і практика обробки сигналів у малошвильтовій (wavelet) області / під редакцією А.Й. Наконечного: Монографія. - Львів : Растр-7, 2020 - 189-195с.
7. Bosch Group. Failure mode and effects analysis (FMEA): Application guidelines. Bosch Booklet No. 14. 2012. URL: https://assets.bosch.com/media/global/bosch_group/purchasing_and_logistics/information_for_business_partners/downloads/quality_docs/general_regulations/bosch_publications/booklet-no14-failure-mode-and-effects-analysis_EN.pdf
8. Habeeb, R.A.A.; Nasaruddin, F.H.; Gani, A.; Hashem, I.A.T.; Ahmed, E.; Imran, M. Real-time big data processing for anomaly detection: A Survey. Int. J. Inf. Manag. 2019, 45, 289-307

References

1. Trucking Accidents Caused By Brake Or Tire Failure. URL: <https://www.thetruckinglawyers.com/trucking-accidents-caused-by-brake-or-tire-failure/>
2. D. Doskochynskyi, Doslidzhennia dotsilnosti vykorystannia krosplatformenykh mov prohramuvannia pry rozrobtsti zastosunkiv keruvannia dostupom do transportnykh zasobiv, 82-ha Studentska naukovo-tekhnichna konferentsiia: zbirnyk tez dopovidei. – Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2024.
3. Firebase Cloud Messaging. URL: <https://firebase.google.com/docs/cloud-messaging>
4. Bell, G.E.C.; Moore, C.G. Low-profile electrical resistance corrosion sensor. U.S. Patent 7,915,901, 29 March 2011.
5. Zhang H, Qiao J, Zhang X. Nonlinear Dynamics Analysis of Disc Brake Frictional Vibration. Applied Sciences, 2022, 12(23), 12104.
6. Nakonechnyi A.I., Lahun I.I., Veres Z.E., Nakonechnyi R.A., Fedak V.I. Teoriia i praktyka obrobky syhnaliv u malokhvylovii (wavelet) oblasti / pid redaksiieiu A.I. Nakonechnoho: Monohrafiia. - Lviv : Rastr-7, 2020 - 189-195s.
7. Bosch Group. Failure mode and effects analysis (FMEA): Application guidelines. Bosch Booklet No. 14. 2012. URL: https://assets.bosch.com/media/global/bosch_group/purchasing_and_logistics/information_for_business_partners/downloads/quality_docs/general_regulations/bosch_publications/booklet-no14-failure-mode-and-effects-analysis_EN.pdf
8. Habeeb, R.A.A.; Nasaruddin, F.H.; Gani, A.; Hashem, I.A.T.; Ahmed, E.; Imran, M. Real-time big data processing for anomaly detection: A Survey. Int. J. Inf. Manag. 2019, 45, 289-307