

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-82>

УДК 004.8:629.33

СТРУТИНСЬКИЙ ТАРАС

Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна

<https://orcid.org/0009-0007-4061-1112>

e-mail: taras.strutynskyi.mnpzm.2024@lpnu.ua

ГРИЦЮК ЮРІЙ

Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-8183-3466>

e-mail: yurii.i.hrytsiuk@lpnu.ua

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА НАВЧАННЯ ВОДІЯ ВОДІННЮ АВТОМОБІЛЯ ЗАСОБАМИ ТЕЛЕМЕТРІЇ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Проаналізовано сучасні підходи до підвищення безпеки дорожнього руху та обмеження традиційних моніторингових рішень і систем допомоги водієві ADAS (англ. *Advanced Driver Assistance Systems*), що переважно виконують функції спостереження й попередження. Обґрунтовано доцільність переходу до інтелектуальних систем навчання водія, спрямованих на формування й коригування навиків безпечного керування безпосередньо в процесі руху. Запропоновано концепцію IDTS (англ. *Intelligent Driver Training System*), здатної працювати в режимі, наближеному до реального часу, з інтеграцією різномірних даних про водія, транспортний засіб і дорожнє середовище на підставі гібридної телеметрії (смартфон, OBD-II адаптер, фронтальна камера).

Описано концептуальну архітектуру IDTS та її ключові модулі: збір і синхронізацію даних, попереднє оброблення та багатосенсорну фузію, інтерпретацію маневрів, оцінювання стилю водіння автомобіля й моніторинг стану водія. Скоринг керування автомобілем реалізовано шляхом поєднання rule-based підходу та алгоритму Random Forest, а для виявлення втоми водія й зниження його уваги використано показники EAR і PERCLOS з їх інтеграцією в комплексну оцінку поїздки. Показано, що система може бути реалізована на масовій апаратній базі, що робить її перспективною для автошкіл, корпоративних програм безпечного водіння та телеметричних сервісів. Окреслено вимоги й обмеження реального часу та обґрунтовано доцільність розподілу обчислень між edge-пристроями і серверною інфраструктурою для довготермінової аналітики та персоналізації навчання.

Ключові слова: інтелектуальна система навчання водія; OBD-II; сенсори смартфона; скоринг стилю водіння автомобіля; моніторинг стану водія; режим реального часу.

STRUTYNSKYI TARAS, HRYTSIUK YURIJ

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

INTELLIGENT SYSTEM FOR TEACHING DRIVERS TO DRIVE A CAR USING TELEMETRY IN REAL TIME

The article analyzes modern approaches to improving road safety, in particular the limitations of traditional monitoring solutions and driver assistance systems (ADAS), which mainly perform surveillance and warning functions. The feasibility of switching to intelligent driver training systems focused on the formation, correction and consolidation of safe vehicle control skills directly during movement is substantiated. The concept of an Intelligent Driver Training System (IDTS) is proposed, capable of operating in a mode close to real time. The key feature of the system is the integration of heterogeneous data about the driver, vehicle and road environment using hybrid telemetry, which combines the capabilities of a smartphone, OBD-II adapter and front video camera. The conceptual architecture of IDTS and its main functional modules are described: collection and time synchronization of data streams, pre-processing and multi-sensor fusion, interpretation of maneuvers and traffic events, as well as assessment of driving style. Driving style scoring is implemented based on a combination of expert logic rules (rule-based approach) and the Random Forest machine learning algorithm, which provides a balance between interpretability and adaptability of the model. Special attention is paid to the driver condition monitoring module, which uses EAR and PERCLOS indicators to detect fatigue and reduced attention, with further integration of these parameters into a comprehensive trip assessment. It is shown that the proposed architecture can be implemented on an affordable and mass hardware base without the need for specialized on-board systems. This makes IDTS a promising platform for use in driving school training programs, corporate systems for improving driving safety, and telematic services of insurance and transport companies. The main requirements and practical limitations of real-time operation are outlined, in particular regarding computing resources, power consumption, and acceptable delays, and the feasibility of distributing computations between edge devices (smartphone edge level) and server infrastructure for long-term analytics, personalization of learning, and accumulation of statistical models of driver behavior is substantiated.

Keywords: intelligent driver training system; OBD-II; smartphone sensors; driving style scoring; driver condition monitoring; real-time scoring.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Струтинський Тарас, Грицюк Юрій

Постановка проблеми

Проблема підвищення безпеки дорожнього руху залишається однією з найбільш актуальних як у світі загалом, так і в Україні зокрема. Домінуючою причиною дорожньо-транспортних пригод є людський фактор, що проявляється у помилках оцінювання стану дорожньої обстановки, агресивному або нестабільному стилі керування автомобілем, втомі водія, відволіканні його уваги та недостатньому рівні практичної підготовки. Особливо високий рівень ризику характерний для водіїв-початківців, які не володіють сформованими навиками прогнозування наслідків власних дій і схильні до ризикованої поведінки в реальних дорожніх умовах.

Еволюція підходів до забезпечення безпеки дорожнього руху призвела до широкого впровадження активних систем допомоги водієві ADAS (англ. *Advanced Driver Assistance Systems*), які значно зменшують

імовірність появи аварій або пом'якшують їх наслідки. Проте, більшість таких систем виконує компенсаторну функцію та не орієнтована на довготривале формування культури безпечного водіння й стійких навиків керування транспортним засобом. Аналогічні обмеження притаманні й сучасним телеметричним системам оцінювання стилю водіння автомобіля, які здебільшого забезпечують постфактум-аналіз поїздок і формування інтегральних рейтингів без детального пояснення причин помилок та шляхів їх усунення.

Водночас, стрімкий розвиток доступних засобів телеметрії (OBD-II адаптерів, сенсорів і камер смартфонів, методів оброблення великих масивів даних і машинного навчання) створює передумови для переходу від пасивного моніторингу до інтелектуальних систем навчання водіїв водінню автомобіля. Такі системи здатні не тільки фіксувати параметри руху, а й інтерпретувати дії водія в термінах навчальних ситуацій, порівнювати їх з еталонними моделями безпечного керування та формувати персоналізований зворотний зв'язок у режимі, наближеному до реального часу.

Особливий інтерес у цьому контексті становить концепція IDTS (англ. *Intelligent Driver Training System*), що інтегрує гібридну телеметрію, алгоритми аналізу стилю водіння автомобіля та модулі моніторингу психофізіологічного стану водія. Такі системи розглядаються як інструмент безперервного навчального супроводу, який доповнює традиційні методи підготовки в автошколах і дає змогу підтримувати процес формування навиків безпечного водіння вже після завершення формального навчання.

Отже, виникає науково-практична проблема розроблення узагальненої моделі інтелектуальної системи навчання водія водінню автомобіля, що функціонує на підставі телеметричних даних у режимі реального часу та забезпечує не тільки оцінювання, а й навчальний зворотний зв'язок. Це зумовлює необхідність визначення вимог до архітектури такої системи, методів оброблення й інтерпретації даних, алгоритмів оцінювання стилю водіння автомобіля та механізмів персоналізованої підтримки процесу навчання із застосуванням сучасних методів штучного інтелекту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У дослідженні [1] проаналізовано використання смартфона як універсальної телеметричної платформи для аналізу стилю водіння автомобіля на підставі даних акселерометра, гіроскопа та GPS. Позитивним є те, що продемонстровано можливість виявлення агресивних і небезпечних маневрів без використання спеціалізованого обладнання, однак істотним обмеженням є залежність точності результатів від положення смартфона та відсутність інтеграції з моделями навчального зворотного зв'язку. У роботі [2] наведено підхід до оцінювання поведінки водія з використанням даних OBD-II та алгоритмів машинного навчання. Істотною перевагою є висока інформативність параметрів силового агрегату та гальмівної системи, але дослідження обмежується скоринговою оцінкою та не враховує психофізіологічний стан водія в межах моделі Driver–Vehicle–Environment.

У публікації [3] запропоновано інтеграцію даних смартфона та OBD-II для класифікації стилю водіння автомобіля з використанням штучних нейронних мереж. Перевагою є підвищення точності класифікації завдяки гібридній телеметрії, однак не проаналізовано питання інтерпретованості результатів та їх використання в навчальних системах. У дослідженні [4] проаналізовано модель Driver–Vehicle–Environment як основу для комплексного аналізу дорожньої ситуації та поведінки водія. Важливим є системний підхід до інтеграції різнорідних сенсорних даних, проте основний акцент зроблено на моніторингу та попередженні, без реалізації механізмів формування навиків безпечного водіння.

У роботі [5] наведено мобільний застосунок SmartDrive для виявлення небезпечних станів водія, зокрема сонливості та відволікання уваги, на підставі відеоаналізу та телеметрії. Позитивним є наближення до навчального режиму через простий візуальний фідбек, однак система не використовує формалізовану модель оцінювання стилю водіння автомобіля та не забезпечує персоналізованої траєкторії навчання. У публікації [6] описано повний обчислювальний пайплайн онлайн-аналізу стилю водіння автомобіля з використанням гібридної телеметрії та алгоритмів Random Forest. Істотною перевагою є підтримка роботи в режимі реального часу, але навчальний аспект зводиться до формування інтегрального індексу без детального пояснення помилок водія.

У дослідженні [7] систематизовано основні проблеми смартфонної телеметрії, зокрема необхідність переорієнтації системи координат та компенсації шумів і дрейфу датчиків. Важливою є методологічна база для підвищення точності вимірювань, але питання інтеграції цих методів у інтелектуальні навчальні системи не проаналізовано. У роботі [8] продемонстровано можливість класифікації стилю водіння автомобіля винятково на підставі параметрів OBD-II. Перевагою є незалежність від положення смартфона, проте відсутні дані про дорожнє середовище та стан водія, що обмежує застосування моделі в межах DVE-підходу.

Публікація [9] розглядає задачу оцінювання екологічності та енергоефективності стилю водіння автомобіля на підставі телеметричних даних. Хоча підхід є корисним для комплексної оцінки якості керування, він не орієнтований на навчальні сценарії та не враховує поведінкові особливості водія. У дослідженні [10] наведено результати аналізу методів глибокого навчання для розпізнавання небезпечної поведінки водіїв за відеоданими. Істотною перевагою є висока точність розпізнавання сценаріїв ризику, однак обчислювальна складність таких підходів ускладнює їх використання в мобільних системах реального часу.

У роботі [11] запропоновано алгоритми детекції дорожніх знаків і розмітки, орієнтовані на вбудовані та мобільні платформи. Позитивним є зменшення обчислювального навантаження, але аналіз обмежується підсистемою Environment без зв'язку зі стилем водіння. У публікації [12] здійснено аналіз промислових систем активної безпеки та моніторингу стану водія. Встановлено, що більшість рішень реалізує сценарії раннього попередження, однак не підтримує навчальні функції та адаптацію до індивідуального стилю водія.

У роботі [13] проаналізовано мобільні застосунки для виявлення втоми водія з використанням фронтальної камери смартфона. Перевагою є доступність реалізації, але система не інтегрована з телеметрією руху та моделлю оцінювання навиків водіння. У дослідженні [14] запропоновано алгоритм моніторингу стану водія на базі Android-платформи з використанням показників EAR та PERCLOS. Позитивним є можливість роботи в режимі, близькому до реального часу, проте алгоритм не поєднаний із навчальними моделями керування.

У роботі [15] проаналізовано використання *eye-tracking* технологій для оцінювання рівня уваги та сонливості водія. Істотною перевагою є висока інформативність показників, однак відсутня інтеграція з телеметричними даними транспортного засобу. У дослідженні [16] акцент зроблено на *edge*-обробленні телеметричних даних у мобільних системах. Важливим є обґрунтування можливості роботи в реальному часі, але не проаналізовано використання таких підходів у навчальних системах водіння.

Проведений вище аналіз літературних джерел показав, що сучасні дослідження у сфері безпеки дорожнього руху зосереджені переважно на моніторингу, скорингу та виявленні критичних станів водія. Водночас, залишаються частково невирішеними проблеми інтеграції даних у межах моделі *Driver-Vehicle-Environment*, реалізації повноцінної логіки навчання, забезпечення інтерпретованого зворотного зв'язку та підтримки роботи в режимі реального часу. Отже, розроблення інтелектуальної системи навчання водія водінню автомобіля на підставі гібридної телеметрії та моделі *DVE* є актуальним і науково обґрунтованим напрямом дослідження.

Мета роботи та завдання дослідження

Метою роботи – розроблення інтелектуальної системи навчання водія водінню автомобіля на підставі гібридної телеметрії (смартфон + OBD-II) та моніторингу стану водія, що забезпечить інтеграцію різнорідних даних, оцінювання стилю керування та формування персоналізованого навчального зворотного зв'язку в режимі, наближеному до реального часу.

Це дасть можливість: підвищити ефективність навчання водіїв водінню автомобіля та формування стійких навиків безпечного керування; забезпечити адаптивний аналіз стилю водіння автомобіля з урахуванням психофізіологічного стану водія; інтегрувати дані телеметрії та моніторингу стану водія у єдину модель *Driver-Vehicle-Environment*; забезпечити миттєвий навчальний зворотний зв'язок та персоналізовані рекомендації; підвищити точність класифікації стилю водіння автомобіля та скорингу поїздки; сприяти застосуванню системи в навчальних програмах автошкіл, корпоративних програмах безпечного водіння та телеметричних сервісах.

Для досягнення мети були поставлені такі **завдання дослідження**:

- розробити архітектурну модель інтелектуальної системи навчання водія водінню автомобіля з виділенням сенсорного рівня, модуля оброблення та фузії даних, підсистеми аналізу поведінки водія та навчального зворотного зв'язку;
- обґрунтувати особливості використання гібридної телеметрії "смартфон + OBD-II" та ключових показників для оцінювання стилю водіння автомобіля і стану водія;
- реалізувати алгоритми побудови інтегральних показників і класифікації стилю водіння автомобіля на підставі машинного навчання з урахуванням обмежень реального часу та забезпечити прототипування системи для апробації в умовах реальних дорожніх сценаріїв.

Виклад основного матеріалу

Запропонована архітектура інтелектуальної системи навчання водія водінню автомобіля з використанням телеметрії формалізує весь процес збору, оброблення та інтерпретації даних у режимі, наближеному до реального часу. Основна мета цієї архітектури – забезпечити комплексний аналіз поведінки водія, оцінити якість керування та сформувати адаптивний навчальний зворотний зв'язок, що дає змогу покращувати навик водіння автомобіля у різних дорожніх та трафікових умовах.

Система організована у вигляді багаторівневої структури, що містить сенсорний рівень, модуль збору та синхронізації даних, модуль попереднього оброблення та фузії, інтерпретаційний модуль, модуль оцінювання стилю водіння автомобіля, моніторингу стану водія та формування навчального зворотного зв'язку. Кожен із цих рівнів реалізує специфічні функції, спрямовані на забезпечення повноти та достовірності телеметричних даних, а також на адаптивну оцінку поведінки водія.

На сенсорному рівні (*Sensor Layer*) інтегруються дані з різних джерел:

- смартфон забезпечує векторні вимірювання пришвидшень та кутових швидкостей за допомогою акселерометра та гіроскопа, положення у просторі через магнітометр, геопозицію та швидкість за даними GPS, а також відеопотік з фронтальної камери для оцінювання стану водія;
- OBD-II адаптер надає прямий доступ до даних електронного блоку керування транспортного засобу: обертки двигуна, швидкість, навантаження на двигун, положення педалі газу та гальма, зміни передач тощо;
- додаткові камери (фронтальна або задня) можуть використовуватися для детекції дорожніх знаків, розпізнавання об'єктів на дорозі та визначення дорожньої обстановки.

Дані з різних сенсорів мають неоднакову частоту оновлення та різну точність, що створює необхідність у модулі збору та синхронізації даних (англ. *Data Acquisition & Synchronization Layer*). Він відповідає за часову прив'язку потоків телеметрії до єдиного таймлайну, буферизацію даних та забезпечення їх узгодженості, що є критичним для наступного аналізу маневрів та стану водія.

На етапі попереднього оброблення та фузії (англ. *Preprocessing & Fusion Layer*) здійснюється очищення

сигналів від шумів, вирівнювання осей смартфона у систему координат автомобіля та інтеграція даних у єдиний уніфікований потік ознак. Цей крок дає змогу отримати коректні значення швидкості, пришвидшення, обертів двигуна, а також координат водія та дорожньої обстановки, які використовуються у наступних аналітичних модулях.

Для зменшення впливу шумів у даних інерціальних датчиків використовувався цифровий фільтр Баттерворта четвертого порядку з частотою зрізу 5 Гц. Вирівнювання осей смартфона до системи координат автомобіля здійснювалося на підставі оцінки орієнтації з використанням кватерніонного наведення. Синхронізація потоків даних з різною частотою дискретизації реалізовувалася шляхом буферизації та часової інтерполяції з приведенням усіх параметрів до єдиного часового масштабу.

Інтерпретаційний модуль (Interpretation Layer) виконує виділення окремих маневрів водіння: розгонів, гальмувань, поворотів, зміни смуги та обгонів. Кожен маневр описується параметрами водія, транспортного засобу та середовища, що дає змогу зіставляти фактичну поведінку водія з еталонними сценаріями.

Модуль оцінювання стилю водіння автомобіля (англ. *Assessment & Scoring Layer*) формує субіндекси, що відображають окремі особливості керування, наприклад, плавність пришвидшень, різкість гальмувань та ефективність перемикання передач. На підставі цих субіндексів розраховується інтегральний показник DS_{styleS} – DrivingStyleScore [17]:

$$DS_{styleS} = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot S_i, \tag{1}$$

де: S_i – субіндекси (AccelerationScore, BrakingScore, GearShiftScore); ω_i – вагові коефіцієнти, що визначають важливість кожного субіндексу для загальної оцінювання стилю водіння автомобіля.

Нормалізація субіндексів здійснюється за формулою [18]:

$$S_i = 1 - \frac{X_i - X_{min}}{X_{min_{max}} - X_{i \in m}}, \tag{2}$$

де X_i – фактичне значення параметра маневру.

Модуль моніторингу стану водія (Driver State Monitoring) забезпечує оцінку уваги та втоми на підставі комп'ютерного зору. Основні метрики містять:

- коефіцієнт, що визначає ступінь відкритості очей E_{AR} ;
- частка часу, протягом якого очі закриті більше певного порогу P_{EC} ;
- частота позіхання та відхилення погляду від дороги.

На підставі цих показників розраховується DS_{tateS} – DriverStateScore [19]:

$$DS_{tateS} = \alpha \cdot (1 - P_{EC}) + \beta \cdot E_{AR}, \tag{3}$$

де α та β – вагові коефіцієнти, що визначають внесок різних метрик у оцінку стану водія.

Для підсумкової оцінки поїздки використовується комбінований TS – TotalScore, який поєднує індекс стилю водіння автомобіля та стан водія [17 – 19]:

$$TS = w_1 \cdot DS_{styleS} + w_2 \cdot DS_{tateS}, \tag{4}$$

де w_1 і w_2 задаються відповідно до пріоритетів безпеки та навчальної мети системи.

Функціонально вся система працює за принципом потокового аналізу: дані безперервно надходять із сенсорів, проходять попереднє оброблення та фузію, потім виділяються маневри, обчислюються локальні субіндекси, інтегрується стан водія і на виході формується адаптивний навчальний зворотний зв'язок. Таке багаторівневе поєднання компонентів дає змогу реалізувати режим, наближений до реального часу, і забезпечує водію миттєві рекомендації щодо покращення навиків кермування.

Реалізація IDTS (англ. *Intelligent Driver Training System*) передбачає практичне впровадження усіх модулів архітектури на масовій апаратній базі, яка містить смартфон з IMU-датчиками та GPS, OBD-II адаптер і фронтальну камеру. Основне завдання системи – формування інтегрованого потоку телеметричних даних, що дає змогу оцінювати маневри водія, стан транспортного засобу та умови дорожнього середовища в режимі, наближеному до реального часу.

Збір даних здійснюється одночасно з усіх сенсорів, при цьому потоки мають різну частоту оновлення: акселерометр і гіроскоп (50 – 100 Гц), GPS (1 – 10 Гц), OBD-II (5 – 10 Гц), відео (25 – 30) кадрів за секунду. Для синхронізації даних застосовується буферизація та інтерполяція, щоб усі параметри були приведені до єдиного часового масштабу. Наприклад, у випадку тимчасової втрати GPS сигналу або пропуску кадрів відео, система відновлює значення за допомогою алгоритмів інтерполяції та маркує ділянки з низькою надійністю.

Попереднє оброблення даних містить вирівнювання осей смартфона до координат автомобіля, фільтрацію шумів і виділення сегментів окремих маневрів. Кожен маневр описується набором параметрів, таких як поздовжнє та поперечне пришвидшення, швидкість, оберти двигуна, робота педалями та зміни передач.

Для наочності приклад даних по типових маневрах наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри типових маневрів водія

Маневр	Середнє пришвидшення	Максимальне пришвидшення	Середня швидкість, км/год	Тривалість, с
Розгін	середнє	високе	40	8
Гальмування	від'ємне	значне	38	5
Поворот праворуч	помірне	невелике	30	6
Зміна смуги	невелике	низьке	35	4

Після виділення сегментів розраховуються моментні, подієві та агреговані ознаки для формування скорингу. Моментні ознаки містять середнє та максимальне пришвидшення, швидкість, різкі зміни RPM та інші параметри. Подієві ознаки визначають різкі гальмування, пришвидшення, різкі повороти та часті зміни смуги. Агреговані показники формуються по маршруту, наприклад, кількість різких гальмувань на 10 км, частка часу у високих обертах двигуна та середній "ризиковий індекс" по ділянках маршруту.

Оцінка стилю водіння автомобіля здійснюється за допомогою комбінованого підходу: rule-based алгоритми фіксують явно небезпечні події, а модель Random Forest оцінює загальний стиль водіння, визначаючи водія як обережного, помірною або агресивного. Наприклад, якщо водій різко гальмує при високій швидкості або часто різко змінює смугу, це враховується як зменшення підсумкового балу безпечності поїздки.

Для оцінювання якості моделі Random Forest використовувалися стандартні метрики класифікації: Accuracy, Precision, Recall та F1-score, а також матриця помилок. Для кількісної оцінки похибок регресійних показників застосовувалися метрики MAE та RMSE. Додатково аналізувалися системні показники, зокрема середня затримка оброблення даних та стабільність скорингу в режимі потокового аналізу.

Моніторинг стану водія проводиться через фронтальну камеру смартфона з використанням показників E_{AR} та P_{EC} . Система аналізує відкритість очей та тривалість їх закриття для виявлення сонливості, а також відстежує частоту позіхання і відхилення погляду від дороги. У разі критичного стану водія система генерує миттєві попередження та адаптує підсумковий скоринг поїздки.

На практиці система здатна обробляти дані у режимі, наближеному до реального часу, оновлюючи оцінки кожні кілька секунд. Серверна частина використовується для довготермінового зберігання даних, персоналізації моделей та формування розширених навчальних звітів.

Для наочності наведено приклад графіка (рис. 1) зміни оцінювання стилю водіння автомобіля під час поїздки. Чітко видно моменти різких гальмувань та поворотів, а також періоди спокійної їзди, що дає змогу водію отримувати детальний аналіз і рекомендації для коригування поведінки на дорозі.

Експериментальна перевірка запропонованої Intelligent Driver Training System проводилася в реальних дорожніх умовах з використанням серійного легкового автомобіля класу С з бензиновим двигуном та автоматичною коробкою передач. У якості апаратної платформи використовувався смартфон на базі Android із вбудованими IMU-датчиками та фронтальною камерою, а також OBD-II адаптер стандарту ELM327.

У тестуванні брали участь п'ять водіїв з різним рівнем досвіду керування. Загальна кількість поїздок становила 30, середня тривалість однієї поїздки – 20–35 хвилин. Маршрути містили міський, приміський та змішаний цикли руху. Запис даних здійснювався у денний час за сухих погодних умов без втручання в процес керування транспортним засобом.

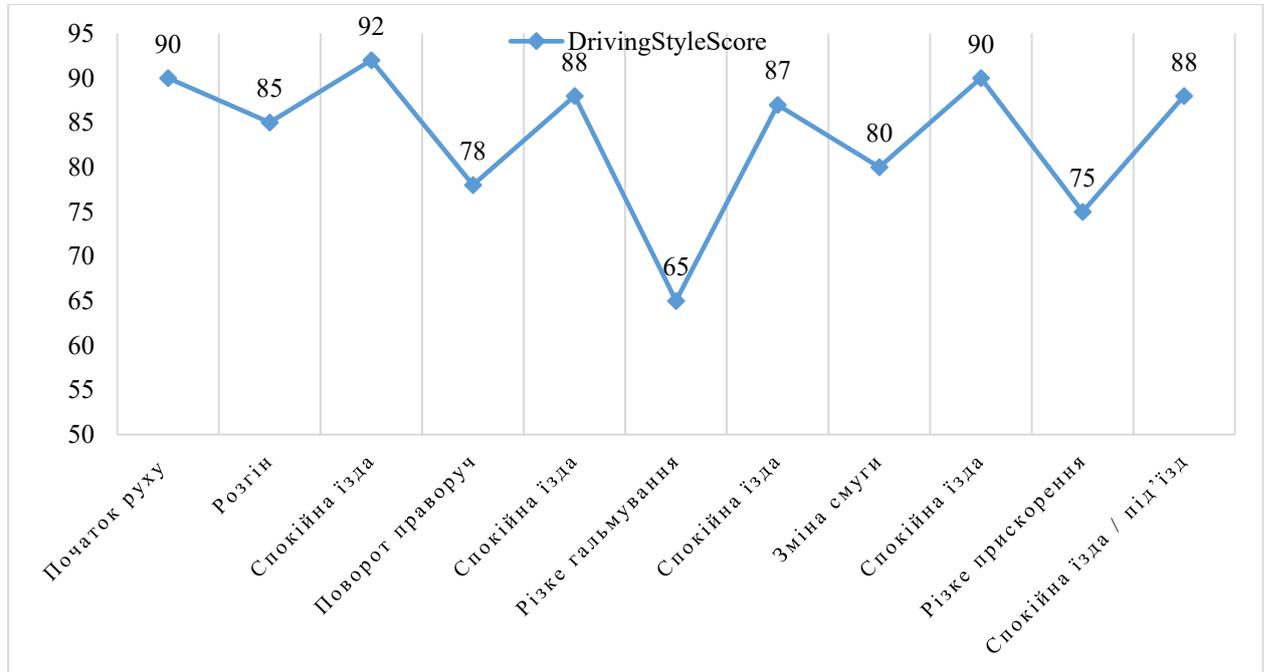


Рис. 1. Зміна оцінювання стилю водіння автомобіля під час поїздки

Отже, отримано практичний результат роботи системи: дані збираються, синхронізуються, обробляються, формуються показники стилю керування та стану водія, а користувач отримує інтерпретовані результати у вигляді інтегральних оцінок та рекомендацій, що робить систему реальною для використання в автошколах, корпоративних програмах безпечного водіння та телеметричних сервісах.

Після формалізації концепції та архітектури інтелектуальної системи навчання водія було проведено етап практичної реалізації прототипу, що забезпечує збір, оброблення та аналіз телеметричних даних у режимі, наближеному до реального часу. Для цього використовувалася масова апаратна база: сучасний смартфон, OBD-

П адаптер та фронтальна камера транспортного засобу. Вибір таких компонентів зумовлений широкою доступністю обладнання та можливістю масштабування системи на автошколи та корпоративні програми безпечного водіння.

На першому етапі було організовано збір потоків даних із сенсорів. Смартфон забезпечував вимірювання пришвидшень, кутових швидкостей, геопозиції та відеопотоку. OBD-II адаптер надавав дані про швидкість, оберти двигуна, стан педалей та інші ключові параметри автомобіля. Усі потоки синхронізувалися в часі, вирівнювалися по осях та оброблялися фільтрами для зменшення шуму та усунення артефактів.

Особливу увагу приділено виділенню окремих маневрів. Система ідентифікувала розгони, різкі гальмування, повороти та зміни смуги, формуючи структуровані сегменти, що відображають фактичну поведінку водія. Кожен сегмент аналізувався як щодо стилю водіння автомобіля, так і стану водія, включно із показниками E_{AR} та P_{EC} . Це дало можливість виявляти моменти втоми, втрати уваги або небезпечної поведінки, що безпосередньо впливало на підсумкову оцінку поїздки.

Для обчислення інтегрального скорингу використовувався комбінований підхід: rule-based правила для явних порушень (наприклад, різкі гальмування чи перевищення допустимого пришвидшення) та алгоритми машинного навчання, зокрема Random Forest, для класифікації стилю водіння автомобіля. Підсумкова оцінка об'єднувала параметри стилю керування та стан водія, формуючи комплексну рекомендацію, яка могла бути наведена текстовими повідомленнями, голосовими підказками або графічними індикаторами на екрані смартфона.

Результати показали, що система здатна своєчасно ідентифікувати критичні маневри та періоди підвищеної втоми водія, надаючи рекомендації для коригування поведінки. Аналіз змін DrivingStyleScore під час поїздки дозволив візуалізувати динаміку керування, виділяючи моменти різких маневрів та спокійної їзди. Такі дані надають водієві можливість усвідомлено коригувати стиль керування та підвищувати безпеку руху.

Важливою складовою реалізації є забезпечення роботи системи в режимі, наближеному до реального часу. Для цього застосовано оптимізацію обчислень: легкі моделі на edge-пристрої (смартфон) виконують базовий скоринг та формування негайних попереджень, а серверна інфраструктура обробляє історичні дані та забезпечує навчання та адаптацію моделей під конкретного водія. Такий розподіл дає змогу поєднати миттєвий зворотний зв'язок із глибокою аналітикою і персоналізацією навчання.

Реалізація IDTS передбачає поетапне впровадження системи:

1. Збір телеметричних даних з IMU, GPS, OBD-II та відео.
2. Синхронізація та фільтрація сигналів.
3. Виділення маневрів на підставі ковзних вікон та порогових значень.
4. Формування моментних, подієвих та агрегованих ознак.
5. Машинне навчання моделі оцінювання стилю водіння автомобіля;
6. Оцінка стану водія.
7. Інтеграція результатів у єдиний скоринг та формування рекомендацій.

На завершальному етапі було реалізовано демонстраційний інтерфейс (рис. 2), що відображає оцінювання стилю водіння автомобіля у вигляді графіків та інтерактивних звітів. Водій може переглядати свої маневри, отримувати рекомендації щодо коригування техніки керування та аналізувати динаміку прогресу за тривалий період. Така інтеграція дає змогу не тільки оцінювати поточний стан водія, але й сприяти формуванню стійких навиків безпечного водіння.

Експериментальна перевірка підтвердила доцільність запропонованої концепції Intelligent Driver Training System. У межах дослідження було реалізовано прототип модуля оцінювання стилю водіння автомобіля на підставі OBD-параметрів (швидкість, оберти двигуна, положення педалі газу). Модель Random Forest навчалася на 70 % зібраних даних та тестувалася на 30 %. Отримана точність класифікації стилю водіння автомобіля склала 84 %, середня абсолютна похибка – 0,12, що підтверджує практичну працездатність запропонованого підходу.

Система демонструє високий рівень інформативності, здатність працювати на доступному обладнанні та ефективно інтегрувати різноманітні дані для формування зрозумілого навчального зворотного зв'язку. Перспективи подальших досліджень містять використання генеративних моделей штучного інтелекту для формування персоналізованих текстових та голосових рекомендацій, розширення аналітики на підставі великих наборів поїздок та інтеграцію додаткових сенсорів для підвищення точності моніторингу водія та транспортного засобу.

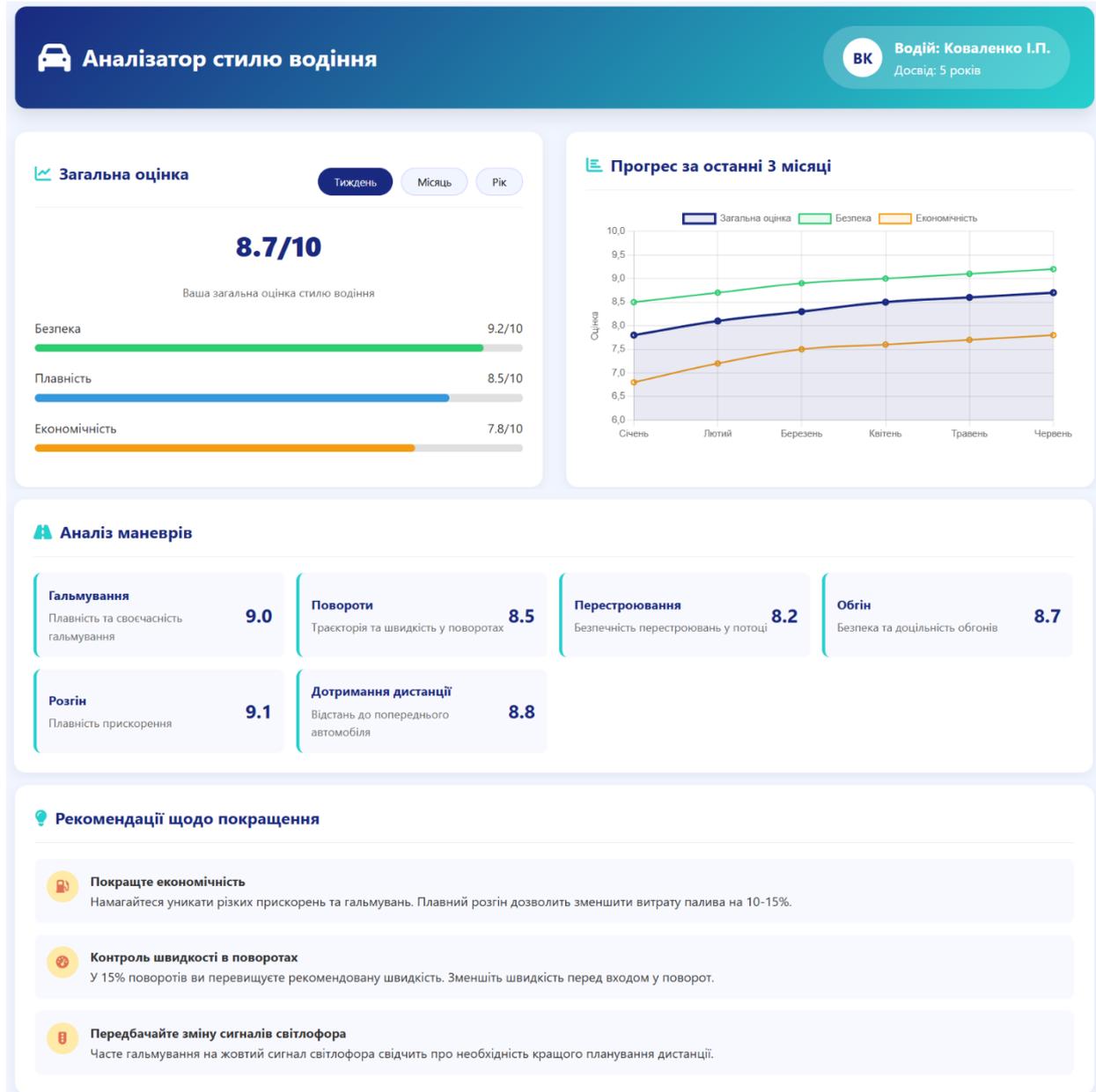


Рис. 2. Інтерфейс аналізатору стилю водіння автомобіля

Висновки

Проаналізовано сучасні підходи до підвищення безпеки дорожнього руху та обмеження традиційних моніторингових рішень і систем допомоги водієві ADAS. Виявлено, що більшість наявних рішень зосереджені на пасивному спостереженні та попередженні водія, не забезпечуючи безпосередньої коригування навиків керування в процесі руху.

Обґрунтовано доцільність переходу до інтелектуальних систем навчання водія IDTS, здатних інтегрувати різноманітні дані про водія, транспортний засіб і дорожнє середовище. Розроблена концептуальна архітектура IDTS містить модулі збору та синхронізації телеметрії, попереднього оброблення та багатосенсорної фузії, інтерпретації маневрів, оцінювання стилю водіння автомобіля, моніторингу стану водія та формування навчального зворотного зв'язку.

Реалізовано підхід скорингу керування, який поєднує rule-based алгоритми та моделі машинного навчання (Random Forest), а також інтеграцію показників EAR і PERCLOS для оцінювання стану водія. Підсумкова оцінка поїздки (TotalScore) дає змогу водієві отримувати детальну інформацію про стиль керування та стан уваги, що сприяє формуванню стійких навиків безпечного водіння.

Проведена демонстраційна реалізація інтерфейсу показала ефективність візуалізації даних у вигляді графіків, таблиць маневрів та інтерактивних рекомендацій. Це дає змогу водієві відстежувати динаміку свого прогресу, аналізувати помилки та отримувати практичні поради для коригування поведінки на дорозі.

Проаналізовано питання реалізації системи в режимі, наближеному до реального часу, з урахуванням обмежень мобільних пристроїв та необхідності розподілу обчислень між edge-пристроями та серверною

інфраструктурою. Такий підхід забезпечує миттєвий зворотний зв'язок під час поїздки та можливість довготермінового зберігання й аналізу даних.

Запропонована система демонструє високу практичну перспективність для використання в автошколах, корпоративних програмах безпечного водіння та телеметричних сервісах. Вона дає змогу перейти від пасивного моніторингу до активного формування навиків водія, що має потенціал істотно підвищити безпеку дорожнього руху.

Подальші напрями розвитку системи передбачають інтеграцію генеративних моделей штучного інтелекту для персоналізованого навчального зворотного зв'язку, оптимізацію алгоритмів машинного навчання для роботи на мобільних пристроях і розширення аналітики на довготермінову динаміку прогресу водія.

Література

1. Kanwal K., Rustam F., Chaganti R., Jurec A. D., Ashraf I. Smartphone Inertial Measurement Unit Data Features for Analyzing Driver Driving Behavior // *IEEE Sensors Journal*. – 2023. – Vol. 23, №11. – P. 11308–11323. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3256000>
2. Michailidis E., Panagiotopoulou A., Papadakis A. A Review of OBD-II-Based Machine Learning Applications for Sustainable, Efficient, Secure, and Safe Vehicle Driving // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25. – Article ID 4057. <https://doi.org/10.3390/s25134057>
3. Al-refai G., Al-refai M., Alzu'bi A. Driving Style and Traffic Prediction with Artificial Neural Networks Using On-Board Diagnostics and Smartphone Sensors // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, №12. – Article ID 5008. <https://doi.org/10.3390/app14125008>
4. Kim B., Baek Y. Sensor-Based Extraction Approaches of In-Vehicle Information for Driver Behavior Analysis // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, №18. – Article ID 5197. <https://doi.org/10.3390/s20185197>
5. Velpula R. K. SmartDrive: An Android-Based Machine Learning Application: Vehicle Diagnostics and Driver Safety // *Journal of Recent Trends in Computer Science and Engineering (JRTCSE)*. – 2025. – Vol. 13, №3 (May–June). – P. 7–16. <https://doi.org/10.70589/JRTCSE.2025.13.3.2>
6. Peppes N., Alexakis T., Adamopoulou E., Demestichas K. Driving Behaviour Analysis Using Machine and Deep Learning Methods for Continuous Streams of Vehicular Data // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, №14. – Article ID 4704. <https://doi.org/10.3390/s21144704>
7. Mantouka E. G., Barmponakis E., Vlahogianni E. I. Smartphone sensing for understanding driving behavior: Current practice and challenges // *International Journal of Transportation Science & Technology*. – 2021. – Vol. 10, №3. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2020.07.001>
8. Kumar R., Jain A. Driving behavior analysis and classification by vehicle OBD data using machine learning // *The Journal of Supercomputing*. – 2023. – Vol. 79. – P. 18800–18819. <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05364-3>
9. Mondal S., Goswami S. S. Machine learning applications in automotive engineering: enhancing vehicle safety and performance // *Journal of Process Management and New Technologies*. – 2023. – Vol. 12, issue 1–2. – P. 61–71. <https://doi.org/10.5937/jpmnt12-50607>
10. Hou J., Zhang B., Zhong Y., He W. Research Progress of Dangerous Driving Behavior Recognition Methods Based on Deep Learning // *World Electric Vehicle Journal*. – 2025. – Vol. 16, №2. – Article ID 62. <https://doi.org/10.3390/wevj16020062>
11. Головацький І. В., Корнага Я. І. Інтелектуальна система розпізнавання елементів дорожнього руху // *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. – 2019. – Т. 30(69), № 6, ч. 1. – С. 47–50. – URL: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/6_2019/part_1/11.pdf
12. Шльончак І. А., Йовченко А. В. До питання моніторингу поведінки водія та дорожніх умов // *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту : зб. матеріалів міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., Кропивницький, 17–19 листопада 2022 р.* – 2022. – С. 148–151. <https://surl.li/xhciqx>
13. Бажинова Т. О., Туранський Д. О. Системи активної безпеки та моніторингу поведінки водія // *Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 10 грудня 2021 р.* – Харків : ДБТУ, 2021. – С. 154. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/2190>
14. Йовченко А. В., Шльончак І. Розроблення алгоритма моніторингу стану водія за допомогою Android-застосунку з метою підвищення рівня активної безпеки // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. – 2023. – Вип. 7(38), ч. II. – С. 139–146. https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/7%2838%29_II/20.pdf
15. Гречмак Д. В. Моніторинг поведінки водія при управлінні транспортним засобом за допомогою eye tracking системи // *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : матеріали XXIV Міжнар. молодіжн. форуму, 7–9 квітня 2020 р.* – Харків : ХНУРЕ, 2020. – С. 128–129. <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/ca71410e-5c94-4506-ad45-69bb6e081c40>
16. Shirole V., Shahade A. K., Deshmukh P. V. A comprehensive review on data-driven driver behaviour scoring in vehicles: technologies, challenges and future directions // *Discover Artificial Intelligence*. – 2025. – Vol. 5. – Article ID 26. <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00244-6>

17. Vlahogianni E. I., Barmounakis E. N. Driving analytics using smartphones: algorithms, comparisons and challenges // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2017. – Vol. 79. – P. 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.014>
18. Castignani G., Derrmann T., Frank R., Engel T. Driver behavior profiling using smartphones: a low-cost platform for driver monitoring // *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. – 2015. – Vol. 7, №1. – P. 91–102. <https://doi.org/10.1109/MITS.2014.2328673>
19. Eraqi H. M., Abouelnaga Y., Saad M. H., Moustafa M. N. Driver distraction identification with an ensemble of convolutional neural networks // *Journal of Advanced Transportation*. – 2019. – Vol. 2019, №1. – Article ID 4125865. <https://doi.org/10.1155/2019/4125865>

References

1. Kanwal, K., Rustam, F., Chaganti, R., Jurcut, A. D., & Ashraf, I. (2023). Smartphone Inertial Measurement Unit Data Features for Analyzing Driver Driving Behavior. *IEEE Sensors Journal*, 23(11), 11308–11323. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3256000>
2. Michailidis, E., Panagiotopoulou, A., & Papadakis, A. (2025). A Review of OBD-II-Based Machine Learning Applications for Sustainable, Efficient, Secure, and Safe Vehicle Driving. *Sensors*, 25, article ID 4057. <https://doi.org/10.3390/s25134057>
3. Al-refai, G., Al-refai, M., & Alzu'bi, A. (2024). Driving Style and Traffic Prediction with Artificial Neural Networks Using On-Board Diagnostics and Smartphone Sensors. *Applied Sciences*, 14(12), article ID 5008. <https://doi.org/10.3390/app14125008>
4. Kim, B., & Baek, Y. (2020). Sensor-Based Extraction Approaches of In-Vehicle Information for Driver Behavior Analysis. *Sensors*, 20(18), article ID 5197. <https://doi.org/10.3390/s20185197>
5. Velpula, R. K. (2025). SmartDrive: An Android-Based Machine Learning Application: Vehicle Diagnostics and Driver Safety. *Journal of Recent Trends in Computer Science and Engineering (JRTCSE)*, 13(3), 7–16. <https://doi.org/10.70589/JRTCSE.2025.13.3.2>
6. Peppes, N., Alexakis, T., Adamopoulou, E., & Demestichas, K. (2021). Driving Behaviour Analysis Using Machine and Deep Learning Methods for Continuous Streams of Vehicular Data. *Sensors*, 21(14), article ID 4704. <https://doi.org/10.3390/s21144704>
7. Mantouka, E. G., Barmounakis, E., & Vlahogianni, E. I. (2021). Smartphone Sensing for Understanding Driving Behavior: Current Practice and Challenges. *International Journal of Transportation Science & Technology*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2020.07.001>
8. Kumar, R., & Jain, A. (2023). Driving Behavior Analysis and Classification by Vehicle OBD Data Using Machine Learning. *The Journal of Supercomputing*, 79, 18800–18819. <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05364-3>
9. Mondal, S., & Goswami, S. S. (2023). Machine Learning Applications in Automotive Engineering: Enhancing Vehicle Safety and Performance. *Journal of Process Management and New Technologies*, 12(1–2), 61–71. <https://doi.org/10.5937/jpmnt12-50607>
10. Hou, J., Zhang, B., Zhong, Y., & He, W. (2025). Research Progress of Dangerous Driving Behavior Recognition Methods Based on Deep Learning. *World Electric Vehicle Journal*, 16(2), article ID 62. <https://doi.org/10.3390/wevj16020062>
11. Holovatskyi, I. V., & Kornaga, Y. I. (2019). Intelligent System for Recognition of Road Traffic Elements. Scientific Notes of Tavriya National V. I. Vernadsky University. *Series: Technical Sciences*, 30(69), 6(1), 47–50. https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/6_2019/part_1/11.pdf
12. Shlonschak, I. A., & Yovchenko, A. V. (2022). On Monitoring Driver Behavior and Road Conditions. In *Innovative Technologies for Development and Efficiency of Automotive Transport* (pp. 148–151). Kropyvnytskyi, Ukraine. <https://surl.li/xheicq>
13. Bazhinova, T. O., & Turanskyi, D. O. (2021). Active Safety Systems and Driver Behavior Monitoring. In *Automotive Transport in the Agrarian Sector: Design, Technology, and Operation* (pp. 154). Kharkiv: DBTU. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/2190>
14. Yovchenko, A. V., & Shlonschak, I. (2023). Development of an Algorithm for Monitoring Driver State Using an Android Application to Enhance Active Safety. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 7(38), II, 139–146. https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/7%2838%29_II/20.pdf
15. Grechmak, D. V. (2020). Monitoring Driver Behavior While Operating a Vehicle Using Eye-Tracking Systems. In *Radioelectronics and Youth in the XXI Century: Proceedings of the XXIV International Youth Forum* (pp. 128–129). Kharkiv: KhNURE. <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/ca71410e-5c94-4506-ad45-69bb6e081c40>
16. Shirole, V., Shahade, A. K., & Deshmukh, P. V. (2025). A Comprehensive Review on Data-Driven Driver Behaviour Scoring in Vehicles: Technologies, Challenges and Future Directions. *Discover Artificial Intelligence*, 5, article ID 26. <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00244-6>
17. Vlahogianni, E. I., & Barmounakis, E. N. (2017). Driving analytics using smartphones: Algorithms, comparisons and challenges. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79, 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.014>
18. Castignani, G., Derrmann, T., Frank, R., & Engel, T. (2015). Driver behavior profiling using smartphones: A low-cost platform for driver monitoring. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 7(1), 91–102. <https://doi.org/10.1109/MITS.2014.2328673>
19. Eraqi, H. M., Abouelnaga, Y., Saad, M. H., & Moustafa, M. N. (2019). Driver distraction identification with an ensemble of convolutional neural networks. *Journal of Advanced Transportation*, 2019(1), 4125865. <https://doi.org/10.1155/2019/4125865>