

І. Ю. КОБЗАР

старший викладач кафедри машинобудування  
Одеська державна академія будівництва та архітектури  
ORCID: 0009-0004-1778-9463

О. В. СТЕПАНОВ

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри тракторів та автомобілів  
Національний університет біоресурсів і природокористування України  
ORCID: 0000-0003-4954-2532

## МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ АВТОТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЕРТИЗИ ДТП ЗА УЧАСТЮ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ІЗ СУЧАСНИМИ СИСТЕМАМИ БЕЗПЕКИ

У статті розглянуто особливості проведення автотранспортної експертизи дорожньо-транспортних пригод за участю транспортних засобів із сучасними системами активної та пасивної безпеки. Метою дослідження є підвищення обґрунтованості автотехнічної експертизи дорожньо-транспортних пригод шляхом удосконалення методичних підходів до її проведення з урахуванням впливу сучасних систем активної та пасивної безпеки транспортних засобів. Для цього проаналізовано вплив електронних систем керування на процес виникнення та перебігу дорожньо-транспортних пригод, на формування слідової інформації та характер пошкоджень транспортних засобів. Особливу увагу приділено ролі автоматизованих систем допомоги водієві, що здатні суттєво змінювати поведінку транспортних засобів у критичних ситуаціях. Це, своєю чергою, ускладнює встановлення причинно-наслідкових зв'язків під час експертного аналізу. Встановлено обмеження традиційних методів автотехнічної експертизи в умовах використання інтелектуалізованих транспортних засобів. Зокрема, недостатню інформативність класичних розрахункових моделей без урахування цифрових даних. Обґрунтовано доцільність інтеграції електронних даних транспортних засобів, бортових реєстраторів, систем діагностики та телематичних модулів у процес експертного дослідження. Розкрито роль систем активної безпеки у зміні динаміки руху транспортних засобів та систем пасивної безпеки у формуванні наслідків дорожньо-транспортних пригод. Запропоновано удосконалений підхід до проведення автотехнічної експертизи, що базується на комплексному використанні традиційних розрахункових методів, аналізу матеріальних слідів, електронних даних та засобів математичного моделювання з урахуванням алгоритмів функціонування систем безпеки. Отримані результати спрямовані на підвищення правдивості експертних висновків, об'єктивізації процесу реконструкції обставин дорожньо-транспортних пригод, вдосконалення методичного забезпечення автотехнічної експертизи в умовах сучасного розвитку автомобільної техніки та цифровізації транспортної галузі.

**Ключові слова:** автотехнічна експертиза, дорожньо-транспортна пригода, система активної безпеки, система пасивної безпеки, електронні системи керування, експертне дослідження, математичне моделювання.

I. YU. KOBZAR

Senior Lecturer at the Mechanical Engineering Department  
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture  
ORCID: 0009-0004-1778-9463

O. V. STEPANOV

Sc. D., Professor,  
Professor at the Department of Tractors and Cars  
National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine  
ORCID: 0000-0003-4954-2532

## METHODOLOGICAL ASPECTS OF VEHICLE TECHNICAL EXAMINATION IN TRAFFIC ACCIDENTS INVOLVING VEHICLES EQUIPPED WITH MODERN SAFETY SYSTEMS

The article examines the specific features of conducting vehicle forensic examinations of traffic accidents involving vehicles equipped with modern active and passive safety systems. The aim of the study is to enhance the validity of vehicle forensic examinations of traffic accidents by refining methodological approaches to their conduct, taking into



*account the impact of modern active and passive safety systems in vehicles. To this end, the study analyzes the impact of electronic control systems on the occurrence and progression of traffic accidents, on the formation of trace evidence, and on the nature of vehicle damage. Particular attention is paid to the role of automated driver assistance systems, which can significantly alter vehicle behavior in critical situations. This, in turn, complicates the establishment of cause-and-effect relationships during expert analysis. The limitations of traditional methods of automotive forensic examination in the context of intelligent vehicles have been identified. In particular, the insufficient informativeness of classical computational models without accounting for digital data. The feasibility of integrating electronic vehicle data, on-board recorders, diagnostic systems, and telematics modules into the expert investigation process is substantiated. The role of active safety systems in altering vehicle motion dynamics and of passive safety systems in determining the consequences of traffic accidents is revealed. An improved approach to conducting automotive technical examinations is proposed, based on the comprehensive use of traditional calculation methods, analysis of material traces, electronic data, and mathematical modeling tools, taking into account the algorithms of safety system operation. The results obtained are aimed at improving the accuracy of expert conclusions, objectifying the process of reconstructing the circumstances of traffic accidents, and improving the methodological support for automotive technical expertise in the context of modern automotive technology development and the digitalization of the transportation industry.*

**Key words:** *automotive technical examination, traffic accident, active safety system, passive safety system, electronic control systems, expert analysis, mathematical modeling.*

### Постановка проблеми

Розвиток автомобільного транспорту характеризується широким впровадженням електронних систем управління та комплексів активної й пасивної безпеки, які істотно впливають на процес виникнення та перебігу дорожньо-транспортних пригод (ДТП) [8, 18]. При цьому ДТП призводять до значних людських втрат та матеріальних збитків, що обумовлює підвищені вимоги до об'єктивності їх розслідування та наукового обґрунтування експертних висновків.

Під час розслідування ДТП у системі доказування ключову роль відіграє автотехнічна експертиза. Вона являє собою спеціалізоване дослідження, спрямоване на визначення механізму та умов виникнення ДТП, оцінку технічного стану транспортного засобу (ТЗ), встановлення причин несправностей його вузлів і систем, а також виявлення факторів, що сприяли виникненню пригоди [2]. Традиційно такі дослідження базуються на аналізі кінематичних параметрів руху, слідової інформації та деформаційних пошкоджень [1, 4].

В умовах використання сучасних ТЗ ці підходи до проведення автотехнічної експертизи є недостатніми, оскільки електронні системи активно впливають на динаміку руху ще до моменту зіткнення. Це формує потребу у впровадженні оновлених методичних рішень, які враховують поведінку водія, ТЗ із сучасними системами безпеки, а також передбачають використання додаткових джерел інформації.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика експертиз ДТП достатньо широко висвітлена у наукових працях як вітчизняних, так і закордонних дослідників [1–3, 4, 7, 13–15, 17]. Ними зазначено, що сучасний етап розвитку ТЗ і систем безпеки формує нові виклики, які не повною мірою відображені в класичних підходах.

Суттєвий внесок у розвиток теоретичних основ автотехнічної експертизи зробили українські вчені, зокрема Абрамчук В. А., Голубович Л., Діордіца В. М., Кравченко В. О., Кашканов В. А., Рейко С. Л., Степанюк Р. Л. й ін. [3, 4, 7]. У роботах науковців наголошується на комплексному характері експертного аналізу, який охоплює технічний стан ТЗ, дорожні обставини та дії учасників пригоди. Було виявлено місце та сутність судової автотехнічної експертизи в системі судових експертиз, а також визначено її предмет та об'єкти дослідження [7].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із вивченням методичних аспектів проведення автотехнічних експертиз [4]. Було доведено, що експертиза спрямована на встановлення механізму ДТП, визначення швидкісних режимів, гальмового шляху, технічного стану ТЗ та інших параметрів, що мають значення для встановлення причин пригоди [2, 6, 10, 12, 18]. Водночас відзначається необхідність врахування електронних систем керування ТЗ та використання цифрових даних при реконструкції ДТП, що дозволяє підвищити точність і обґрунтованість експертних висновків [5].

Аналіз наукових джерел показує, що більшість наявних методик [1, 3, 4] орієнтовані на ТЗ традиційної конструкції й лише частково враховують вплив сучасних систем активної та пасивної безпеки. Це створює певну прогалину між рівнем розвитку автомобільного транспорту та сучасним методичним забезпеченням експертної діяльності. Відповідно такі дослідження підкреслюють необхідність інтеграції технічних підходів при проведенні експертизи.

У дослідженнях, які присвячені аналізу умов невизначеності при проведенні автотехнічної експертизи, зазначається, що процес прийняття рішень експертом часто відбувається за умов неповноти інформації. Вона знижує точність результатів та потребує вдосконалення методичних підходів [3, 4]. Зокрема, наявність значної теоретичної бази у сфері автотехнічної експертизи водночас виявляє необхідність досліджень, що спрямовані на адаптацію методик експертиз до умов використання ТЗ із сучасними системами безпеки.

### Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є підвищення обґрунтованості автотехнічної експертизи ДТП шляхом удосконалення методичних підходів до її проведення з урахуванням впливу сучасних систем активної та пасивної безпеки транспортних засобів.

### Методологія дослідження

Методологічною основою дослідження є комплекс загальнонаукових і спеціальних методів, що забезпечують всебічний аналіз особливостей проведення автотехнічної експертизи ДТП за участю ТЗ, оснащених сучасними системами активної та пасивної безпеки.

У процесі дослідження застосовано методи теоретичного аналізу, зокрема аналіз і синтез наукових джерел, нормативно-правових актів та технічної документації, що регламентують функціонування систем безпеки ТЗ і проведення автотехнічних експертиз.

Для дослідження впливу електронних систем керування на процес виникнення та перебігу ДТП використано методи системного аналізу, які дали змогу розглядати ТЗ як складну технічну систему, що функціонує у взаємодії з водієм і дорожнім середовищем. Порівняльний метод дозволив зіставити традиційні підходи до автотехнічної експертизи з сучасними методиками, що враховують вплив цифрових технологій. Це дало змогу виявити обмеження класичних підходів та обґрунтувати необхідність їх адаптації. Застосування ймовірнісного підходу дозволило враховувати невизначеність вихідних даних та підвищити надійність отриманих результатів. Для відновлення траєкторії руху ТЗ застосовано адаптаційний підхід. Для оцінки можливості запобігання ДТП застосовано інтегральний дистанційний підхід. З метою більш точного встановлення механізму ДТП та оцінки наслідків використано комплексний підхід.

У межах підготовки тексту дослідження використовувалися інструменти штучного інтелекту як допоміжний засіб для: аналізу великих обсягів даних та їх адаптації до теми; використання як «глобальна бібліотека» з можливістю виходу на першоджерела для перевірки інформації; обробки інформації на основі контекстного аналізу та семантичного пошуку. Усі узагальнення та висновки авторами сформульовані самостійно на основі аналізу джерел та власного наукового підходу з дотриманням сучасних рекомендацій щодо використання штучного інтелекту у дослідженнях.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Розвиток автомобільного транспорту характеризується активним впровадженням електронних систем керування та комплексів сучасної активної та пасивної безпеки, що істотно впливають на процес виникнення та перебігу ДТП [8, 18]. У зв'язку з цим класичні методичні підходи до автотехнічної експертизи потребують адаптації з урахуванням впливу електронних систем керування. [12].

Розглянемо підхід до формалізації впливу сучасних систем активної безпеки на динаміку руху ТЗ. Він базується на введінні узагальненого коефіцієнта впливу електронних систем керування на параметри гальмування та траєкторії руху, що дозволяє коригувати традиційні розрахункові залежності в умовах відсутності класичних слідів юзу.

У сучасних ТЗ, які оснащені системами активної безпеки (антиблокувальна система гальм – ABS, система електронного розподілу гальмівних зусиль – EBD, система курсової стабілізації – ESP/ESC, система екстреного гальмування – АЕВ та інші компоненти систем допомоги водієві – ADAS) [9], здійснюється автоматичне регулювання поздовжньої та поперечної динаміки руху. Це призводить до суттєвого відхилення фактичних параметрів гальмування від значень, які приймаються у класичних моделях автотехнічної експертизи.

У традиційних розрахунках гальмівний шлях та уповільнення визначаються виходячи з припущення про постійний коефіцієнт зчеплення шин з дорожнім покриттям та відсутністю втручання електронних систем керування. Однак у реальних умовах ADAS змінює режим гальмування шляхом імпульсного регулювання гальмівного тиску, перерозподілу гальмівних зусиль між осями, корекції траєкторії руху, активного автоматичного гальмування [9].

Фактична ефективність уповільнення ТЗ не може бути повністю описана лише класичним коефіцієнтом зчеплення, оскільки він не враховує алгоритмічний характер керування гальмівним процесом, зумовлений роботою електронних систем активної безпеки. У зв'язку з цим запропоновано використання коригувального коефіцієнта  $k_{ADAS}$ , який є узагальненим параметром, що кількісно характеризує ступінь впливу систем ADAS на реалізоване уповільнення транспортного засобу.

З урахуванням цього фактичне уповільнення формується як результат взаємодії фізичних параметрів руху та алгоритмічного керування гальмуванням, що дозволяє відобразити реальні умови функціонування сучасних систем активної безпеки. Коригувальний коефіцієнт  $k_{ADAS}$  визначається як відношення фактичного уповільнення до уповільнення, розрахованого за класичною моделлю без урахування впливу електронних систем:

$$k_{ADAS} = \frac{a_{fakt}}{a_{class}}, \quad (1)$$

де  $a_{fakt}$  – фактичне уповільнення ТЗ з урахуванням роботи ADAS;

$a_{class}$  – розрахункове уповільнення за класичною моделлю без врахування електронних систем.

Запропонований підхід дозволяє узагальнено враховувати вплив систем активної безпеки на кінематику ТЗ та створює основу для підвищення точності реконструкції ДТП, зокрема при використанні даних бортових реєстраторів подій (EDR).

Коригувальний коефіцієнт  $k_{ADAS}$  є безрозмірним параметром, який відображає ступінь відхилення фактичного процесу гальмування від ідеалізованої фізичної моделі. Його величина узагальнює вплив низки чинників, зокрема: алгоритмів функціонування гальмівної системи, характеристик дорожнього покриття, режимів роботи систем активної безпеки та рівня втручання електронних компонентів у процес керування транспортним засобом. Запровадження коефіцієнта  $k_{ADAS}$  дає змогу модифікувати традиційні підходи до визначення швидкості руху і гальмівного шляху з урахуванням реальних умов експлуатації сучасних транспортних засобів. Крім того, сприяє підвищенню достовірності відтворення обставин ДТП у межах автотехнічної експертизи.

Коригувальний коефіцієнт  $k_{ADAS}$  забезпечує перехід від ідеалізованої детермінованої моделі гальмування до гнучкої адаптивної схеми, що враховує специфіку функціонування сучасних систем активної безпеки в реальних умовах. Його використання дає змогу зменшити похибки розрахунків у випадках відсутності слідів блокування коліс, точніше визначати швидкість транспортного засобу перед ДТП, узгоджувати результати аналітичних оцінок із даними цифрових систем, а також підвищувати надійність відтворення механізму події.

Коригувальний коефіцієнт може набувати таких значень:

$k_{ADAS} > 1$  – підвищення ефективності гальмування (наприклад, оптимізація ABS/ESC, сухе покриття);

$k_{ADAS} < 1$  – зниження ефективності (затримки спрацювання, слизьке покриття, обмеження системи);

$k_{ADAS} = 1$  – відсутність впливу електронних систем (умовна класична модель).

Насамперед слід зазначити, що автотехнічна експертиза являє собою спеціалізоване дослідження, що спрямоване на визначення механізму та умов виникнення ДТП, оцінку технічного стану ТЗ, встановлення причин несправностей їх вузлів та деталей, а також виявлення факторів, які сприяли або призвели до настання ДТП [2]. При цьому традиційна автотехнічна експертиза базується на аналізі кінематичних параметрів руху ТЗ, слідової інформації (гальмівний шлях, сліди ковзання, уламки), а також деформацій кузова [1, 4].

Такі підходи є ефективними для ТЗ без складних електронних систем, однак у сучасних ТЗ їх застосування є обмеженим. Це пояснюється тим, що системи активної безпеки можуть суттєво змінювати динаміку руху ТЗ ще до моменту зіткнення, що і потребує коригування традиційних розрахункових залежностей з урахуванням їх впливу.

У цьому контексті доцільно застосовувати адаптивний підхід до відтворення траєкторії руху ТЗ. Він передбачає врахування ймовірного втручання систем стабілізації типу ESP/ESC та ґрунтується на інтеграції аналізу матеріальних слідів, електронної інформації й результатів математичного моделювання.

Сутність запропонованого підходу полягає в інтерпретації фактичної траєкторії руху транспортного засобу як результату поєднаного впливу дій водія, динамічних властивостей самого транспортного засобу та керівних сигналів електронних систем стабілізації. Відтак її відтворення здійснюється не шляхом безпосереднього обчислення, а через побудову множини можливих варіантів траєкторій із подальшим відбором тих, що найкраще відповідають критерію узгодженості.

У межах реалізації адаптивного підходу визначаються ключові параметри: положення ТЗ в момент зіткнення, напрям його релятивного переміщення, а також ділянка початку гальмування (на основі аналізу слідів або даних бортових реєстраторів подій – EDR). При цьому доцільним є застосування коригувального коефіцієнта, що інтегрально відображає вплив системи EBD та інших електронних підсистем на реальні процеси керування.

$$k_{ADAS} = f(k_1, k_2, \varphi, a), \quad (2)$$

де  $k_1, k_2$  – коефіцієнти розподілу гальмівних сил, що регулюються системою EBD;

$\varphi$  – коефіцієнт зчеплення;

$a$  – уповільнення.

Система EBD забезпечує адаптивний розподіл гальмівних зусиль між осями ТЗ залежно від динамічного перерозподілу навантаження під час гальмування [8]. Для порівняння: у класичній моделі гальмування передбачається фіксований розподіл гальмівних сил між осями ТЗ [3, 4, 8]:

$$F_{b1} = \varphi \cdot N_1, \quad (3)$$

$$F_{b2} = \varphi \cdot N_2, \quad (4)$$

де  $F_{b1}, F_{b2}$  – гальмівні сили на передній і задній осях ТЗ;

$N_1, N_2$  – нормальні реакції опори на осях ТЗ.

У реальних умовах гальмування сучасного ТЗ система EBD змінює розподіл гальмівних сил залежно від ступеня навантаження осей, умов зчеплення та ризику блокування коліс. Це може бути формалізовано через коефіцієнти розподілу гальмівних сил:

$$F_{b1} = k_1 \cdot \varphi \cdot N_1, \quad (5)$$

$$F_{b2} = k_2 \cdot \varphi \cdot N_2 \quad (6)$$

Для автотехнічної експертизи врахування EBD дозволяє пояснити відсутність блокування задніх коліс, обґрунтувати асиметрію слідів гальмування, уточнити величину уповільнення, підвищити точність визначення швидкості перед ДТП.

Окрему проблему становлять системи АЕВ, які здатні частково або повністю зупинити ТЗ без участі водія у разі виявлення перешкоди. Їх спрацювання змінює традиційні уявлення про причинно-наслідкові зв'язки ДТП, оскільки ініціатором гальмування може виступати не водій, а електронна система керування [8, 9, 12].

З метою підвищення точності відтворення параметрів руху ТЗ для автотехнічної експертизи запропоновано класифікацію сценаріїв функціонування системи автоматичного екстреного гальмування (АЕВ) інтегровано в адаптивну модель гальмування шляхом введення коригувального коефіцієнта  $k_{ADAS}$ . На відміну від класичних підходів, де процес гальмування розглядається як детермінований, запропонований підхід враховує варіативність алгоритмів роботи електронних систем активної безпеки.

У межах моделі коефіцієнт  $k_{ADAS}$  відображає відхилення реального процесу гальмування від ідеалізованого та набуває різних значень залежно від сценарію спрацювання АЕВ:

1) для сценарію *повного уникнення зіткнення* характерні значення

$k_{ADAS} \approx 1$ , що відповідає максимально ефективній реалізації гальмівного потенціалу транспортного засобу;

2) у випадку *часткового зниження швидкості* спостерігається

$0 < k_{ADAS} < 1$ , що відображає обмежену ефективність гальмування внаслідок недостатнього часу реагування;

3) при *несвоєчасному спрацюванні* коефіцієнт наближається до нуля  $k_{ADAS} \rightarrow 0$ , що свідчить про мінімальний вплив системи на зміну швидкості;

4) для сценарію *помилкової активації* можливі від'ємні або близькі до нуля значення  $k_{ADAS}$ , що інтерпретується як дестабілізаційний вплив на режим руху.

Такий підхід дозволяє формалізувати вплив систем АЕВ на параметри гальмування та забезпечує узгодження між результатами розрахункового моделювання і фактичними даними, зокрема отриманими з бортових реєстраторів подій (EDR). Використання коефіцієнта  $k_{ADAS}$  у поєднанні з класифікацією сценаріїв створює підґрунтя для більш точної ідентифікації умов виникнення ДТП та підвищує вірогідність експертних висновків.

У цьому контексті особливого значення набуває аналіз електронних даних ТЗ. Зокрема, EDR (Event Data Recorder), які є важливим елементом сучасних ТЗ [11, 16]. Вони забезпечують об'єктивну фіксацію параметрів руху та технічного стану ТЗ під час експлуатації, а також у передаварійний і аварійний періоди. Сучасні ТЗ генерують значний обсяг електронної інформації, яка відображає параметри руху, дії водія та стан систем керування. На відміну від традиційних матеріальних слідів, ці дані мають часову прив'язку та високу точність.

Відповідно до нормативних вимог [11, 16], такі пристрої здатні реєструвати широкий спектр даних, необхідних для аналізу ДТП. Зокрема, EDR фіксують швидкість ТЗ, положення педалі акселератора, стан гальмівної системи, інтенсивність уповільнення, а також використання ременів безпеки водієм і пасажиром. Крім того, у деяких моделях передбачено запис параметрів роботи систем активної безпеки, таких як ABS та ESP, що дозволяє більш точно реконструювати механізм розвитку ДТП [12].

У зв'язку з цим запропоновано розглядати сукупність даних, що формуються під час ДТП, як елемент концепції «цифрового сліду ДТП». Під ним розуміється інтегрована система електронної інформації, яка включає дані бортових систем транспортного засобу (зокрема EDR, ADAS, телематичних модулів), а також зовнішні джерела фіксації події (відеореєстратори, системи відеоспостереження та інші засоби реєстрації просторово-часових характеристик руху). Така інформація відображає безперервну часову та просторову динаміку розвитку аварійної ситуації та дозволяє розглядати ДТП як послідовність змін станів транспортної системи.

Інтеграція зазначених даних у межах «цифрового сліду ДТП» створює передумови для їх системного аналізу в єдиному інформаційно-аналітичному середовищі та переходу від фрагментарного опису наслідків до відтворення процесу розвитку події в часовій розгортці.

У цьому контексті показник уповільнення ТЗ доцільно інтерпретувати через коригувальний коефіцієнт  $k_{ADAS}$ , який відображає ступінь впливу електронних систем активної безпеки на реалізовану кінематику руху. Поєднання параметрів «цифрового сліду ДТП» із коефіцієнтом  $k_{ADAS}$  забезпечує можливість узгодженого опису фізичних та алгоритмічних аспектів гальмівного процесу, що, своєю чергою, підвищує інформативність реконструкції ДТП та правдивість експертних висновків.

Відповідно до міжнародних стандартів SAE International та чинних регламентів [11, 16], бортові реєстратори подій (EDR) забезпечують фіксацію параметрів руху ТЗ як у передаварійний період, так і безпосередньо під час зіткнення. Це дозволяє відтворювати динаміку зміни швидкості, характер керуючих дій водія та ефективність функціонування систем активної безпеки.

У контексті запропонованої концепції «цифрового сліду ДТП» дані EDR розглядаються як його ключова складова, що забезпечує формування безперервного інформаційного представлення розвитку ДТП у часово-просторовій розгортці. Такий підхід створює передумови для інтеграції цифрових даних із фізичними параметрами руху транспортного засобу та результатами натурного обстеження місця події.

З метою підвищення точності реконструкції ДТП запропоновано поетапну методику інтеграції даних EDR у процес автотехнічної експертизи:

1. *Валідація даних* – перевірка повноти, достовірності та відсутності спотворень інформації, отриманої з бортових систем.
2. *Часова синхронізація* – узгодження часових міток EDR із даними зовнішніх джерел фіксації (відеозаписи, слідова інформація).
3. *Побудова кінематичної моделі* – відтворення параметрів руху транспортного засобу (швидкість, прискорення, траєкторія) як складової «цифрового сліду ДТП».
4. *Інтеграція з матеріальними слідами* – зіставлення цифрових даних із результатами огляду місця події та слідової обстановки.
5. *Верифікація результатів* – перевірка узгодженості відновленої моделі з фактичними пошкодженнями транспортних засобів та умовами розвитку ДТП.

У межах зазначеного підходу параметри уповільнення ТЗ додатково інтерпретуються через коригувальний коефіцієнт  $k_{ADAS}$ , який відображає вплив електронних систем активної безпеки на реалізовану кінематику руху. Поєднання даних EDR, концепції «цифрового сліду ДТП» та коефіцієнта  $k_{ADAS}$  забезпечує комплексний опис як фізичних, так і алгоритмічних аспектів розвитку ДТП, що підвищує обґрунтованість і точність експертної реконструкції.

Однією з ключових проблем автотехнічної експертизи є наявність невизначеності вихідних даних [3, 4]. В умовах використання ТЗ, обладнаних складними електронними системами керування та активної безпеки, ця проблема ускладнюється, оскільки експерт змушений враховувати не лише класичні фізичні параметри руху, але й алгоритмічні особливості функціонування сучасних систем ADAS.

У цьому контексті доцільним є застосування комплексного підходу до проведення автотехнічної експертизи, що базується на поєднанні традиційних розрахункових методів, цифрових джерел інформації та моделей алгоритмічного керування ТЗ. Такий підхід забезпечує перехід до системного аналізу ДТП як динамічного процесу.

Запропонований узагальнений алгоритм проведення автотехнічної експертизи інтегровано в концепцію «цифрового сліду ДТП», який розглядається як єдина інформаційна основа відтворення розвитку події у часово-просторовій розгортці, а також враховує вплив електронних систем через коефіцієнт  $k_{ADAS}$ , що характеризує відхилення реального режиму гальмування від класичної фізичної моделі.

У межах зазначеного підходу виділяються такі етапи:

1. *Збір та аналіз вихідних даних* – формування інтегрованої інформаційної бази з урахуванням матеріальних, цифрових та телематичних джерел «цифрового сліду ДТП».
2. *Дослідження матеріальних слідів* – аналіз слідової обстановки та пошкоджень транспортних засобів як фізичної частини події.
3. *Обробка електронних даних (EDR, відеофіксація)* – інтеграція цифрових даних у єдиний інформаційний простір та їх узгодження з параметрами  $k_{ADAS}$ .
4. *Побудова кінематичної моделі* – відтворення динаміки руху транспортних засобів з урахуванням впливу систем ADAS.
5. *Моделювання можливих сценаріїв розвитку ДТП* – аналіз альтернативних траєкторій розвитку події з урахуванням різних режимів функціонування електронних систем.
6. *Порівняння результатів із фактичними даними* – верифікація моделі на основі узгодження цифрового сліду ДТП з матеріальними доказами.
7. *Формування експертного висновку* – узагальнення результатів з урахуванням інтегрованого аналізу фізичних та алгоритмічних чинників.

Окрему увагу слід приділити методичним аспектам оцінки дій водія в умовах функціонування систем ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) [12]. У таких випадках виникає питання розмежування відповідальності між водієм і технічною системою.

Для оцінки можливості запобігання ДТП розроблено інтегральний дистанційний підхід, який базується на порівнянні необхідної та наявної дистанції для уникнення зіткнення з урахуванням сумарного часу реагування системи «водій – транспортний засіб – ADAS».

Сумарна година реагування визначається як:

$$t_{sum} = t_{driver} + t_{ADAS} + t_{act} \quad (7)$$

де  $t_{driver}$  – час сприйняття та реакції водія;

$t_{ADAS}$  – час виявлення небезпеки та прийняття рішення системою;

$t_{act}$  – час реалізації гальмівного впливу (затримка приводу).

З урахуванням часу реагування повна дистанція зупинки:

$$S_{req} = v \cdot t_{sum} + \frac{v^2}{2a_{eff}}, \quad (8)$$

де  $v$  – швидкість руху;

$a_{eff}$  – ефективне уповільнення (з урахуванням ADAS).

Для критерію можливості уникнення ДТП вводимо умову:

$$S_{avail} \geq S_{req}, \quad (9)$$

де  $S_{avail}$  – фактична відстань до перешкоди в момент виникнення небезпеки.

Для зручності аналізу запропоновано безрозмірний критерій:

$$K_{avoid} = \frac{S_{avail}}{S_{req}}, \quad (10)$$

Критерій може набувати таких значень:

$K_{avoid} \geq 1$  – ДТП можна було уникнути;

$K_{avoid} < 1$  – уникнення неможливе;

$K_{avoid} \approx 1$  – гранична ситуація.

Особливістю підходу є те, що:

1) при активному ADAS:

$$t_{sum} \downarrow, a_{eff} \uparrow$$

2) при пасивному або запізнілому:

$$t_{sum} \uparrow, a_{eff} \downarrow$$

На відміну від традиційних підходів, наведений підхід враховує сукупну реакцію людини та системи, поєднує часові та просторові параметри, дозволяє вводити кількісний критерій оцінки, що придатний для інтеграції з EDR-даними. Підхід дозволяє об'єктивно визначати можливість запобігання ДТП, розмежовувати відповідальність між водієм і системою, підвищити доказовість експертного висновку, використовувати цифрові дані (ADAS, EDR).

Для прикладу застосування запропонованого підходу розглянемо умовну дорожньо-транспортну ситуацію, в якій ТЗ рухається зі швидкістю  $v=20$  м/с ( $\approx 72$  км/год). За результатами аналізу (зокрема, на основі даних EDR) встановлено: фактичне уповільнення –  $a_{fakt} = 7,2$  м/с<sup>2</sup>; розрахункове (класичне) уповільнення:  $a_{class} = 6,0$  м/с<sup>2</sup>.

1. Визначимо коригувальний коефіцієнт.

$$k_{ADAS} = \frac{a_{fakt}}{a_{class}} = \frac{7,2}{6,0} = 1,2.$$

Отже,  $k_{ADAS} > 1$ , що свідчить про підвищення ефективності гальмування за рахунок роботи систем ADAS (наприклад, ABS та EBD).

2. Визначимо сумарний час реагування.

1) час реакції водія:  $t_{driver} = 0,8$  с  $t_{driver} = 0,8$ с;

2) час спрацювання ADAS:  $t_{ADAS} = 0,3$ с  $t_{ADAS} = 0,3$ с;

3) час реалізації гальмування:  $t_{act} = 0,2$ с  $t_{act} = 0,2$ с.

Тоді:

$$t_{sum} = 0,8 + 0,3 + 0,2 = 1,3 \text{ с.}$$

3. Визначимо необхідну дистанцію зупинки.

Повна дистанція зупинки складається з двох частин:

– реакційна дистанція:

$$S_{react} = v \cdot t_{sum} = 20 \cdot 1,3 = 26 \text{ м;}$$

– гальмівний шлях:

$$S_{brake} = \frac{v^2}{2a_{eff}} = \frac{400}{14,4} \approx 27,8 \text{ м}$$

Тоді повна необхідна дистанція:

$$S_{req} = 26 + 27,8 \approx 53,8 \text{ м}$$

4. Оцінка можливості запобігання ДТП.

Нехай фактична відстань до перешкоди:

$$S_{avail} = 55 \text{ м}$$

Тоді безрозмірний критерій:

$$K_{avoid} = \frac{S_{avail}}{S_{req}} = \frac{55}{53,8} \approx 1,02$$

5. Висновок до наведеного прикладу.

Оскільки  $K_{avoid} > 1$ , то у даній ситуації ТЗ мав технічну можливість уникнути зіткнення. При цьому врахування впливу систем ADAS (через  $k_{ADAS}$ ) є критично важливим, оскільки без нього ефективно уповільнення було б меншим, що могло б призвести до значення  $K_{avoid} < 1$  і протилежного висновку.

Наведений приклад показує, що запропонований підхід, як елемент наукового результату, є не лише теоретично обґрунтованим, але й ефективно працює на практиці, забезпечуючи підвищення точності оцінок, достовірність отриманих результатів та можливість його подальшого застосування в експертній діяльності.

Отже, вдосконалення методичних підходів до автотехнічної експертизи ДТП за умов використання сучасних систем безпеки полягає не лише у впровадженні новітніх інструментів, а й у переосмисленні самого експертного мислення. Воно повинно ґрунтуватися на комплексному аналізі взаємодії водія, ТЗ та інтелектуальних систем керування, що підвищує якість експертних висновків і забезпечує їх відповідність сучасному рівню розвитку автомобільної техніки.

Обговорення результатів

Отримані результати свідчать про те, що врахування впливу систем ADAS дозволяє підвищити точність визначення параметрів руху ТЗ порівняно з традиційними методами, які базуються на припущенні про відсутність електронного втручання. Зокрема, введення коефіцієнта  $k_{ADAS}$  забезпечує узгодження розрахункових значень уповільнення з реальними умовами гальмування.

Запропонований інтегральний критерій оцінки можливості запобігання ДТП дозволяє формалізувати процес прийняття експертного рішення та врахувати сумарний вплив людського фактора й автоматизованих систем керування. Це створює передумови для підвищення об'єктивності експертних висновків.

### Висновки

Проведене дослідження засвідчило, що широке впровадження систем активної безпеки та допомоги водієві істотно трансформує динаміку руху ТЗ. Своєю чергою, це обмежує коректність застосування класичних методів автотехнічної експертизи, заснованих виключно на детермінованих фізичних моделях і не враховують алгоритмічний характер керування сучасними гальмівними системами.

У результаті виконаного дослідження отримано такі основні наукові та прикладні результати:

– *вперше* запропоновано коригувальний коефіцієнт  $k_{ADAS}$  як узагальнений параметр, що забезпечує кількісну оцінку впливу електронних систем активної безпеки на процес уповільнення ТЗ. На відміну від традиційних підходів, що базуються на використанні лише коефіцієнта зчеплення, введений параметр дозволяє враховувати алгоритмічну природу керування гальмівним процесом. Його аналітичне представлення у вигляді відношення фактичного уповільнення до розрахункового за класичною моделлю створює можливість застосування  $k_{ADAS}$  у задачах реконструкції ДТП та аналізу даних бортових реєстраторів подій (EDR);

– *удосконалено* підхід до аналізу впливу системи автоматичного екстреного гальмування (АЕВ) на кінематику ТЗ в умовах ДТП шляхом формалізації типових сценаріїв її функціонування та інтеграції їх в адаптивну модель гальмування;

– *розроблено* інтегральний критерій оцінювання можливості уникнення ДТП, який дозволяє здійснювати кількісну інтерпретацію умов запобігання зіткненню з урахуванням сумарного часу реагування системи «водій – транспортний засіб – ADAS»;

– *розширено* методичні засади аналізу ДТП шляхом запровадження концепції «цифрового сліду ДТП» як інтегрованої інформаційної основи, що об'єднує дані бортових систем, телематичних засобів та зовнішніх джерел фіксації події.

Отримані результати формують науково-методичну основу для підвищення точності автотехнічної експертизи в умовах використання сучасних інтелектуальних транспортних систем.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування запропонованих підходів при проведенні експертних досліджень, а також при розробленні програмних засобів моделювання та реконструкції ДТП.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з подальшою інтеграцією запропонованих моделей в автоматизовані експертні системи аналізу ДТП.

**Напрями подальших досліджень.** Подальший науковий пошук доцільно орієнтувати на експериментальну перевірку запропонованих моделей із залученням даних бортових реєстраторів подій, телематичних систем, а також результатів натурних випробувань у різноманітних дорожньо-кліматичних та експлуатаційних умовах функціонування ТЗ.

Особливої актуальності набуває визначення типових, граничних і адаптивних значень коефіцієнта  $k_{ADAS}$  для різних режимів функціонування систем активної безпеки, рівнів їх втручання та сценаріїв дорожніх ситуацій з урахуванням впливу зовнішніх факторів і поведінки водія.

Важливим напрямом досліджень є розроблення програмних комплексів для автоматизованої реконструкції ДТП з інтеграцією цифрових слідів, що дозволить підвищити точність і об'єктивність експертних висновків, мінімізувати вплив суб'єктивних чинників та забезпечити більш правдиве відтворення обставин ДТП.

Перспективним напрямом досліджень є застосування методів машинного навчання для обробки великих масивів даних. Особливої уваги потребують питання формалізації критеріїв розмежування відповідальності між водієм та автоматизованими системами керування, а також удосконалення нормативно-правового забезпечення у цій сфері.

### Список використаної літератури

1. Голубович Л., Голубович А., Голубович П., Зубко М., Куртев А. Сучасний стан судово-медичного розпізнавання механізмів утворення ушкоджень при автомобільній травмі. *Судово-медична експертиза*. 2017. № 1. С. 37–40. DOI: <https://doi.org/10.24061/2707-8728.1.2017.8>.
2. Інженерно-транспортна (автотехнічна) експертиза. Режим доступу: <https://kndise.gov.ua/expertise/engineering-and-transport-examinations>.
3. Кашканов А. А., Рейко С. Л., Діордіца В. М., Кашканов В. А., Кашканова А. А. Підвищення якості автотехнічної експертизи ДТП в умовах композиційної невизначеності. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2020. Том 12, № 2. С. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-12-2-61-67>
4. Кашканов А. А. Методика оцінювання і зменшення невизначеності в задачах автотехнічної експертизи дорожньо-транспортних пригод. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2020. №1 (11), С. 71–78. DOI: [10.31649/2413-4503-2020-11-1-71-78](https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-11-1-71-78).
5. Кравченко В. О., Лисенко С. П. Вплив електронних систем стабілізації руху на механізм дорожньо-транспортної пригоди. *Автошляховик України*. 2018. № 4. С. 35–39.
6. Науково-методичні рекомендації з питань підготовки та призначення судових експертів та експертних досліджень: затв. наказом Міністерства юстиції України від 08.10.1998 № 53/5 (у ред. від 26.12.2012 № 1950/5, зі змінами, внесеними наказом від 27.07.2015 № 1350/5) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0705-98>.
7. Степанюк Р. Л., Абрамчук В. А. Автотехнічна експертиза та її місце в системі судових експертів в Україні. *Вісник Харківського національного університету внутрішніх справ*. 2017. № 3 (78). С. 73–79. URL: <https://dspace.univd.edu.ua/entities/publication/f45059e8-6354-4ffa-bc6f-6945e9151dcc>
8. Automotive Handbook. 10th ed. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2018. 1160 p.
9. Crash Data Retrieval (CDR) System – Technical Manual. Bosch, 2019.
10. Commission Delegated Regulation (EU) 2021/1214. Brussels: European Commission, 2021.
11. Event Data Recorders (EDR): 49 CFR Part 563. Washington, 2006.
12. European Association for Accident Research and Analysis (EVU). Challenges in forensic reconstruction of traffic accidents involving ADAS [Електронний ресурс]. 2021. Режим доступу: <https://www.evu-online.org/>.
13. Gibson T., Anderson R. The impact of autonomous emergency braking systems on crash reconstruction // *Accident Analysis & Prevention*. 2019. Vol. 129. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.04.015>
14. Meral O, Aktas EÖ, Ersel M. Examination of morbidity and mortality of cases according to intra-vehicle position and accident mechanism // *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*. 2018. Vol. 24 (3). 216-223.
15. Pedley D K, Thakore S. Difference in injury pattern between drivers and front seat passengers involved in road traffic accidents in Scotland // *Emergency Medicine Journal*. 2004. Vol. 21 (2). DOI: <https://doi.org/10.1136/emj.2003.012369>.
16. SAE J1698-1: Event Data Recorder – Output Data Definition. SAE International, 2008.
17. Sadeghi-Bazargani H, Samadirad B., Shahedifar N., Golestani M. Epidemiology of Road Traffic Injury Fatalities among car users // *Bulletin of Emergency & Trauma*. 2018. Vol. 6 (2). 146–154. DOI: <https://doi.org/10.29252/beat-060209>.
18. UN Regulation No. 160. Geneva: UNECE, 2021.
19. Van Arem B., van Driel C. J. G., Visser R. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2006. Vol. 7(4). P. 429–436 DOI : <https://doi.org/10.1109/TITS.2006.884615>

### References

1. Golubovych L., Golubovych A., Golubovych P., Zubko M., Kurtiev A. (2017). Suchasnyi stan sudovo-medychnoho rozpoznavannia mekhanizmiv utvorennia ushkodzen pry avtomobilnii travmi. *Sudovo-medychna ekspertyza*, (1), 37–40. DOI: <https://doi.org/10.24061/2707-8728.1.2017.8>
2. Kyiv Scientific Research Institute of Forensic Expertise. (n.d.). *Engineering and transport (auto-technical) expertise*. <https://kndise.gov.ua/expertise/engineering-and-transport-examinations>
3. Kashkanov, A. A., Reiko, S. L., Diorditsa, V. M., Kashkanov, V. A., & Kashkanova, A. A. (2020). Pidvyshchennia yakosti avtotehnicnoi ekspertyzy DTP v umovakh kompozytsiinoi nevyznachenosti. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 12(2), 61–67. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-12-2-61-67>

4. Kashkanov, A. A. (2020). Metodyka otsiniuvannia i zmenshennia nevyznachenosti v zadachakh avtotekhnichnoi ekspertyzy dorozhno-transportnykh pryhod. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 1(11), 71–78. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-11-1-71-78>
5. Kravchenko, V. O., & Lysenko, S. P. (2018). The influence of electronic stability control systems on the mechanism of road traffic accidents. *Road Engineer of Ukraine*, (4), 35–39.
6. Ministry of Justice of Ukraine. (1998). *Scientific and methodological recommendations on the preparation and appointment of forensic examinations* (Order No. 53/5, as amended). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0705-98>
7. Stepaniuk, R. L., & Abramchuk, V. A. (2017). Avtotekhnichna ekspertyza ta yii mistse v systemi sudovykh ekspertyz v Ukraini. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu vnutrishnikh sprav*, 3(78), 73–79. <https://dspace.univd.edu.ua/entities/publication/f45059e8-6354-4ffa-bc6f-6945e9151dcc>
8. Robert Bosch GmbH. (2018). *Automotive handbook* (10th ed.).
9. Bosch. (2019). *Crash Data Retrieval (CDR) system technical manual*.
10. European Commission. (2021). *Commission Delegated Regulation (EU) 2021/1214*.
11. National Highway Traffic Safety Administration. (2006). *Event Data Recorders (49 CFR Part 563)*.
12. European Association for Accident Research and Analysis. (2021). *Challenges in forensic reconstruction of traffic accidents involving ADAS*. <https://www.evu-online.org/>
13. Gibson, T., & Anderson, R. (2019). The impact of autonomous emergency braking systems on crash reconstruction. *Accident Analysis & Prevention*, 129, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.04.015>
14. Meral, O., Aktaş, E. Ö., & Ersel, M. (2018). Examination of morbidity and mortality according to intra-vehicle position and accident mechanism. *Ulus Travma ve Acil Cerrahi Dergisi*, 24(3), 216–223.
15. Pedley, D. K., & Thakore, S. (2004). Difference in injury pattern between drivers and front seat passengers involved in road traffic accidents in Scotland // *Emergency Medicine Journal*, 21(2), 197–198. <https://doi.org/10.1136/emj.2003.012369>
16. SAE International. (2008). *SAE J1698-1: Event data recorder – Output data definition*.
17. Sadeghi-Bazargani, H., Samadirad, B., Shahedifar, N., & Golestani, M. (2018). Epidemiology of road traffic injury fatalities among car users: A study based on forensic medicine data in East Azerbaijan of Iran. *Bulletin of Emergency & Trauma*, 6(2), 146–154. <https://doi.org/10.29252/beat-060209>
18. United Nations Economic Commission for Europe. (2021). *UN Regulation No. 160*.
19. Van Arem, B., Van Driel, C. J. G., & Visser, R. (2006). The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4), 429–436. <https://doi.org/10.1109/TITS.2006.884615>

Дата першого надходження статті до видання: 15.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.05.2026