

doi: 10.32620/oikit.2026.108.09

УДК 629.113.014

К. В. Доля, А. М. Григорович

Експертна оцінка ефективності гальмування з урахуванням ABS/ESP та відсутності слідів «юз»

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

У статті розглянуто проблематику автотехнічної експертизи ефективності гальмування сучасних дорожніх транспортних засобів в умовах роботи систем ABS/ESC, коли на місці ДТП часто відсутні суцільні «юзові» сліди блокування коліс. Відсутність таких слідів ускладнює традиційні прийоми реконструкції (вимір гальмового шляху за слідовою картиною) та створює типові спірні ситуації щодо факту гальмування і його результативності. Показано, що ключовою фізичною причиною «зникнення» класичних слідів є циклічне регулювання тиску в гальмівних механізмах, унаслідок чого колесо переважно зберігає обертання та реалізує гальмування поблизу оптимальної області ковзання. За цих умов експерт змушений переходити від якісних суджень до формалізованої кількісної оцінки, що спирається на модель руху, параметри взаємодії «шина–дорога» та облік невизначеностей. Запропоновано комбінований підхід, який включає: аналітичну модель зупиночної відстані як суму реакційної та гальмівної складових, параметризацію дорожніх умов через коефіцієнт зчеплення μ та, за наявності цифрових записів (EDR/CAN/бортова телематика), можливість його оцінювання з динамічних даних, узагальнене врахування технічної деградації гальмівної системи через коефіцієнт $k_a \in (0,1)$, що зменшує досяжене середнє уповільнення навіть при працездатній ABS; імовірнісне/інтервальне відображення результатів методом Монте-Карло, що дозволяє отримувати не «одне число», а діапазон можливих значень $s\Sigma$ та приросту $\Delta s\Sigma$ між номінальним і деградованим сценаріями. Наголошено, що для експертної практики найбільш критичними джерелами похибки є невизначеність μ (стан покриття, шини, локальні мікрозони) та сумарний час реакції і затримок t_r .

На прикладі розрахункового експерименту продемонстровано вплив деградації ($k_a = 1.00; 0.85; 0.70$) на структуру зупиночної відстані: реакційна складова s_r не змінюється з технічним станом гальм, тоді як гальмова складова s_b зростає обернено пропорційно k_a . Показано, що представлення результатів у вигляді квантільних інтервалів дозволяє коректно формувати висновки за неповних вихідних даних та прямо відображає реальну невизначеність реконструкції. Наукова новизна полягає у формалізованому поєднанні аналітичної моделі з параметризацією технічного стану через k_a та імовірнісним поданням результату, що підвищує відтворюваність і доказовість експертних висновків для випадків ABS/ESC без суцільних слідів блокування.

Ключові слова автотехнічна експертиза; ABS; ESC; ефективність гальмування; зупиночна відстань; коефіцієнт зчеплення; час реакції; Монте-Карло невизначеність; EDR/CAN.

Постановка проблеми

Актуальність дослідження ефективності гальмування в автотехнічній експертизі зростає разом із ускладненням конструкції сучасних дорожніх транспортних засобів та широким упровадженням електронних систем активної безпеки. Якщо для автомобілів без ABS експерт часто мав можливість спиратися на класичні «юзові» сліди (суцільні сліди ковзання) як на відносно наочний індикатор інтенсивного гальмування і приблизної оцінки гальмового шляху, то в умовах роботи ABS/ESC слідова картина істотно змінюється. Внаслідок циклічного регулювання тиску в гальмівних механізмах колесо переважно зберігає обертання, а отже традиційні суцільні сліди блокування можуть бути відсутніми навіть за екстреного гальмування.

Ця обставина створює типову експертну проблему: учасники ДТП або свідки можуть стверджувати, що «гальм не було», посилаючись на відсутність видимих слідів на покритті, тоді як водій може наполягати на натисканні педалі гальма та спрацюванні ABS. У таких випадках необхідно обґрунтовано відповісти на запитання не лише про факт гальмування, а й про його результативність: яке уповільнення було досяжним за конкретних дорожніх умов, чи відповідали технічні характеристики гальмівної системи нормативним вимогам та чи могла недостатня ефективність гальмування перебувати в причинному зв'язку з настанням події.

Додатковою причиною актуальності є неоднорідність дорожніх умов у реальній аварійній ситуації. Електронні системи стабілізації (ESC) і розподілу гальмівних сил можуть активно втручатися в процес гальмування та керування, особливо на покриттях зі змінним коефіцієнтом зчеплення (наприклад, «ліва смуга – лід, права – асфальт», наїзд на розмітку, колію, вологі ділянки, бруд/пісок). Такі мікрозміни зчеплення впливають на максимально досяжне уповільнення, стійкість автомобіля та можливість водія зберегти керованість, а отже безпосередньо впливають на реконструкцію ДТП.

У контексті експертизи важливо розуміти, що ABS/ESC не «скорочують гальмовий шлях» автоматично за будь-яких умов. Їхнє основне призначення – запобігання блокуванню коліс та збереження керованості і курсової стійкості. На деяких покриттях (пухкий сніг, гравій, пісок) блокування може формувати клин перед колесом і давати меншу дистанцію зупинки, однак із суттєвою втратою керованості на твердих покриттях (сухий/вологий асфальт) ABS зазвичай дозволяє підтримувати гальмування поблизу оптимального ковзання, але реальна ефективність залежить від стану шин, навантаження, розподілу маси, температурного режиму гальм та справності елементів гальмівної системи.

Практична складність для експерта полягає в тому, що відсутність «юзових» слідів зменшує обсяг прямих вимірюваних даних на місці події та змушує спиратися на непрямі ознаки. До таких ознак належать: переривчасті або слабо виражені сліди від протектора (інколи без чітких меж), зміни текстури/забруднення покриття, кінематичні характеристики зіткнення, розташування ТЗ після пригоди, а також цифрові дані (за наявності) з електронних блоків керування, EDR/подієвих реєстраторів, систем телематики тощо. Водночас ці дані мають власні обмеження щодо точності, доступності та інтерпретації, що потребує методично коректного підходу.

Ще один аспект актуальності пов'язаний із необхідністю встановлення причинно-наслідкового зв'язку між технічним станом гальмівної системи та ДТП. Сам факт наявності несправності (знос фрикційних елементів, повітря в гідроприводі, витік, несправність вакуумного підсилювача, нерівномірність гальмування по осях, дефекти датчиків швидкості коліс тощо) не є автоматичним доказом причини ДТП. Експерт має кількісно оцінити, наскільки така несправність змінює досяжне уповільнення, час наростання гальмівної сили та зупинку відстань, і чи була в конкретних умовах у водія технічна можливість уникнути зіткнення.

Таким чином, актуальність теми визначається сукупністю факторів:

- поширеністю ABS/ESC у сучасному автопарку та зміною слідової картини гальмування;
- високою чутливістю результатів реконструкції до коефіцієнта зчеплення та стану шин;

- необхідністю переходу від якісних суджень («гальмував/не гальмував») до кількісних оцінок ефективності гальмування та приросту відстані зупинки
- потребою формалізованого врахування невизначеностей вихідних даних.

1. Аналіз літератури

Становлення методик автотехнічної експертизи гальмування історично спиралося на аналіз слідової інформації (довжина та характер слідів ковзання), що давало змогу відносно прямо оцінювати гальмовий шлях і початкову швидкість. У класичних роботах, присвячених діагностиці роботи ABS за слідами на покритті, підкреслювалося, що регуляція тиску призводить до переривчастої або слабо вираженої картини на твердому покритті, а також до істотної залежності «видимості» слідів від типу шин і стану дороги [1]. Пізніші дослідження гальмування з використанням GPS/інструментальних вимірювань підтвердили практичну доцільність відокремлення реакційної та гальмової складових зупинної відстані та показали, що похибки в оцінці коефіцієнта зчеплення та часу реакції можуть домінувати над похибками вимірювання швидкості [2].

Окремий пласт сучасних публікацій стосується ефективності електронних систем активної безпеки (ABS/ESC/ADAS) з позицій зниження аварійності та тяжкості наслідків. Оглядові роботи з ABS, як правило, узагальнюють принципи регулювання, вплив на керованість і типові експлуатаційні обмеження, що важливо для коректної експертної інтерпретації (система покращує керованість, але не гарантує мінімального гальмового шляху на будь-якому покритті) [5]. Для систем автоматичного екстреного гальмування (АЕВ) в емпіричних дослідженнях показано потенціал зменшення травматизму й летальності, але водночас підкреслюється залежність ефекту від сценарію ДТП та умов покриття [6]. Для ESC, на матеріалі страхових/національних баз ДТП, продемонстровано статистично значиме зниження ризику аварій для легкових автомобілів у Європі [7], а також зменшення аварійності в окремих країнах (зокрема за даними Данії) [8]. Для експерта ці результати є важливими як «контекст», але вони не замінюють індивідуальної оцінки конкретного випадку, оскільки популяційний ефект не визначає досягне уповільнення саме в даній дорожній ситуації.

У напрямі реконструкції гальмування на сучасних автомобілях із системами керування гальмами особливу увагу приділяють модельно-орієнтованим підходам до відновлення гальмового моменту та ковзання за сигналами CAN/датчиків. Наприклад, у роботі з оцінкою гальмового моменту за вимірами прискорення показано можливість відновлення параметрів без прямого вимірювання тиску в контурі, що потенційно корисно при аналізі телеметрії або EDR даних [9]. Водночас у практиці експертизи доступ до таких даних може бути обмеженим, а отже необхідні методики, що працюють з «обмеженим набором» польових спостережень.

Ключовою проблемою за відсутності суцільних «юзових» слідів є ідентифікація коефіцієнта зчеплення μ та його просторової мінливості. У сучасній літературі широко представлені підходи оцінювання μ за динамічними моделями та спостерігачами, орієнтовані передусім на задачі керування гальмуванням [10]. Для транспортних реконструкцій ці підходи важливі тим, що пропонують формалізований спосіб вибору μ (зменшення суб'єктивності), але потребують вхідних сигналів достатньої якості. Практичний інтерес мають і дослідження розвитку тиску в гальмівній магістралі (наприклад, аналіз «пульсацій» тиску), які

демонструють, що реальна динаміка наростання/спаду тиску може суттєво впливати на середнє уповільнення на коротких інтервалах [11]. Це напряму пов'язано з питанням експертного відокремлення «технічної можливості уникнення ДТП» від «поведінкових» факторів.

Паралельно розвиваються напрями діагностики та оцінки технічного стану гальмівних систем, зокрема для архітектур brake-by-wire та інтеграції з ESC. Модельно-орієнтовані підходи додаткової діагностики несправностей (FDD) для brake-by-wire систем описують структури спостерігачів/залишків та типові класи відмов [12]. Data-driven підходи, що використовують вібраційні/експлуатаційні сигнали, пропонують альтернативний інструментарій, але ставлять вимоги до репрезентативних наборів даних та узгодженості умов навчання й експлуатації [13]. Для експертизи ці підходи перспективні як допоміжне джерело аргументації, проте наразі потребують стандартизації щодо відтворюваності та оцінки похибок.

Важливою складовою оцінки ефективності гальмування є знос фрикційних елементів і пов'язана з ним деградація характеристик тертя. Сучасні роботи щодо моніторингу зносу колодок/дисків на основі машинного навчання демонструють технічну здійсненність прогнозу стану за сигналами, однак зазвичай орієнтовані на задачі технічного обслуговування, а не на ретроспективну експертну оцінку після ДТП [14]. Експериментальні дослідження впливу температури на коефіцієнт тертя колодок підкреслюють нелінійність і гістерезисні ефекти (fade/recovery), що ускладнює перенесення лабораторних результатів на польові умови [15].

Термомеханічне моделювання гальмівних механізмів залишається актуальним для пояснення причин можливого перегріву та зниження ефективності на тривалих спусках або при повторних інтенсивних гальмуваннях. Чисельні/аналітичні роботи з аналізу дискових гальм демонструють розподіл температур, напружень і деформацій, а також умови виникнення термічних тріщин [16]. Дослідження фрикційного нагрівання при гальмуванні на спуску доповнюють це практичними сценаріями режимів навантаження [17]. Суміжні металографічні роботи показують, що температурні режими здатні змінювати мікроструктуру дисків і прискорювати зношування, що може бути релевантним при експертній оцінці «доаварійного» стану вузлів [18]. Трибологічні експерименти для різних навантажень/температур формують базу для параметризації моделей тертя [19]. Нові чисельні дослідження аварійного гальмування уточнюють поєднання теплових і структурних ефектів та можуть використовуватися для обґрунтування можливості (або неможливості) розвитку fade у конкретних умовах [20].

Окремого розгляду потребують сучасні силові установки (гібриди/електромобілі), де зупинка реалізується як поєднання рекуперативного та фрикційного гальмування. Оглядові й прикладні роботи з рекуперації енергії аналізують алгоритми розподілу гальмівних зусиль і їхній вплив на ефективність та стабільність [21,22]. Для експерта це важливо, оскільки частина уповільнення може створюватися електроприводом без формування характерних слідів на покритті, а також змінюється теплове навантаження на фрикційні пари.

Супутнім «індикатором» інтенсивності гальмування можуть виступати і непрямі технічні/екологічні маркери. Дослідження невихлопних викидів підкреслюють значимість частинок зносу гальм як компонента міського аерозолю [23]. Хоча ці роботи не є прямими методиками експертизи ДТП, вони демонструють інтенсивність процесів зносу і потенційну залежність від режимів гальмування.

Загалом, аналіз публікацій показує, що добре розкритими є:

- принципи роботи ABS/ESC і їхній загальний вплив на керованість;
- статистична оцінка ефективності ESC/AEB щодо зниження аварійності інженерні моделі термомеханіки гальм
- експериментальна база трибології.

Водночас недостатньо опрацьованими (і актуальними для подальших досліджень) залишаються аспекти, критичні саме для автотехнічної експертизи: уніфіковані критерії інтерпретації відсутності «юзових» слідів для автомобілів із ABS/ESC залежно від типу покриття/шин; методики відновлення інтенсивності гальмування при дефіциті цифрових даних (коли EDR/телеметрія недоступні); формалізоване врахування невизначеностей μ , часу реакції та варіативності стану покриття у вигляді інтервальних/ймовірнісних висновків; інтеграція даних про стан шин і покриття (польові вимірювання зчеплення) з моделями зупинки. Окремо актуальними залишаються питання людського фактора (варіативність часу реакції) [24] та коректної інтерпретації параметрів зчеплення за даними вимірювань дорожньої шорсткості/фікції [25].

Мета дослідження полягає у формуванні обґрунтованого підходу до експертної оцінки ефективності гальмування дорожнього транспортного засобу в умовах роботи ABS/ESC за відсутності суцільних «юзових» слідів на покритті, з можливістю переходу від якісного твердження про гальмування до кількісної оцінки досяжного уповільнення та зупинної відстані з урахуванням ключових невизначеностей.

Об'єкт дослідження – процес гальмування дорожнього транспортного засобу в реальних дорожніх умовах під керуванням водія, включно з взаємодією «шина–дорога» та роботою електронних систем активної безпеки (ABS/ESC).

Предмет дослідження – методи й критерії автотехнічної експертизи, які дозволяють за наявними слідами, вихідними даними та (за можливості) цифровими записами оцінити ефективність гальмування (досягне уповільнення, гальмовий шлях і відстань зупинці) та встановити причинно-наслідковий зв'язок між технічними/експлуатаційними факторами і результатом гальмування за умови відсутності суцільних слідів блокування коліс.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- систематизувати ознаки та типові сценарії гальмування з ABS/ESC, за яких суцільні «юзові» сліди можуть бути відсутніми, і визначити інформативні альтернативні джерела даних (сліди протектора, кінематика зіткнення, положення ТЗ, цифрові дані тощо);
- узагальнити підходи до оцінювання коефіцієнта зчеплення μ та його мінливості вздовж траєкторії, а також визначити вплив похибок
- вибору μ на результати експертних розрахунків;
- сформувати розрахункову модель зупинної відстані з розділенням реакційної та гальмової складових і з урахуванням динаміки наростання гальмівної сили (часових затримок у приводі);
- визначити перелік технічних факторів гальмівної системи (стан фрикційних пар, гідроприводу/підсилювача, дисбаланс гальмівних сил, відхилення в роботі датчиків швидкості коліс), які можуть знижувати ефективність гальмування в режимах ABS/ESC, та встановити їхній очікуваний вплив на уповільнення руху;
- запропонувати принципи врахування невизначеностей вихідних даних

(швидкість v_0 , час реакції t_r , μ , ухил, стан шин) у вигляді інтервальної або ймовірнісної оцінки результатів (наприклад, через Монте-Карло);

- сформулювати логіку експертного висновку щодо причинно-наслідкового зв'язку: від встановлення факту гальмування (навіть без «юз») до оцінки того, чи була технічна можливість уникнення зіткнення за конкретних умов.

2. Огляд сучасних наукових та й практичних методів

Нижче наведено огляд методів, що застосовують для кількісної оцінки ефективності гальмування в умовах роботи ABS/ESC та/або за відсутності суцільних слідів «юзу». Для кожного методу коротко зазначено, що саме він розраховує, з якою метою, і які має сильні та слабкі сторони.

2.1. Аналітична модель зупиночної відстані (кінематичний підхід)

Метод задає «першу наближену» оцінку того, скільки метрів потрібно транспортному засобу для повної зупинки за заданих швидкості, часу реакції водія та середнього уповільнення автомобіля. У практиці експертизи цей підхід використовують як базовий розрахунок, який легко перевіряється та дозволяє швидко оцінити чутливість результату до ключових параметрів.

Базова оцінка в автотехнічній експертизі – подання зупинної відстані як суми реакційної та гальмової складових [2]. Розрахунок здійснюють за формулою:

$$s_{\Sigma} = s_r + s_b = v_0 t_r + \frac{v_0^2}{2a_{\text{еф}}}, \quad (1)$$

де v_0 – початкова швидкість;

t_r – сумарний час реакції та затримок

$a_{\text{еф}}$ – середнє ефективне уповільнення.

У першому наближенні $a_{\text{еф}} \approx \mu g$, де μ – коефіцієнт зчеплення.

Фізичний зміст формули 1 вказує що зменшення μ призводить до нелінійного зростання s_b , що критично для реконструкції ДТП. Модель відповідає на запитання «якою могла бути зупинна відстань» за заданих v_0 , t_r , μ .

Сильні сторони методу є прозорість, відтворюваність, мінімум вхідних даних.

Слабкі сторони цього методу – залежність від коректності значення коефіцієнту μ та ігнорування деталізації режимів ABS/ESC.

Як показано на рисунку 1, гальмовий шлях різко зростає при зниженні μ .

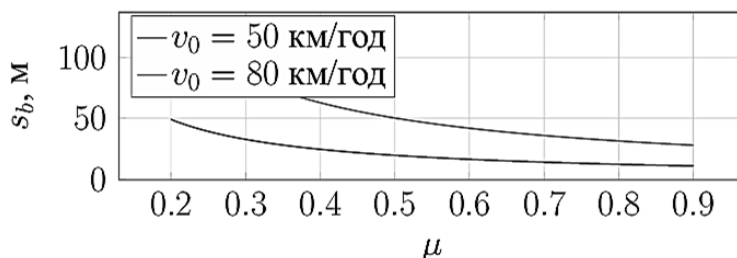


Рис. 1. Залежність гальмового шляху автомобіля S_b від μ для двох швидкостей

Наведені криві рис. 1 показують, що при фіксованій швидкості гальмовий

шлях S_b визначається переважно величиною μ (стан/тип покриття та шин). Для експертної практики це означає: помилка у виборі μ (наприклад, «сухо» замість «волога плівка/забруднення») призводить до суттєвого зміщення розрахованої зупинної відстані, особливо на більших швидкостях.

2.2. Оцінювання коефіцієнта зчеплення за динамічними даними (спостерігачі/ідентифікація)

Сучасні підходи оцінюють μ на основі моделі руху та вимірних сигналів (прискорення, швидкості коліс), використовуючи спостерігачі/ідентифікацію [10]. Базові співвідношення описують рівняння (2) та (3):

$$mv \approx -F_x; a_x = v' \approx -\mu g \quad (2)$$

де m – маса транспортного засобу, кг;

v – поздовжня швидкість, м/с;

v' – похідна швидкості за часом (поздовжнє прискорення), м/с²;

F_x – сумарна поздовжня сила взаємодії «шина–дорога», Н;

a_x – поздовжнє прискорення (уповільнення при гальмуванні), м/с²;

μ – коефіцієнт зчеплення ;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Для режимів ABS важливою змінною є ковзання колеса:

$$\lambda = \frac{v - \omega R}{\max(v, \varepsilon)}, \quad (3)$$

де λ – відносне ковзання колеса (безрозмірне);

ω – кутова швидкість колеса, рад/с;

R – ефективний радіус кочення колеса, м;

ε – мале додатне число для уникнення ділення на нуль при $v \rightarrow 0$.

Мета методу зменшити суб'єктивність вибору μ шляхом оцінювання отриманих інструментальних даних(CAN/EDR/телематика).

Його **сильні боки** це об'єктивізація параметра μ ; можливість врахування змінних умов.

Слабкі сторони методу – потреба в цифрових даних і коректній математичній моделі, та чутливість до шумів.

Наведений метод має такий алгоритм впровадження:

1. Збір даних: беруть часові ряди $a_x(t)$ (поздовжнє прискорення), швидкість $v(t)$ або її оцінку, швидкості коліс $\omega_i(t)$ (CAN/EDR), інколи – кут повороту керма/поздовжній ухил.

2. Попередня обробка: виконують синхронізацію каналів, фільтрацію шумів (щоб не «роздувати» похідні та спостерігач), перевірку на провали/викиди.

3. Оцінка ковзання: за (3) отримують $\lambda(t)$ (або $\lambda_i(t)$ по колесах). У режимі ABS $\lambda(t)$ не є сталим: система навмисно «підпускає» тиск, щоб утримувати ковзання в області ефективного тертя.

4. Ідентифікація/спостерігач: за моделлю поздовжньої динаміки (2) та вимірними сигналами підбирають таке $\hat{\mu}(t)$, щоб змодельована сила або уповільнення узгоджувалися зі результатами спостереженнями (наприклад, через фільтр Калмана, рекурсивну оцінку параметрів або інший спостерігач).

5. Використання в експертизі: $\hat{\mu}(t)$ дозволяє: (а) підкріпити вибір μ чисельно; (б) врахувати «плямистість» покриття (розмітка/волога/лід); (в) обґрунтовано сформувані μ_{ef} або інтервал $[\mu_{\text{min}} \cdot \mu_{\text{max}}]$ для подальших розрахунків s_z .

Приклад результату оцінювання $\hat{\mu}(t)$ наведено на рис. 2.

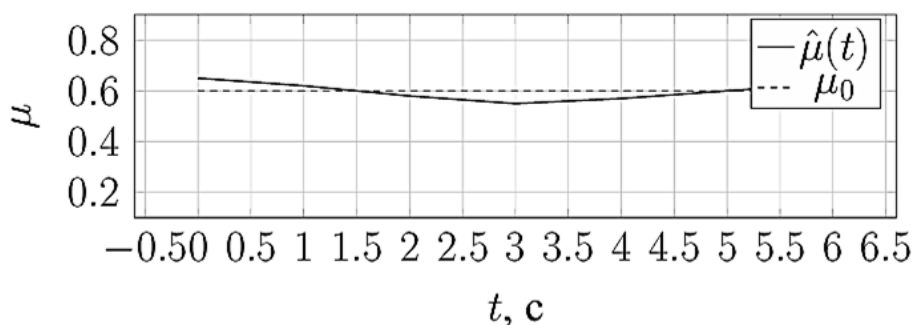


Рис. 2. Приклад часової мінливості оціненого $\hat{\mu}(t)$ порівняно з прийнятим сталим μ_0 . Фізичний зміст: зчеплення може змінюватися вздовж траєкторії гальмування

На рис. 2 пунктир μ_0 відповідає припущенню про сталий коефіцієнт зчеплення, тоді як $\hat{\mu}(t)$ показує зміну оцінки в часі. Фізичний зміст полягає в тому, що контакт «шина–дорога» є нестационарним: навіть на одній ділянці можуть чергуватися мікрозони з різним зчепленням (волога плівка, розмітка, колія). Для експерта це означає потребу розглядати μ як змінний/інтервальний параметр і не ототожнювати відсутність «юз» з відсутністю гальмування.

2.3. Відновлення інтенсивності гальмування/гальмового моменту за параметром $a_x(t)$

Коли прямі вимірювання тиску у контурі відсутні, інтенсивність гальмування можна оцінювати за поздовжнім прискоренням [9]. Для цього використовують наступне співвідношення :

$$F_x \approx m|ax|; M_b \approx F_x R_{\text{екв}} \eta - 1 \quad (4)$$

де F_x – сумарна поздовжня сила, Н;

m – маса транспортного засобу, кг;

$|ax|$ – модуль поздовжнього уповільнення, м/с²;

M_b – еквівалентний гальмовий момент на колесі (або приведений до колеса), Н·м;

$R_{\text{екв}}$ – еквівалентний радіус колеса, м;

η – узагальнений коефіцієнт/ККД передавання (безрозмірний).

Метод є актуальним в разі коли метою дослідження є кількісне підтвердження параметра «гальмував/не гальмував», та необхідність оцінки середнього уповільнення за наявності часових рядів $a_x(t)$

Сильні сторони методу: працює з мінімальним цифровим набором (прискорення).

Слабкі сторони методу: чутливість до ухилу/опорів руху та якості вимірювань.

Особливості застосування методу полягають у наступному:

- параметр що вимірюється: $a_x(t)$ – параметр який характеризує, «як швидко падає швидкість» у часі. Якщо водій натиснув гальма, то після короткої затримки (наростання тиску/включення ABS) модуль $|a_x(t)|$ суттєво зростає.

- параметри які необхідно відновити: через параметр $F_x \approx m|ax|$ отримують оцінку сумарної поздовжньої сили, а далі (за

геометрією/приводом) – еквівалентний гальмовий момент M_b . Це дає кількісну основу для твердження, що гальмування було інтенсивним/слабким.

- параметри які необхідно врахувати задля уникнення розрахункових помилок: у реальних даних a_x містить внесок ухилу дороги та опорів руху. Тому за можливості коригують $a_x(t)$ на наявність ухилу дороги (або вводять поправку), а також беруть інтервал аналізу, де автомобіль рухається прямолінійно та без істотних маневрів.

Практичне застосування даного методу у практичній експертизі дозволяє вирішувати наступні задачі:

- відокремити фазу реакції/затримок від власне гальмування;
- оцінити досяжне середнє уповільнення a_{ef} та порівняти його з очікуваним рівнем μg ;
- перевірити узгодженість показань (“ABS спрацювала”) з реальною динамікою $a_x(t)$.

Типову динаміку змін параметра $|a_x(t)|$ у випадку екстреного гальмування показано на рисунку 3.

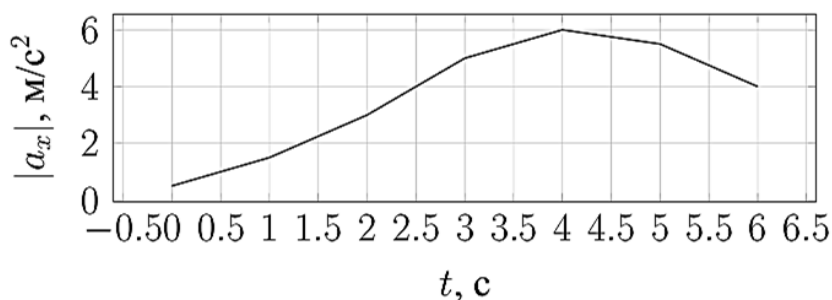


Рис. 3. Приклад наростання $|a_x(t)|$ при екстреному гальмуванні.
Фізичний зміст: крива відображає динаміку наростання гальмівної сили та регулювання ABS/ESC

На рисунку 3 наведено, що ділянка з малими значеннями $|a_x|$ на початку відповідає затримкам (реакція/наростання тиску), після чого уповільнення зростає до рівня, обмеженого зчепленням та алгоритмами ABS. Коливання кривої є типовими для регулювання: система циклічно зменшує/збільшує тиск, щоб уникнути блокування коліс і зберегти керуваність.

2.4. Урахування невизначеностей (Монте-Карло/інтервальні оцінки)

Для v_0 , t_r та μ доцільно використовувати імовірнісне (або інтервальне) подання [24, 25]. Формально це задають як випадкові величини за рівнянням (5):

$$v_0 \sim \mathcal{N}(\bar{v}_0, \sigma_v^2), \quad t_r \sim \mathcal{U}(t_{min}, t_{max}), \quad \mu \sim \mathcal{U}\mu_{min}, \quad (5)$$

де v_0 – початкова швидкість, м/с;

$\mathcal{N}(\bar{v}_0, \sigma_v^2)$ – нормальний розподіл зі середнім \bar{v}_0 та дисперсією – σ_v^2

t_r – час реакції/затримок, с;

$\mathcal{U}(t_{min}, t_{max})$ – рівномірний розподіл на відрізку (t_{min}, t_{max}) ;

μ – коефіцієнт зчеплення;

$\mathcal{U}(\mu_{min}, \mu_{max})$ – рівномірний розподіл μ у межах (μ_{min}, μ_{max}) .

Далі для кожної реалізації обчислюють S_z і отримують розподіл, з якого

формують інтервали (квантілі).

Метод використовується за таким алгоритмом (алгоритм Монте-Карло) розкриваючи такі питання:

- метод задає невизначені параметри: замість одного v_0 , t_r , μ задаються їхні розподіли/інтервали (формула (5));
- метод генерує багато «можливих реальностей»: випадково вибирає $v_0^{(j)}$, $t_r^{(j)}$, $\mu^{(j)}$ для $j = 1, \dots, N$;
- рахує результат для кожної реалізації: підставляє вибрані значення у модель (наприклад, S_Σ) та отримує набір $\{S_\Sigma^{(j)}\}$;
- повертає інтервал замість числа: з набору результатів будують гістограму/квантілі, наприклад $[q_{0,05}, q_{0,95}]$, що є коректним форматом для експертного висновку за неповних вихідних даних;
- дає змогу порівнювати сценарії: аналогічно рахують сценарій А/В та розподіл ΔS_Σ (наскільки технічний стан «штрафує» зупинку).

Сильні сторони запропонованого методу: відповідає експертній природі невизначених даних, та дає інтервали можливих значень..

Слабкі сторони запропонованого методу: залежність від припущень щодо розподілів значень..

Приклад частотного подання результатів S_Σ наведено на рис. 4.

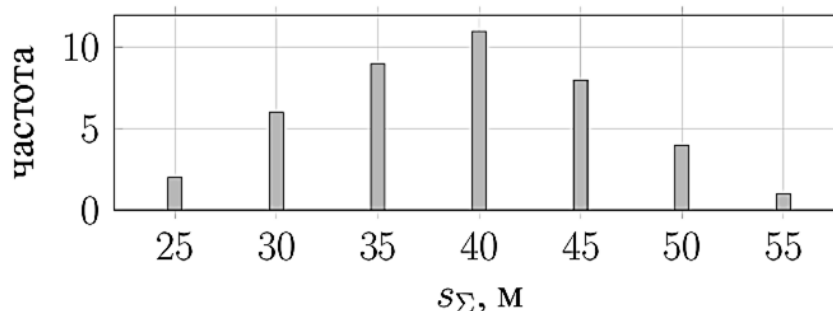


Рис. 4. Схематичний розподіл S_Σ при моделюванні методом Монте-Карло. Фізичний зміст: результат подається діапазоном, а не одним числом

На рисунку 4 кожний стовпчик відповідає кількості реалізацій, для яких розрахована зупинна відстань потрапила в певний інтервал. Практичний сенс отриманих даних для експертизи: висновок формують не як « $S_\Sigma = \dots$ м», а як інтервал (наприклад, 5–95% квантілі), що прямо відображає невизначеність вихідних даних.

2.5. Модельно-орієнтована діагностика (FDD) гальмівної системи

Метод модельно-орієнтованої діагностики (FDD) гальмівної системи порівнює параметри «як повинна поводитися система» за моделлю та параметрами «як вона поводитьися насправді» за вимірюваннями. Якщо розбіжність (залишок) систематично виходить за допустимі межі, це інтерпретують як технічну аномалію, що може впливати на ефективність гальмування.

У роботах з діагностики brake-by-wire застосовують залишкові критерії [12]. Основне правило виявлення подають рівнянням (6):

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t), \quad |r(t)| > \gamma \Rightarrow \text{аномалія/несправність} \quad (6)$$

де $r(t)$ – залишок (residual), який характеризує невідповідність моделі та вимірювань; $y(t)$ – вимірюваний сигнал (наприклад, $a_x(t)$, $\omega(t)$, тиск/команда), у відповідних одиницях; $\hat{y}(t)$ – значення, розраховане/прогнозоване моделлю; γ – поріг виявлення (може залежати від режиму руху).

Мета методу: формалізовано підтвердити технічні відхилення (відмова датчика, дисбаланс, збій регулятора).

Сильні сторони запропонованому методу дослідження: методичність, відокремлення значень «норма/аномалія».

Слабкі сторони запропонованому методу дослідження: потреба в моделі та даних, складність пороговання.

Приклад порогової інтерпретації залишку наведено на рисунку 5.

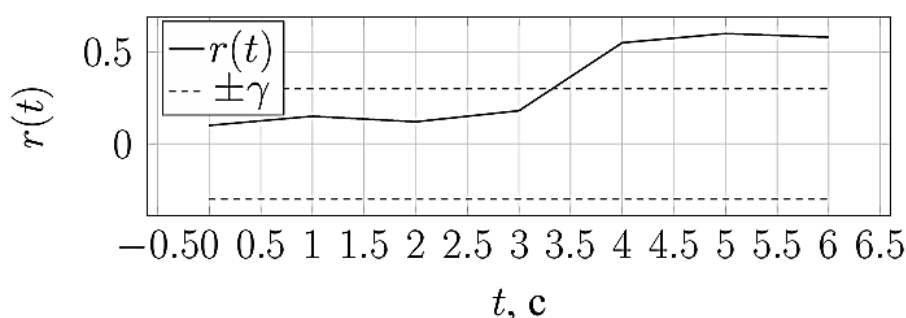


Рис. 5. Приклад залишку $r(t)$ та порогів $\pm\gamma$. Фізичний зміст: перевищення порога є індикатором відхилення, яке може мати причинний зв'язок зі зниженням ефективності гальмування

З рисунку 5 витікає, що коли параметр $r(t)$ знаходиться всередині інтервалу $\pm\gamma$, поведінка узгоджується з моделлю та вважається нормальною. Стійкий вихід за поріг означає, що вимірювання або фізичний стан системи змінилися так, що модель більше не описує процес, це інтерпретують як ознаку несправності/аномалію, яка може впливати на ефективність гальмування.

2.6. Data-driven (ML) оцінка стану фрикційних пар

ML-метод вчиться знаходити зв'язок між наборами ознак (вібрації/температура/режими гальмування) та станом гальмівних компонентів, в чому і є його смисл на відміну від модельно-орієнтованих підходів. У перспективі він може допомагати виявляти приховану деградацію, але в експертизі потребує прозорої валідації та доступу до даних.

Для моніторингу зносу/дефектів застосовують моделі $\hat{z} = f(x; \theta)$ [14, 13]:

$$\hat{z} = f(x; \theta), \quad x = [x_1, \dots, x_p]^T. \quad (7)$$

де \hat{z} – оцінений показник стану/зносу (безрозмірний або у вибраних одиницях);

$f(\cdot)$ – модель (наприклад нейромережа), що відображає ознаки у прогнозі;

x – вектор ознак (вібрації, температура, режими гальмування тощо);

x_1 – окрема ознака;

p – кількість ознак;

θ – параметри моделі, які визначаються навчанням.

Сильні сторони даного методу: висока чутливість до складних патернів.

Слабкі сторони: вимоги до дата сетів, валідації й ступені пояснюваності; у експертизі часто бракує вхідних даних.

Вибір методу для вирішення поставлених задач. Для вирішення всіх 6 задач у типовому експертному випадку (де цифрові дані можуть бути відсутні або неповні) обрано **комбінований підхід:**

- аналітична модель використання якої розглядає параметр S_{Σ} як базову розрахункову основу;
- оцінювання μ зі спостерегачів/ідентифікації за наявності інструментальних даних (як підсилення доказовості);
- методи Монте-Карло/інтервальні оцінки як обов'язковий елемент відображення невизначеностей;
- методи FDD та ML розглядаються як допоміжні інструменти для підтвердження технічного стану (коли доступні сигнали та протоколи).

3.Планування й проведення експерименту

Метою розрахункового експерименту є перевірка запропонованої комбінованої методики (аналітична оцінка зупинної відстані s_{Σ} з імовірнісним урахуванням невизначеностей) та демонстрація того, як за відсутності суцільних «юзових» слідів можна отримати відтворювану кількісну оцінку ефективності гальмування.

Експеримент сплановано так, щоб вирішити всі 6 задач які сформульовані у розділі «Мета та задачі дослідження», шляхом послідовних етапів:

1. Опис спостережуваних ознак гальмування в режимі ABS/ESC;
2. Завдання/оцінювання коефіцієнту μ ;
3. Розрахунок параметру s_{Σ} ;
4. Моделювання впливу технічних факторів;
5. Оцінка за допомогою метода Монте-Карло ;
6. Формування логіки експертного висновку.

Вхідні дані, припущення та сценарії. Розглянуто типовий сценарій екстреного гальмування легкового автомобіля на прямолінійній ділянці.

Вхідні параметри (задані як «умовно виміряні / встановлені»)

- початкова швидкість v_0 (м/с);
- сумарний час реакції та затримок t_r (с);
- коефіцієнт зчеплення μ ;
- прискорення вільного падіння $g = 9.81$ м/с².

Визначено два порівнювані стани:

- Сценарій А (номінальний): справна гальмівна система, системі ABS/ESC працездатні, ефективне уповільнення $a_{\text{еф}} = \mu g$

- Сценарій В (деградований): наявна технічна причина зниження ефективності (наприклад, повітря в гідроприводі, знос фрикційних пар, недостатні зусилля у приводі тощо), що моделюється коефіцієнтом деградації $k_a \in (0,1)$.

Ефективне уповільнення задають за формулою :

$$a_{\text{еф}}^{(B)} = k_a \mu g \quad (8)$$

де $a_{\text{еф}}^{(B)}$ – ефективне середнє уповільнення у деградованому сценарії, м/с²;

k_a – коефіцієнт деградації (безрозмірний); μ – коефіцієнт зчеплення;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

Фізичний зміст коефіцієнту k_a полягає у тому, що він узагальнено відображає «втрату» досяжного уповільнення через технічний стан, навіть якщо ABS не допускає блокування.

Етап1 (задача1): інформативні ознаки гальмування без суцільних слідів «юзу». У межах експерименту припускається, що суцільні сліди блокування відсутні (характерно для ABS), однак доступні непрямі дані: встановлена швидкість v_0 (за відео/EDR/кінематикою), орієнтовний діапазон t_r (за типовими значеннями), діапазон μ (за станом покриття), а також факт спрацювання ABS (за показаннями/індикацією або характером переривчастих слідів). Це забезпечує «вхід» для подальших розрахунків навіть за слабкої слідової картини.

Етап 2 (задача 2): параметризація коефіцієнта μ та його мінливості. Для демонстрації ступеню впливу стану покриття прийнято інтервал $\mu \in [0.45;0.75]$ (умовно: вологий–сухий асфальт).

Мінливість μ враховується двома способами:

- як сталий параметр у межах одного прогону Монте-Карло;
- як «ефективний» $\mu_{\text{еф}}$ (усереднення по ділянці), якщо реальні дані свідчать про зміну умов уздовж траєкторії.

Етап 3 (задача 3): розрахункова модель S_Σ Використано аналітичну модель зупинки.

Розрахунок виконують за наступною формулою :

$$s_\Sigma(v_0, t_r, \mu, k_a) = v_0 t_r + \frac{v_0^2}{2k_a \mu g} \quad (9)$$

де s_Σ – повна зупинна відстань (м);

v_0 – початкова швидкість на момент виникнення небезпеки (м/с);

t_r – сумарний час реакції затримок(с), що включає: сприйняття небезпеки, прийняття рішення, перенесення ноги, наростання зусилля на педалі гальма;

μ – коефіцієнт зчеплення «шина–дорога»(безрозмірний), який визначає максимально досягну поздовжню силу без втрати зчеплення;

k_a – коефіцієнт деградації ефективного уповільнення (безрозмірний), який узагальнює технічні фактори (знос, повітря в приводі, витоки, дисбаланс тощо) у вигляді зменшення досяжного $a_{\text{еф}}$;

g – прискорення вільного падіння (м/с²).

Залежність реакційної складової від часу реакції наведено на рисунку 6.

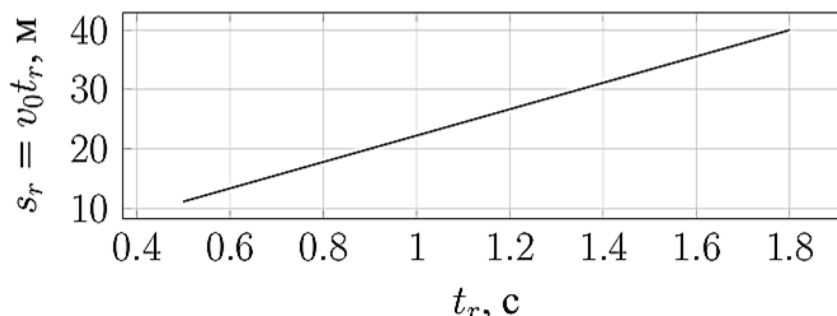


Рис. 6. Реакційна складова s_r як лінійна функція часу реакції t_r (приклад для $v_0 = 80$ км/год)

У цій моделі перший доданок $v_0, t_r \in$ **реакційною** складовою (відстань до

початку створення істотного гальмового моменту), а другий доданок μ, k_a – **гальмова** складова, яка відповідає процесу інтенсивного уповільнення.

Рисунок 6 розкриває що навіть за ідеальних гальм збільшення t_r прямо збільшує зупинну відстань, тому t_r є одним із найбільш критичних параметрів у висновках експерта. Лінійна залежність $s_r = v_0 t_r$ показує, що «людський фактор» (час реакції та затримок) додає до зупинної відстані строго пропорційний внесок, незалежно від стану гальм. Фізично це шлях, який автомобіль проходить без істотного уповільнення, тому в експертному аналізі доцільно розглядати t_r як окремий параметр невизначеності та виконувати сценарні/ймовірнісні оцінки.

Етап4 (задача4): моделювання впливу технічних факторів. Вплив технічних факторів у експерименті відображено через k_a .

Складові «узагальненої деградації» k_a : у реальній експертизі k_a не є безпосередньо вимірюваною величиною, а вводиться як параметр, що акумулює вплив комплексу факторів, наприклад:

- стан фрикційних пар (знос/скління/забруднення колодок і дисків), що зменшує реалізований гальмівний момент;
- наявність повітря в гідроприводі або негерметичність – збільшення ходу педалі та зниження/затримка наростання тиску;
- несправність вакуумного підсилювача – зменшення доступного зусилля на головному циліндрі;
- нерівномірність роботи супортів/циліндрів(лівий – правий дисбаланс) – зниження середньої ефективності та погіршення стійкості;
- деградація шин (вік, знос протектора, тиск) – фактичне зниження «реалізованого» зчеплення і, як наслідок, уповільнення.

Для ілюстрації прийнято $k_a \in \{1.00, 0.85, 0.70\}$, що відповідає відсутності деградації, помірній та суттєвій деградації ефективності. Результат впливу технічної деградації (через k_a) на зупинну відстань ілюстровано на рис. 7.

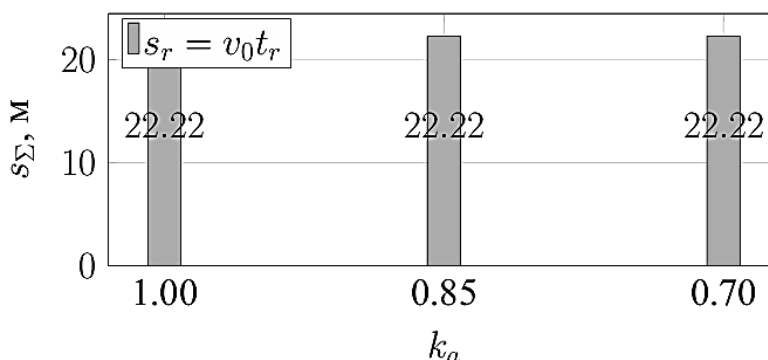


Рис. 7. Вплив коефіцієнта деградації k_a на зупиночну відстань $s_{\Sigma} = s_r + s_b$
(приклад: $v_0 = 80$ км/год, $t_r = 1.0$ с, $\mu = 0.60$)

На рисунку 7 наведено що реакційна складова s_r не залежить від технічного стану гальм, тоді як гальмова складова s_b зростає при зменшенні k_a , тобто саме технічна деградація «додає» метри зупинки. Стовпчики відображають, що навіть помірна деградація ($k_a = 0.85$) дає помітний приріст s_{Σ} через збільшення гальмової складової (другий доданок у формулі s_{Σ}).

Фізичний сенс: при зменшенні $a_{e\phi}$ зупинка відбувається довше, а енергія

руху «перетворюється» у більшу дистанцію гальмування.

Етап 5 (задача 5): імовірнісна оцінка (Монте-Карло) та результат експерименту. Параметри невизначеностей задано як (вхідні розподіли для Монте-Карло) за рівнянням:

$$v_o \approx N(22,22; 0,8^2), t_r \approx (0,8 - 1,4), \mu \approx (0,45 - 0,75) \quad (10)$$

де v_o – початкова швидкість (середнє 22.22 м/с відповідає 80 км/год),

0.8 м/с – СКВ оцінки швидкості;

t_r – час реакції/затримок (рівномірно в межах 0.8–1.4 с);

μ – коефіцієнт зчеплення (рівномірно в межах 0.45–0.75),

$k_a = 1.0$ для сценарію А та $k_a = 0.85$ для сценарію В.

Виконано серію з $N = 5000$ реалізацій (умовне моделювання), за кожною обчислено S_Σ . Для порівняння сценаріїв оцінено приріст за формулою:

$$\Delta S_\Sigma = s_\Sigma^{(B)} - s_\Sigma^{(A)} \quad (11)$$

де ΔS_Σ – приріст зупинної відстані внаслідок деградації; $s_\Sigma^{(A)}$ – зупиночна відстань у номінальному сценарії; $s_\Sigma^{(B)}$ – зупиночна відстань у деградованому сценарії.

Оцінений розподіл ΔS_Σ наведено на рис. 8. Наведений рисунок демонструє наявність замість одного «точкового» приросту отримується діапазон, що прямо відображає невизначеність у v_o , t_r та μ . Розподіл ΔS_Σ показує, що ефект технічної деградації не є сталим числом: він залежить від конкретних реалізацій v_o , t_r та μ . Фізично це означає, що за гіршого зчеплення або більшої швидкості один і той самий дефект (однаковий k_a) призводить до більшого «штрафу» по відстані, тому інтервальне подання ΔS_Σ є коректнішим для експертних висновків.

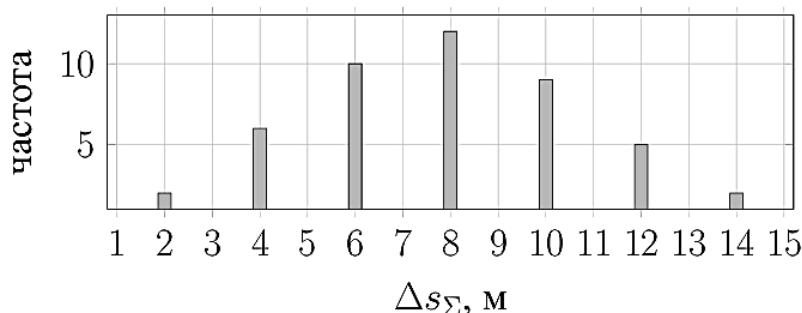


Рис. 8. Схематичний розподіл приросту ΔS_Σ між сценаріями В та А при моделюванні методом Монте-Карло

Наукова новизна та перспективи подальших досліджень. У межах роботи отримано такі елементи наукової новизни:

- запропоновано формалізовану комбіновану схему для експертної оцінки ефективності гальмування в умовах ABS/ESC без суцільних «юзових» слідів, яка поєднує аналітичну модель зупинки, параметризацію дорожніх умов через μ та технічного стану через k_a ;

- обґрунтовано подання результату як інтервальної/ймовірнісної оцінки s_Σ та Δs_Σ , що методично узгоджується з природою невизначених вихідних даних у ДТП (швидкість, реакція, зчеплення);

- показано розділення внесків реакційної та гальмової складових у загальну зупинну відстань, що дає можливість чіткіше відокремлювати поведінкові та технічні чинники у причинно-наслідковому аналізі.

Перспективними напрямками розвитку підходу є:

- уточнення моделі зчеплення для неоднорідного покриття: побудова $\mu(x)$ або дискретної моделі ділянками з переходами та оцінюванням $\mu_{\text{еф}}$;
- розширення факторів технічного стану: перехід від одного параметра k_a до структури параметрів (динаміка наростання тиску, асиметрія по осях/сторонах, тощо) з прив'язкою до огляду/випробувань;
- валідація на натурних/стендових даних: порівняння інтервальних прогнозів s_{Σ} з контрольними гальмуваннями для різних шин, температур, навантажень та режимів ABS;
- інтеграція цифрових джерел (EDR/CAN/телематика/ узгоджена процедура синхронізації та оцінювання $\mu^{\wedge}(t)$ і $a_{\text{еф}}(t)$);
- методичні рекомендації для експерта: стандартизовані інтервали невизначеностей, шаблони представлення результатів (квантілі, довірчі інтервали), критерії чутливості висновку.

Висновки

У роботі розглянуто експертну оцінку ефективності гальмування в умовах функціонування ABS/ESC та відсутності суцільних «юзових» слідів, що є типовою ситуацією для сучасного автопарку. Показано, що відсутність слідів блокування не є ознакою «відсутності гальмування», а є наслідком фізики процесу керованого ковзання та циклічного регулювання тиску в гальмівних механізмах.

Сформовано та обґрунтовано комбінований підхід до реконструкції, який поєднує аналітичну модель зупинної відстані, оцінювання (або інтервальне завдання) коефіцієнта зчеплення μ , параметризацію впливу технічного стану гальм через коефіцієнт деградації k_a та імовірнісне подання результатів методом Монте-Карло. Такий підхід дозволяє перейти від якісного рівня («гальмував/не гальмував») до кількісної оцінки досяжного уповільнення та зупинної відстані з явним відображенням невизначеностей вихідних даних.

На розрахункових прикладах продемонстровано, що реакційна складова $s_r = v_0 t_r$ є незалежною від технічного стану гальм, тоді як гальмова складова s_b істотно зростає при зменшенні k_a та/або зниженні μ . Отримано, що навіть помірна деградація ефективності (наприклад, $k_a \approx 0.85$) може створювати помітний приріст зупинної відстані, а інтервальне подання результату є методично коректнішим за «точкові» оцінки, оскільки відображає мінливість дорожніх умов, часу реакції та похибки встановлення швидкості.

Запропонований формат висновків орієнтований на підвищення доказовості: результат подається у вигляді інтервалів/квантилів для s_{Σ} та Δs_{Σ} з поясненням внесків ключових параметрів (μ , t_r , k_a). Це дозволяє експерту чіткіше формувати причинно-наслідкові твердження щодо впливу технічного стану гальмівної системи на можливість уникнення ДТП, навіть за відсутності класичних слідових ознак.

References

1. Metz, L. D., Ruhl, R. A. Using Anti-lock Brake System (ABS) to Determine the Cause of Accidents // SAE Technical Paper. 1990. No. 900106. doi: <https://doi.org/10.4271/900106>.
2. Wang, J.-S., Senouci, A. B., Rulin, S. Calculation of Stopping Distance for Accident Reconstruction Using GPS Technology // Journal of the Eastern Asia Society

for Transportation Studies. 2005. Vol. 6. P. 3401–3414. doi: <https://doi.org/10.11175/easts.6.3401>.

3. Miller, J., Shaffer, A., Hoxie, D. Using Articulated Vehicle Data to Estimate Braking Distance // SAE Technical Paper. 2025. No. 2025-01-8703. doi: <https://doi.org/10.4271/2025-01-8703>.

4. Sustainability. (2023). Study on the Impact of Tire Age on Stopping Performance with ABS Systems. Sustainability. 2023. Vol. 15(8). Art. 6945. doi: <https://doi.org/10.3390/su15086945>.

5. Ramadan, E., Abdelkhalek, S., Azab, A. Antilock braking system (ABS): A review and performance assessment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1172(1). Art. 012004. doi: <https://doi.org/10.1088/1757899X/1172/1/012004>.

6. Haus, S., Weber, K., Zlocki, A. Effectiveness of automatic emergency braking systems in reducing injuries and fatalities // Traffic Injury Prevention. 2019. Vol. 20(7). P. 692–697. doi: <https://doi.org/10.1080/15389588.2019.1639337>.

7. Lie, A., Tingvall, C., Krafft, M., Kullgren, A. The effectiveness of electronic stability control (ESC) in reducing real life crashes and injuries // Accident Analysis & Prevention. 2006. Vol. 38(2). P. 375–385. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.03.009>.

8. Christensen, H., Elvik, R., Amundsen, A. H. The contribution of electronic stability control (ESC) and alcohol interlocks to accident reduction in Denmark // Accident Analysis & Prevention. 2006. Vol. 38(4). P. 788–794. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.08.007>.

9. Arkadiy, A., Jia, L., Flores, A. Brake torque estimation based on acceleration measurements // Results in Engineering. 2024. Vol. 21. Art. 101686. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101686>.

10. Wu, C., Hu, X., Wang, Y. Road friction coefficient estimation for braking control using vehicle dynamics and observers // Sensors. 2019. Vol. 19(9). Art. 2028. doi: <https://doi.org/10.3390/s19092028>.

11. Zhang, J., Zhang, Q., Zhang, H., Liu, T., Wang, L. Pressure pulse analysis in a hydraulic brake system // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2021. Vol. 235(7). P. 1988–2001. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407020983580>.

12. Park, H., Kim, S., Lee, J. A study on brake-bywire fault diagnosis using model-based methods // Applied Sciences. 2022. Vol. 12(3). Art. 1171. doi: <https://doi.org/10.3390/app12031171>.

13. Park, H., Kim, S., Lee, J. Brake fault diagnosis using deep learning and vibration signals // Applied Sciences. 2022. Vol. 12(21). Art. 10739. doi: <https://doi.org/10.3390/app122110739>.

14. Wang, X., Li, Y., Zhang, Z. Brake pad wear monitoring using CNN–LSTM with multiobjective optimization // Actuators. 2023. Vol. 12(7). Art. 301. doi: <https://doi.org/10.3390/act12070301>.

15. Wu, S., Zuo, S., Zhang, Y. Temperature influence on disc brake pad friction coefficient: experimental modeling // Lubricants. 2024. Vol. 12(10). Art. 335. doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants12100335>.

16. Belhocine, A., Bouchetara, M. Thermomechanical modelling of ventilated disc brake for automotive applications // Ain Shams Engineering Journal. 2013. Vol. 4(3). P. 475–483. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2012.08.005>.

17. Zhi, S., Xiong, J. Thermal analysis of brake discs under frictional heating for

downhill braking // Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 130. Art. 105794. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105794>.

18. Xu, Y., Zhang, H., Wang, J. Effects of braking temperature on the microstructure and wear of brake discs // Metals. 2024. Vol. 14(3). Art. 332. doi: <https://doi.org/10.3390/met14030332>.

19. Rajaei, H., Alvandi-Tabrizi, Y., Sadeghi, F. Tribological behavior of brake pad materials under different loads and temperatures // Metals. 2022. Vol. 12(3). Art. 465. doi: <https://doi.org/10.3390/met12030465>.

20. Meng, Q., Liu, X., Chen, Z. A numerical investigation on thermal and structural performance of disc brakes under emergency braking // Applied Sciences. 2025. Vol. 15(6). Art. 3023. doi: <https://doi.org/10.3390/app15063023>.

21. Kukulski, J., Koralewski, R., Stoklosa, J. Regenerative braking energy recovery in electric vehicles: analysis and optimization // Energies. 2023. Vol. 16(11). Art. 4514. doi: <https://doi.org/10.3390/en16114514>.

22. Vdovin, A., Le Gigan, G. Regenerative braking control for electric vehicles: A review // Energies. 2020. Vol. 13(1). Art. 203. doi: <https://doi.org/10.3390/en13010203>.

23. Steinmetz, T., Schmid, J., Weber, S. Nonexhaust traffic emissions: brake wear particles and their atmospheric relevance // Atmosphere. 2025. Vol. 16(5). Art. 561. doi: <https://doi.org/10.3390/atmos16050561>.

24. Gao, Y., Davis, G. A. Considering driver behavior in crash prediction: a study of brake reaction time in naturalistic driving // Journal of Safety Research. 2017. Vol. 63. P. 195–204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2017.10.012>.

25. McCarthy, L. M., Flintsch, G. W., de Leon Izeppi, E. Evaluation of pavement friction measurements for wet-weather safety applications // Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. 2021. Vol. 147(3). Art. 04021029. doi: <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000286>.

Надійшла в редакцію 27.02.2026, розглянута на редколегії 6.04.2026

Expert assessment of braking efficiency, taking into account ABS/ESP and the absence of skid marks

This paper addresses the problem of evaluating braking effectiveness in accident reconstruction from modern vehicles equipped with ABS/ESC, where continuous locked-wheel skid marks are frequently absent at the crash scene. The lack of classical “skid” traces complicates conventional reconstruction techniques based on measuring mark length and often leads to disputed claims regarding whether braking occurred and how effective it was. The physical reason for them is singmarksis they clic brake-pressure modulation performed by ABS/ESC, which keeps the wheels mostly rotating and maintains braking near an optimal slip region. Under such conditions, the expert assessment must shift from qualitative statements to a formal quantitative evaluation ground edin vehicle dynamics, tire–road interaction and an explicit treatment of uncertainty.

A combined methodology is proposed, consisting of: (1) an analytic stopping-distance model represented as the sum of reaction and braking components; (2) road-condition parameterization through the tire–road friction coefficient μ , and, when digital records area available (EDR/CAN/telematics), the option to estimate μ from dynamic signals; (3) a generalized representation of technical degradation of the braking system

via a degradation factor $k_a \in (0,1)$ that reduces achievable mean deceleration even when ABS prevents wheel lock; and (4) probabilistic/interval reporting of results using Monte Carlo simulation, which yields distributions and quantile ranges of s_Σ and the increment Δs_Σ between nominal and degraded scenarios in stead of a single "point" value. It is emphasized that, in practice, the dominant sources of uncertainty are the selection/variability of μ (pavement state, tire condition, local patches such as markings or wet film) and the total response/lag time t_r .

A computational experiment illustrate how degradation levels ($k_a = 1.00; 0.85; 0.70$) affect the structure of stopping distance: the reaction component s_r is independent of brake condition, while the braking component s_b increases approximately in versely with k_a . Presenting the out come as quantile intervals is shown to be more appropriate for expert reports under incomplete evidence and to explicitly reflect reconstruction un certainty. The scientific contribution of the work is a formalized integration of an analytic stopping model, a compact parameterization of brake condition influence through k_a , and probabilistic output suitable for ABS/ESC cases with no continuous lockup traces.

Key words: accident reconstruction; ABS; ESC; braking effectiveness; stop ping distance; friction coefficient; reaction time; Monte Carlo simulation; uncertainty; EDR/CAN.

Відомості про авторів:

Доля Костянтин Вікторович – д-р техн. наук., професор, кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут». Ел. пошта: k.v.dolia@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4693-9158>.

Григорович Антон Михайлович – старший викладач, кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Ел. пошта: a.grigorovich@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5388-3159>.

About the Authors:

Konstantin DOLYA – Doctor of Technical Sciences, professor, Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University «Kharkiv aviation institute», e-mail: k.v.dolia@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4693-9158>.

Anton GRIGOROVICH – senior speaker, Department of Automobiles and transport infrastructure, National Aerospace University «Kharkiv aviation institute». E-mail: a.grigorovich@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5388-3159>.