

Оцінювання достовірності вихідних даних для автотехнічної експертизи ДТП

Антон Григорович

Кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна

ORCID: 0000-0001-5388-3159

Костянтин Доля

Кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна

ORCID: 0000-0002-4693-9158

Анотація: у роботі розглянуто проблему достовірності вихідних даних, що застосовуються в автотехнічній експертизі дорожньо-транспортних пригод, та показано, що саме невизначеність параметрів (коефіцієнта зчеплення μ , довжини слідів/гальмівного шляху s , часових інтервалів, якості відеоматеріалів і цифрових записів) часто є головним джерелом нестійкості експертних висновків. Мета дослідження полягає у розробленні практично придатного підходу, який дозволяє формалізувати похибки вхідних даних, кількісно оцінити їх вплив на результати типових розрахунків (швидкість, гальмівний і зупинковий шлях, часові інтервали, технічна можливість уникнення ДТП) та обґрунтовано подавати результат у вигляді інтервалів/розподілів, а не одного "точкового" числа.

Запропоновано методичну схему, в якій детерміністична фізична модель гальмування використовується як базова, а невизначеність входу описується розподілами параметрів з подальшим поширенням похибок методом Монте-Карло. Для визначення пріоритетів уточнення даних застосовано чутливісний аналіз, що дозволяє ранжувати параметри за внеском у невизначеність результату. Окремо розглянуто крос-перевірку цифрових джерел (відео, EDR/ACM) шляхом аналізу нев'язок швидкості $\Delta v(t)$ та виявлення систематичних зсувів (масштаб, FPS, синхронізація часу). Експериментальна частина підтверджує, що домінуючим фактором часто виступає невизначеність μ , тоді як похибка вимірювання s має другорядний внесок, і саме тому підвищення достовірності висновків досягається насамперед уточненням дорожніх умов/зчеплення та якісною фіксацією слідів. Отримані результати можуть бути використані для побудови "паспортів невизначеності", формування чек-листів обов'язкових замірів і підвищення відтворюваності експертних розрахунків.

Ключові слова: автотехнічна експертиза; ДТП; достовірність даних; похибка; коефіцієнт зчеплення; відеоаналіз; EDR/ACM; Монте-Карло; чутливісний аналіз.

1. Вступ

Дорожньо-транспортні пригоди залишаються однією з найпоширеніших подій, що призводять до матеріальних збитків, травмування та загибелі людей. У межах розслідування ДТП автотехнічна експертиза є ключовим інструментом для відтворення механізму події та відповіді на технічні питання: з якою швидкістю рухався транспортний засіб, якою була довжина зупинкового шляху, чи мав водій технічну можливість уникнути зіткнення, де знаходилися учасники в критичні моменти часу, як вплинули дорожні умови та технічний стан ТЗ. При цьому висновок експерта безпосередньо впливає на юридичні рішення, страхові виплати та визначення причинно-наслідкових зв'язків.

Будь-який автотехнічний розрахунок ґрунтується на вихідних даних, отриманих з матеріалів справи та результатів огляду: схема місця пригоди, виміри відстаней, фототаблиці та відео, характеристики дорожнього покриття, ухил і радіуси кривизни, дані про деформації, масу і завантаженість ТЗ, стан шин, параметри гальмівної системи, наявність/робота ABS, погодні умови та освітленість. На практиці ці дані нерідко є неповними, суперечливими або мають значну похибку через обмеження часу на фіксацію, складність умов (темрява, опади, інтенсивний рух), людський фактор та різні методи вимірювання.

Особливу проблему становить те, що частина вихідних параметрів не вимірюється безпосередньо, а приймається за довідковими значеннями або оцінюється опосередковано. Наприклад, коефіцієнт зчеплення μ часто визначають за типом покриття та його станом, хоча фактичні значення можуть істотно відрізнятися залежно від температури, забруднення, зносу поверхні, наявності води/льоду, а також від стану шин. Аналогічно, час реакції водія, затримка спрацювання гальм, характер гальмування (суцільні/переривчасті сліди, робота ABS) та точка початку гальмування можуть бути встановлені лише з певною невизначеністю. Навіть такі, на перший погляд, “прості” величини, як довжина слідів гальмування чи ширина проїзної частини, можуть містити похибки через помилки масштабування на фото, неточність рулетки/далекоміра, неправильний вибір базових точок або зміщення об’єктів до моменту огляду.

У сучасних умовах збільшується роль цифрових джерел інформації: відеореєстратори, міські камери спостереження, телематичні дані, а в окремих випадках — записи подій (EDR) та електронні блоки керування. З одного боку, ці джерела дають нові можливості для уточнення швидкості, траєкторій і часу, однак з іншого — породжують нові типи похибок (частота кадрів і пропуски, компресія, спотворення оптики, невідомий масштаб, синхронізація часу, неповнота/недоступність параметрів, ризики неправильної інтерпретації). Відтак актуальним стає питання стандартизованої перевірки надійності таких даних і їх узгодження з традиційними матеріалами (схемою, слідами, деформаціями).

За відсутності явної процедури оцінювання достовірності вихідних даних експерт може отримати формально точний, але фактично нестійкий результат: незначна зміна одного параметра в межах реалістичної похибки призводить до суттєво іншого висновку щодо швидкості або технічної можливості уникнення ДТП. Це створює ризики помилкових рішень та спорів між сторонами, а також ускладнює перевірку та відтворюваність експертного дослідження.

У зв’язку з цим актуальним є науково обґрунтований підхід, який: формалізує невизначеність ключових вхідних параметрів; оцінює, як похибки поширюються на результати типових автотехнічних розрахунків; дозволяє подавати не лише “одне число”, а інтервал або розподіл можливих значень із зазначенням найвпливовіших факторів; формує практичні рекомендації щодо мінімально необхідного набору замірів та правил контролю якості матеріалів. Саме така постановка проблеми визначає напрям цього дослідження — оцінювання достовірності вихідних даних для автотехнічної експертизи ДТП та підвищення обґрунтованості експертних висновків.

2. Мета та задачі дослідження

Об’єкт дослідження — процес і результати автотехнічної експертизи ДТП, що базуються на розрахунковому відтворенні параметрів руху транспортних засобів (швидкість, уповільнення, зупинковий шлях, часові інтервали) та оцінці технічної можливості уникнення пригоди.

Предмет дослідження — достовірність (якість, повнота, узгодженість) вихідних даних автотехнічної експертизи та вплив їхніх похибок/невизначеностей на результати типових експертних розрахунків і кінцеві висновки.

Мета дослідження — розробити та обґрунтувати підхід до кількісного оцінювання достовірності вихідних даних у справах про ДТП і визначити, як похибки вхідних параметрів поширюються на результати автотехнічних розрахунків; на основі цього сформулювати практичні рекомендації щодо контролю якості матеріалів та мінімально достатнього набору даних.

Задачі дослідження:

1. систематизувати перелік ключових вхідних параметрів для автотехнічних розрахунків (коефіцієнт зчеплення μ , ухил, довжина та характер слідів гальмування, маса/завантаження ТЗ, стан шин, час реакції водія, затримка спрацювання гальм, параметри ABS/ESP тощо);
2. класифікувати типові джерела похибок вихідних даних (вимірювальні, методичні, інтерпретаційні, інформаційні) та визначити способи їх виявлення у матеріалах справи;
3. сформулювати критерії оцінювання якості вихідних даних: повнота, точність, простежуваність, часово-просторова узгодженість між джерелами (схема/фото/відео/EDR), відтворюваність;
4. розробити модель поширення похибок у типових задачах автотехнічної експертизи (оцінка швидкості, гальмівного та зупинкового шляху, часу до зіткнення, технічної можливості уникнення ДТП) з використанням інтервального підходу та/або моделювання Монте-Карло;
5. виконати чутливісний аналіз і ранжувати вхідні параметри за внеском у невизначеність результатів для вибраних сценаріїв ДТП;
6. сформулювати чек-лист контролю достовірності вихідних даних і рекомендації щодо мінімально достатнього набору замірів, фото/відеофіксації та крос-перевірки даних;
апробувати запропонований підхід на 1–3 модельних або реальних (анонімізованих) кейсах ДТП та порівняти результати з традиційними “точковими” розрахунками.

3. Аналіз джерел

Сучасні дослідження в галузі автотехнічної експертизи та реконструкції ДТП дедалі більше фокусуються не лише на побудові розрахункових моделей, а й на оцінюванні якості (достовірності) вихідних даних та невизначеності результатів. Умовно наукові публікації за темою можна згрупувати за чотирма напрямками: відео- та фотограмметричні методи визначення швидкості/траєкторій; оцінювання коефіцієнта зчеплення та його впливу на гальмівні параметри; використання електронних даних (EDR/АСМ, телематика) і правила їх валідації; імовірнісні методи та моделювання для поширення похибок.

Поширення відеореєстраторів і міських систем спостереження зумовило появу значної кількості робіт, де швидкість і траєкторії відновлюються з відеопотоку шляхом побудови масштабу сцени, калібрування камери та трекінгу об'єктів. Показано, що критичними джерелами похибки є: похибка визначення масштабу, перспективні спотворення, rolling shutter, невідома/змінна частота кадрів, компресія та помилки детекції/ідентифікації контрольних точок [1–5]. Окремо підкреслюється практична цінність методів, що дозволяють обґрунтовувати масштаб за геометрією дорожньої інфраструктури (розмітка, ширина смуги, габарити відомих об'єктів), але водночас наголошується на потребі метрологічної оцінки та валідації таких процедур для задач судової експертизи [2,3].

Для прикладних експертних задач важливо, що частина робіт виконує перевірку відтворюваності визначення швидкості з відео та демонструє, що похибка може істотно змінюватися залежно від кута огляду, дальності до об'єкта, якості кадру та наявності опорних розмірів у сцені [2,6,7]. Разом з тим, розвиток комп'ютерного зору (включно з глибокими нейромережами) підвищує автоматизацію трекінгу, але додає нові ризики: нестабільність моделей, залежність від навчальних даних та складність пояснення алгоритмічних помилок у судовому контексті [8–10].

У класичних розрахунках гальмування невизначеність коефіцієнта зчеплення μ часто є домінуючою складовою загальної похибки результатів. Оглядові та прикладні дослідження з “віртуального” та інструментального вимірювання зчеплення показують, що μ є функцією стану покриття (сухе/вологе/забруднене), мікро- та макрошорсткості, температури, типу та стану шин, а також режиму ковзання [17–21]. Дослідники підкреслюють, що використання довідкових діапазонів без прив’язки до конкретних умов ДТП може призводити до систематичних зміщень у визначенні швидкості та зупинкового шляху.

Паралельно розвиваються методи оцінювання μ за даними транспортного засобу (vehicle dynamics), включно з фільтрами стану та комбінуванням сенсорних і модельних підходів. Такі праці демонструють потенціал отримання “онлайн” оцінки зчеплення, але також відзначають чутливість результатів до якості вхідних сигналів, коректності моделі шин та наявності інформативних маневрів (гальмування/розгін/поворот), що не завжди присутні в передаварійній фазі [20–22].

В останні роки суттєво зростає роль даних EDR (Event Data Recorder) або модулів керування подушками безпеки (ACM) у реконструкції ДТП. Низка робіт присвячена точності передаварійних параметрів (швидкість, стан педалей, гальмування, ремені безпеки тощо), питанням повноти набору параметрів та межах інтерпретації залежно від марки/моделі ТЗ [23,24]. Практичні публікації також пропонують схеми комбінування EDR з відео (наприклад, синхронізація часових шкал і взаємна перевірка швидкостей), що потенційно знижує невизначеність, однак вимагає формалізованих правил узгодження та контролю якості вихідних даних [23,25].

Окремий напрям становлять дослідження, які замість “точкового” значення (одна швидкість, один час) пропонують інтервальні/імовірнісні оцінки з урахуванням невизначеності вхідних параметрів.

Показано, що використання методів МонтеКарло, поверхонь відгуку та чутливісного аналізу дозволяє: отримувати діапазони можливих швидкостей/дистанцій; ранжувати параметри за внеском у загальну дисперсію; обґрунтовувати, які саме заміри критично необхідні для зменшення невизначеності [11,12]. Байєсівські підходи додатково дозволяють формально враховувати різні джерела доказів (наприклад, сліди, відео, свідчення) як “свідчення” з певною надійністю, але їх практичне використання в експертних установах часто обмежене складністю моделювання та дефіцитом узгоджених апостеріорних інтерпретацій [13,14].

На основі розглянутих публікацій можна зробити такі узагальнення:

Добре розкриті аспекти: (1) методи визначення швидкості за відео за наявності достатньої геометричної інформації та правильного калібрування; (2) загальні закономірності впливу μ і характеристик покриття/шин на результати гальмівних розрахунків; (3) прикладні підходи до використання EDR для відновлення передаварійних параметрів [1–7,17–24].

Недостатньо розкриті аспекти (актуальні для дослідження):

1. стандартизована (відтворювана) процедура оцінювання достовірності вихідних даних для автотехнічної експертизи з урахуванням різних форматів матеріалів (схема/фото/відео/EDR) та їх типових похибок;

2. узгоджені правила крос-перевірки між джерелами (сліди/деформації/відео/EDR) з єдиним поданням невизначеності й критеріями виявлення суперечностей;

3. кількісні “паспорти невизначеності” для типових задач (визначення швидкості, зупинкового шляху, моменту виникнення небезпеки), які показують внесок похибок кожного параметра для різних сценаріїв ДТП;

4. практичні рекомендації, які переводять імовірнісні методи (Монте-Карло/байєсівські моделі) у формат, придатний для експертної практики (прозорість, повторюваність, пояснюваність) [11–14,23,25–39].

Формулювання цілей статті. На основі проведеного аналізу існуючих літературних джерел визначити стан питання у цій темі, та виробити рекомендації, що дозволяють використання імовірнісних методів у вирішенні практичних завдань автотехнічної експертизи.

4. Дослідження

У цьому розділі узагальнено підходи, що застосовуються у сучасній автотехнічній експертизі та наукових дослідженнях для відтворення механізму ДТП і контролю достовірності вихідних даних. Акцент зроблено на методах, які безпосередньо впливають на точність визначення швидкості, гальмівних параметрів, часових інтервалів і можливості уникнення ДТП, а також на методах оцінки невизначеності результатів [1–4,11,12,23,24].

4.1. Детерміністичні розрахунки гальмування (фізична модель)

Базовий підхід у практиці — використання фізичних співвідношень для оцінювання швидкості та зупинкового (загального) шляху транспортного засобу за матеріальними слідами гальмування та/або відомими характеристиками дорожніх умов. Суть методу полягає у застосуванні закону збереження енергії та кінематики рівноприскореного (рівноуповільненого) руху: початкова кінетична енергія ТЗ під час інтенсивного гальмування переходить переважно в роботу сил тертя в контакт шини–дороги та частково у втрати в гальмівному приводі/деформаціях. Фізичний зміст розрахунку — відновити швидкість у момент початку гальмування (або до зіткнення), виходячи з вимірної дистанції, на якій відбувалося уповільнення, і оціненого середнього уповільнення.

Умови реалізації (застосовності) в експертизі: (1) наявність надійно зафіксованих даних про гальмівний шлях s (довжина слідів, межі гальмування, коректне віднесення слідів саме до даного ТЗ); встановлення режиму гальмування (блокування коліс, робота ABS, переривчасті/відсутні сліди, гальмування з об'їздом); опис дорожніх умов, що визначають можливий діапазон μ (тип покриття, вологість, забруднення, температура, ухил); розуміння, що модель дає *ефективне середнє* уповільнення, а не миттєве. На практиці важливо документувати, які ділянки входять у s : від початку інтенсивного гальмування до зупинки/удару, і чи були ділянки “підгальмовування” до появи слідів.

Модель може бути вжитою для розрахунків, якщо прийняти, що уповільнення протягом ділянки s приблизно сталісне, то початкову швидкість визначають з кінематичного зв'язку між v , a і s . Далі, у ще простішому наближенні, a ототожнюють із максимально доступним гальмівним уповільненням, обмеженим зчепленням $a \approx \mu g$ (для рівної дороги), що дозволяє перейти від невідомого a до параметра μ , який експерт задає/обґрунтовує за матеріалами справи або вимірюваннями. Саме тому ключовою є перевірка достовірності μ і коректності інтерпретації s .

У найпростішому наближенні рівномірного уповільнення швидкість у момент початку гальмування оцінюють за рівнянням (1):

$$v = \sqrt{2as} \quad (1)$$

де v — початкова швидкість (м/с), a — модуль уповільнення (м/с²), s — гальмівний шлях (м).

У спрощеному випадку для ковзання $a \approx \mu g$, тоді отримують практичну формулу (2):

$$v \approx \sqrt{2\mu gs}, \quad (2)$$

де μ — коефіцієнт зчеплення шин з покриттям (безрозмірний), g — прискорення вільного падіння (м/с²).

Критичною є невизначеність μ , яка залежить від стану покриття та шин [17–22]. На рис. 1 показано, як змінюється оцінка швидкості за формулою (2) при фіксованому s .

Крива на рис.2 показує, як за формулою 2 змінюється оцінка швидкості при фіксованому гальмівному шляху s (тут $s = 25\text{м}$). Оскільки швидкість залежить від коефіцієнта μ , навіть помірна невизначеність у μ призводить до помітного розкиду швидкості, тому обґрунтування діапазону μ є критичним для достовірності висновку.

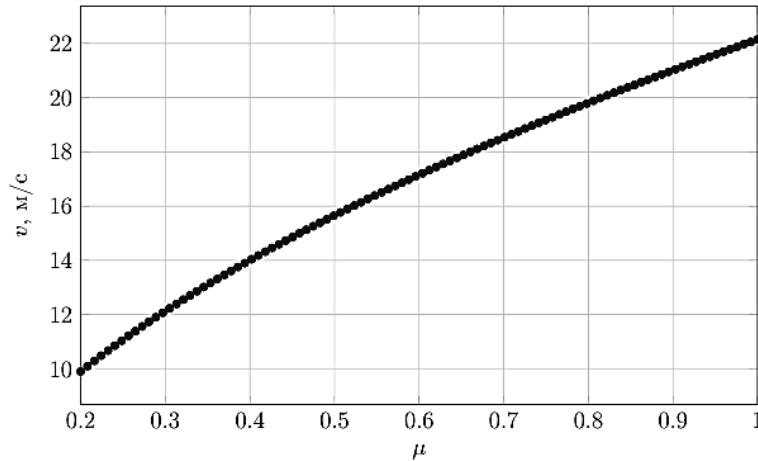


Рис.1. Залежність оціненої швидкості v від коефіцієнта зчеплення μ (приклад для $s = 25$ м)

Як видно з рис. 1, навіть зміна μ в межах реалістичного діапазону може призводити до суттєвого розкиду оцінок v , що безпосередньо впливає на висновок про технічну можливість уникнення ДТП.

Переваги методу: простота, прозорість, швидке застосування, добра інтерпретованість у висновку експерта. Слабкі сторони: висока чутливість до μ та до коректності визначення s ; обмежена адекватність для сучасних ТЗ з ABS/ESP, коли характер слідів може бути переривчастим або відсутнім [2,12].

4.2. Фотограмметрія та аналіз відео (dashcam/CCTV)

Метод передбачає відновлення масштабу сцени, положення транспортного засобу в кадрі та оцінку швидкості за переміщенням у часі на основі відеореєстратора (dashcam) або стаціонарної камери (CCTV). Суть методу — перейти від координат/переміщень об'єкта на зображенні (пікселі) до переміщень у реальному просторі (метри) та, використовуючи часову дискретизацію відео, оцінити швидкість як відношення пройденого шляху до часу. Фізичний зміст оцінки швидкості полягає у відновленні кінематичних параметрів руху ТЗ із оптичних спостережень: ми фактично вимірюємо шлях уздовж траєкторії та інтервал часу між положеннями.

Умови реалізації (що потрібно мати/забезпечити):

1. Калібрування масштабу k : необхідні опорні розміри у сцені (розмітка, ширина смуги, відомі габарити об'єктів) або фотограмметричні прийоми для побудови “метричної” площини дороги.
2. Часова прив'язка: потрібна відома/стала частота кадрів f або її верифікація (оскільки реальна частота може відрізнятися від заявленої через пропуски кадрів/перекодування).
3. Геометрія спостереження: бажано, щоб рух відбувався у площині дороги, а об'єкт був достатньо великим у кадрі; значні перспективні спотворення потребують окремої корекції.
4. Трекінг: слід визначити стабільну “контрольну точку” на транспортному засобі (наприклад, центр колеса або фара) та правила відбраковування кадрів із оклюзіями.

Застосування методу. Спочатку з відеоряду визначають послідовність положень $p(n)$ у пікселях, далі знаходять прирости Δp на інтервалі Δn кадрів, переводять їх у метри через масштаб k (отримуючи Δs), а часовий інтервал беруть як $\Delta t = \Delta n/f$. Для зменшення шуму застосовують згладжування траєкторії та/або оцінюють швидкість на довших інтервалах, але з контролем того, щоб інтервал не “змішував” різні режими руху (розгін, гальмування, маневр). Результат — функція $v_{\text{video}}(t)$ або набір оцінок швидкості в конкретні моменти часу, з яких потім можна робити крос-перевірку зі слідами та EDR. У найпростішому випадку швидкість оцінюють за співвідношенням (3):

$$v \approx \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta p \cdot k}{\Delta n / f}, \quad (3)$$

де Δs — переміщення ТЗ у реальному просторі (м), Δt — інтервал часу (с), Δp — зміщення в пікселях, k — масштаб (м/пікс), Δn — кількість кадрів між вимірами, f — частота кадрів (Гц).

На рис. 2 наведено схематичну ілюстрацію зв'язку між номером кадру та накопиченим переміщенням (у пікселях), що є базою для обчислення Δp у формулі (3).

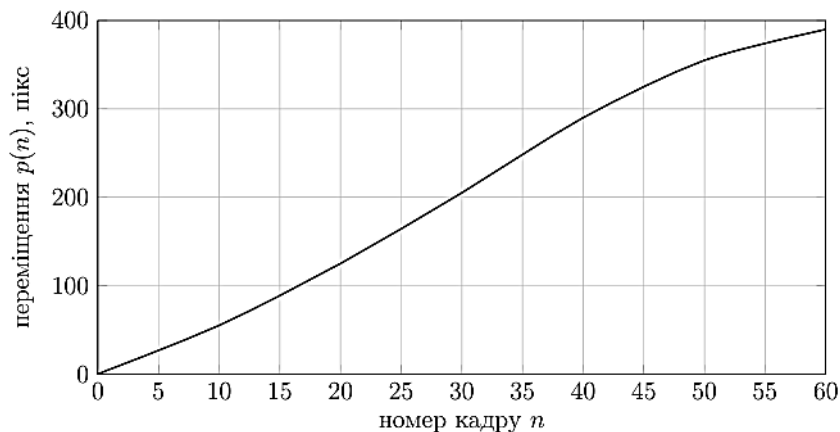


Рис. 2. Схематичний приклад залежності переміщення об'єкта в пікселях від номера кадру (для оцінювання Δp).

Графік на рис. 2 ілюструє результат трекінгу об'єкта на відео: за кожним кадром n фіксується координата/переміщення $p(n)$ у пікселях. Для оцінювання швидкості потрібні прирости Δp між кадрами (або на інтервалі кадрів) та коректна часова прив'язка (частота кадрів f); шуми/розриви в $p(n)$ безпосередньо переходять у похибку $v_{\text{video}}(t)$.

Практика показує, що основні джерела похибок — масштабування, перспективні спотворення, rolling shutter, компресія, а також помилки трекінгу об'єктів [1–4,7,8]. З рис. 2 видно, що будь-які “злами” або шум у траєкторії $p(n)$ (наприклад, через оклюзії чи помилки детекції) безпосередньо впливають на оцінку швидкості.

Сильні сторони: можливість отримати швидкість/траєкторію навіть без слідів; корисний інструмент крос-перевірки зі слідами та EDR. Слабкі сторони: потреба у валідації масштабу і калібрування; невизначеність частоти кадрів; складність документування похибки для судової практики [2,3].

4.3. Використання EDR/АСМ-даних і їх валідація

EDR/АСМ може надавати часові ряди передаварійних параметрів (швидкість, стан гальмування, положення педалей, статус ремня безпеки, інколи події спрацювання систем тощо). Суть методу в експертному контексті — використати ці ряди як незалежне, інструментально зафіксоване джерело інформації про режим руху ТЗ та виконати валідацію

(перевірку коректності) шляхом зіставлення з іншими доказами: відео, слідами, деформаціями, схемою місця ДТП. Фізичний зміст полягає у тому, що електронний блок фіксує параметри, пов'язані з поздовжньою динамікою ТЗ (швидкість/уповільнення), тож ці дані можуть або підтвердити, або спростувати реконструкцію, виконану за “польовими” слідами.

Умови реалізації (що потрібно для коректного використання):

1. Доступність і автентичність: наявність витягу EDR/ACM з описом процедури зчитування, версії ПЗ/обладнання, ідентифікації ТЗ та контроль ланцюжка зберігання.
2. Інтерпретованість каналів: розуміння, що саме означає канал “speed” у конкретному ТЗ (джерело швидкості, фільтрація, одиниці, крок дискретизації, можливі пропуски).
3. Часова прив'язка: необхідно визначити нульовий момент (наприклад, “trigger” події EDR) і узгодити його з часовою шкалою відео/схеми; навіть невеликий зсув часу може давати систематичну нев'язку.
4. Контроль узгодженості: бажано мати принаймні один незалежний опорний факт (момент удару на відео, звук, спалах, контакт із перешкодою), щоб виконати синхронізацію.

Етапи виконання методу:

1. дані EDR приводяться до єдиних одиниць і часової сітки;
2. за необхідності виконується інтерполяція/ресемплінг до моментів t_i ;
3. формується порівняння швидкостей, отриманих різними методами. Типова задача — синхронізація часової шкали EDR з відео/подією та узгодження швидкостей. Якщо $v_{EDR}(t)$ — швидкість з EDR, то перевірка узгодженості з відео може формалізуватись як контроль різниці за рівнянням (4):

$$\Delta v(t_i) = v_{EDR}(t_i) - v_{video}(t_i), \quad (4)$$

де: t — час (с) відносно обраного нульового моменту (наприклад, початку фрагмента відео або часу події, зафіксованої EDR); t_i — дискретні моменти часу, в яких доступні/узгоджені вимірювання.

$v_{EDR}(t)$ — *функція (часовий ряд) швидкості*, отримана з EDR/ACM (м/с). Фізичний зміст: миттєва (наближено миттєва) швидкість ТЗ у кожен момент часу; практично це послідовність відліків, записаних електронним блоком, з власною дискретизацією та можливими внутрішніми фільтрами.

$v_{video}(t)$ — *функція оціненої швидкості за відео* (м/с). Фізичний зміст: швидкість, відновлена з відеоряду як похідна переміщення за часом. Типово її одержують у два кроки: (1) з трекінгу на відео визначають переміщення об'єкта між кадрами Δp (пікс) і переводять у метри через масштаб k (м/пікс); (2) ділять пройдений шлях на інтервал часу Δt між кадрами (або після інтерполяції приводять до потрібних t_i). $\Delta v(t)$ — *функція нев'язки (залишку)* між двома незалежними оцінками швидкості (м/с): $\Delta v(t) > 0$ означає, що EDR дає більшу швидкість, ніж оцінка з відео, а $\Delta v(t) < 0$ — навпаки. Фізичний зміст: індикатор систематичних зсувів (масштаб/калібрування, зсув часових шкал) та випадкових похибок у джерелах даних.

На рис. 3 показано демонстраційний приклад порівняння $v_{EDR}(t)$ та $v_{video}(t)$ (ілюстрація ідеї кросперевірки). На графіку (рис.3) зіставлено два незалежні джерела швидкості: $v_{EDR}(t)$ (електронні дані) та $v_{video}(t)$ (оцінка з відео). Різниця між кривими $\Delta v(t) = v_{EDR}(t) - v_{video}(t)$ використовується для крос-перевірки: сталі зсуви вказують на проблеми масштабу/калібрування або синхронізації часу, а випадкові коливання — на шум вимірювань. У разі значних відхилень (тобто великого $|\Delta v(t_i)|$ у (4)) потрібен аналіз джерел помилки та коректності інтерпретації сигналів [23,24].

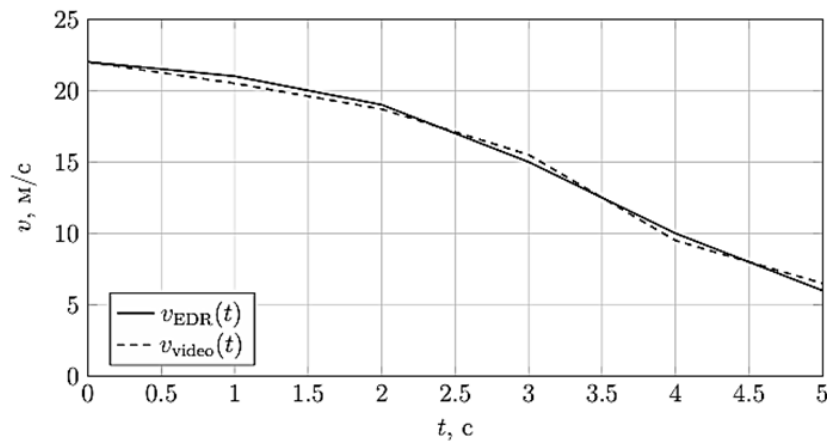


Рис. 3. Демонстраційне порівняння оцінок швидкості за EDR та за відео як основа для аналізу нев'язки $\Delta v(t)$

У разі значних відхилень (тобто великого $|\Delta v(t_i)|$ у (4)) потрібен аналіз джерел помилки та коректності інтерпретації сигналів [23,24].

Сильні сторони методу: висока деталізація в часі; потенційно менша похибка швидкості, ніж за слідами; підвищує відтворюваність реконструкції. Слабкі – залежність від виробника/моделі та доступності даних; потреба в процедурі валідації та пояснюваності в суді [23–25].

4.4 Моделювання Монте-Карло для поширення похибок

Щоб перейти від “точкових” значень до інтервальних оцінок, застосовують Монте-Карло: задають розподіли входних параметрів (наприклад, μ , s , час реакції t_r , затримку спрацювання гальм, ухил дороги) і багаторазово обчислюють результат за вибраною фізичною/емпіричною моделлю. Суть методу — явним чином змодельовати невизначеність входних даних як випадковість: замість одного значення μ береться множина можливих значень з певною ймовірністю, і кожен “прогін” дає один можливий результат. Фізичний зміст — не “розмивання істини”, а відображення того факту, що реальні вихідні дані в ДТП задаються діапазонами (через похибки вимірювання та варіативність умов), а отже й вихідні параметри реконструкції також мають природний діапазон.

Умови реалізації (практичні кроки):

1. Формалізація похибок: для кожного входного параметра потрібно задати інтервал і/або розподіл (рівномірний, нормальний, трикутний) та обґрунтувати його з матеріалів справи.
2. Модель перетворення: необхідно обрати формулу/модель, що зв’яже входні параметри з шуканим результатом (наприклад, $v = f(\mu, s)$ або більш повна модель зупинки з t_r).
3. Кількість прогонів N : обирається достатньою для стабільності квантилів/інтервалів; окремо фіксуються “насіння” генератора та правила відтворюваності.
4. Контроль якості: перевіряють наявність нефізичних реалізацій (наприклад, $\mu < 0$) та застосовують обмеження/фільтри.

Що і як розраховується: результатом є масив реалізацій $\{v^{(j)}\}_{j=1}^N$, з якого отримують середнє, дисперсію та, головне для експертизи, квантили (наприклад, 5% і 95%) як інтервал правдоподібних значень. Додатково за допомогою чутливісного аналізу (кореляції, частки дисперсії) ранжують входні параметри за внеском у невизначеність, що прямо підказує, які заміри потрібно уточнювати в першу чергу. Для швидкості отримують набір реалізацій за формулою (5):

$$V^{(j)} = p2\mu^{(j)}gs^{(j)}, j = 1, \dots, N, \quad (5)$$

де j — номер реалізації (прогону), N — кількість прогонів моделювання, $\mu^{(j)}$ — згенероване значення коефіцієнта зчеплення, $s^{(j)}$ — згенероване значення гальмівного шляху (м), $v^{(j)}$ — отримана швидкість (м/с).

Далі обчислюють статистики ($E[v]$, $\text{Var}(v)$, квантили) та формують довірчі інтервали [11,12]. На рис. 4 наведено демонстраційний приклад гістограми результатів моделювання.

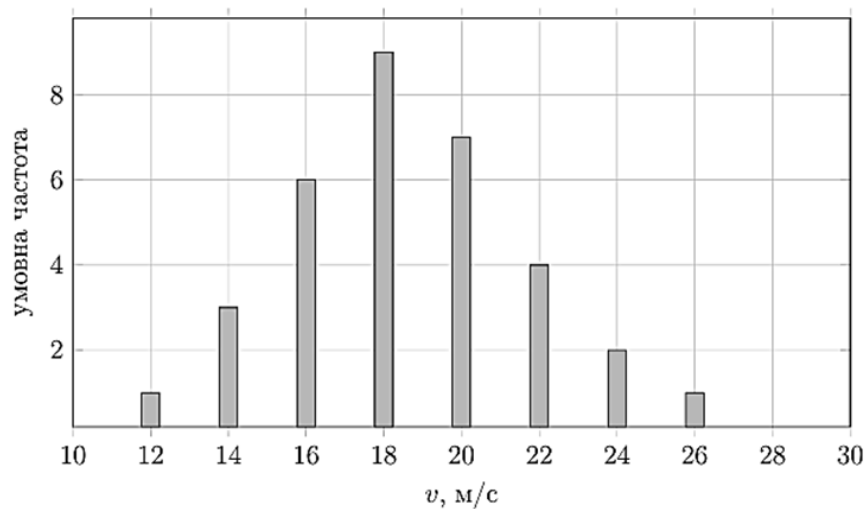


Рис. 4. Демонстраційна гістограма розподілу оцінок швидкості v за результатами моделювання Монте-Карло

Гістограма на рис. 4 показує, як у результаті серії прогонів Монте-Карло формується розподіл можливих значень швидкості v (кожен стовпчик — кількість реалізацій, що потрапили до відповідного інтервалу). Такий вигляд результату підкреслює, що при наявній невизначеності вхідних даних коректніше оперувати інтервалами/квантилями, а не одним “точковим” значенням.

Як видно з рис. 4, результат природно подається у вигляді розподілу, а не одного значення, що дає підстави для більш обґрунтованих експертних висновків.

Сильні сторони методу: кількісна оцінка невизначеності; можливість ранжування факторів; прозорість у вигляді інтервалів. Слабкі – результат залежить від коректності припущених розподілів; потребує обґрунтування вхідних інтервалів/дисперсій [11,12].

4.5. Байєсівські підходи для інтеграції різних джерел доказів

Цей підхід дозволяє формально об’єднувати незалежні (або умовно незалежні) джерела: сліди, відео, EDR, покази свідків, результати моделювання та експертні припущення. Суть методу — розглядати невідомі параметри реконструкції (наприклад, швидкість v , коефіцієнт зчеплення μ , час реакції t_r) як випадкові величини з початковими уявленнями (апріорі), а кожен фрагмент доказів D — як інформацію, що уточнює ці уявлення через правдоподібність $p(D | \theta)$. Фізичний смисл у задачах ДТП полягає в “зважуванні” доказів: дані, яким довіряємо більше (наприклад, інструментальні), повинні сильніше впливати на підсумковий висновок, а суперечливі дані мають приводити до ширших інтервалів або до виявлення несумісності гіпотез.

Умови реалізації (що потрібно задати, щоб метод працював коректно):

1. Параметризація: визначити вектор θ (щосаме відновлюємо) та його допустимі межі (фізичні обмеження).
2. Апріорі $p(\theta)$: зафіксувати початкові діапазони/розподіли (наприклад, μ для конкретного покриття) з поясненням джерела.
3. Модель спостережень: для кожного джерела даних задати похибку/надійність у вигляді $p(D | \theta)$ (наприклад, похибка оцінки швидкості з відео, дискретизація EDR, похибка вимірювання s).
4. Обчислювальна процедура: часто потрібні чисельні методи (сітка, МСМС, важливісне вибіркування) та правила перевірки збіжності/відтворюваності.

Метод частіше отримує результат — апостеріорний розподіл $p(\theta | D)$, з якого отримують інтервали для параметрів (наприклад, 95% довірчий/кредибельний інтервал для ν) та порівнюють альтернативні сценарії (гіпотези) через відношення правдоподібності/байєсівські фактори. Практично це дає не лише “одне число”, а прозоре обґрунтування того, як кожне джерело даних вплинуло на висновок і чому залишилась певна невизначеність. Узагальнено апостеріорний розподіл параметрів реконструкції записують як (6):

$$p(\theta | D) \propto p(D | \theta)p(\theta), \quad (6)$$

де: θ — вектор невідомих параметрів (наприклад, ν , μ , t_r), D — сукупність даних/спостережень; $p(\theta)$ — апіорний розподіл, $p(D | \theta)$ — правдоподібність, $p(\theta | D)$ — апостеріорний розподіл.

На рис. 5 наведено схематичний приклад того, як апіорний розподіл може “уточнюватися” до апостеріорного після врахування даних.

Практична цінність методу — отримання апостеріорних інтервалів та можливість враховувати різну “надійність” джерел [13,14].

Сильні сторони методу є природний механізм ф’южну даних; формальна робота з невизначеністю; можливість перевірки альтернативних гіпотез. Слабкі сторони – складність побудови правдоподібностей $p(D | \theta)$; складність пояснення моделі нефахівцям; потреба у програмній реалізації й валідації [13,14].

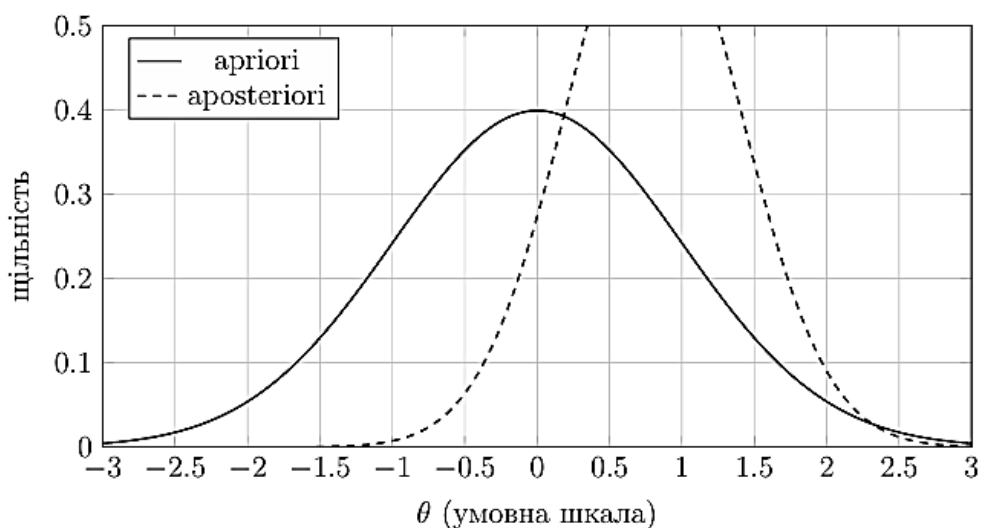


Рис.5. Схематичне порівняння апіорного та апостеріорного розподілів у байєсівському підході

4.6 Порівняльний аналіз і вибір методу для даного дослідження

Для задач, сформульованих у роботі (оцінка достовірності вихідних даних і впливу похибок на експертні висновки), ключовим є не лише отримати результат, а й кількісно описати його невизначеність і чутливість до параметрів. З огляду на це базовим методом пропонується обрати моделювання Монте-Карло з чутливісним аналізом як ядро підходу, доповнюючи його детерміністичними моделями гальмування та крос-перевіркою даних з відео/EDR за наявності [11,12,23,24].

Монте-Карло безпосередньо відповідає меті роботи (“похибка на вході” → “невизначеність на виході”), результат подається як інтервал/розподіл, що підвищує обґрунтованість. Одночасно, метод масштабований для різних типів ДТП і наборів вхідних

даних, а чутливісний аналіз дозволяє сформувати практичний чеклист замірів, фокусуючись на найвпливовіших параметрах.

4.7. Планування й проведення експерименту

У підрозділі наведено план і демонстраційне виконання експерименту відповідно до обраної методики (ядро: моделювання Монте-Карло + чутливісний аналіз; додатково: крос-перевірка відео/EDR як контроль узгодженості джерел). Експеримент має показати, як невизначеність вихідних даних переходить у невизначеність результатів автотехнічних розрахунків і які параметри формують основний внесок у розкид.

4.7.1. План експерименту та критерії якості

Експеримент проводиться у такій послідовності яка наведена нижче

1. Вибір сценарію та набору параметрів. Обирається типова задача: визначення швидкості на початку гальмування за гальмівним шляхом та коефіцієнтом зчеплення.
2. Формування “паспорта” вихідних даних. Для кожного параметра фіксуються джерело, одиниці, спосіб отримання та очікуваний діапазон похибок.
3. Задання розподілів невизначеностей. Параметри μ та s задаються як випадкові величини (інтервали/розподіли), що відображають реалістичні умови ДТП. 4. Обчислення (Монте-Карло). Виконується N прогонів з генерацією $\mu^{(j)}$, $s^{(j)}$ і розрахунком $v(j)$.
4. Оцінювання результатів. Формуються квантили P_5 , P_{50} , P_{95} та інтервал правдоподібних швидкостей.
5. Чутливісний аналіз. Визначається, який параметр (наприклад, μ чи s) найбільше впливає на розкид v .
7. Крос-перевірка з цифровими джерелами. За наявності рядів $v_{\text{video}}(t)$ та $v_{\text{EDR}}(t)$ аналізується нев’язка $\Delta v(t)$ і робляться висновки щодо можливих систематичних зсувів.

Критерії якості вихідних даних:

1. простежуваність (джерело і метод отримання);
2. узгодженість у часі/просторі між джерелами;
3. реалістичність заданих інтервалів похибок;
4. відтворюваність (фіксовані припущення і параметри моделювання).

4.7.2 Вихідні дані та постановка демонстраційного експерименту

Для ілюстрації застосуємо базову модель гальмування (2). Приймаємо, що за матеріалами справи оцінено гальмівний шлях $s \approx 25$ м, а коефіцієнт зчеплення лежить у реалістичному діапазоні для даних умов.

Модель невизначеностей:

- μ задається трикутним розподілом з мінімумом 0.55, модою 0.70 та максимумом 0.85;
- s задається нормальним розподілом $N(25, 1^2)$ м.

На рисунку 6 показано, як у межах експерименту формалізовано невизначеність коефіцієнта зчеплення μ . Рисунок 6 відображає, як у межах експерименту формалізовано невизначеність коефіцієнта зчеплення μ . Обраний трикутний розподіл задається трьома характерними точками: мінімальним значенням (0.55), найбільш імовірним (мода 0.70) та максимальним (0.85). Така форма є зручною для експертної практики, коли точних інструментальних вимірювань μ немає, але можна обґрунтовано вказати межі та “найтиповіший” рівень зчеплення за описом покриття, його стану (сухе/вологе/забруднене), температури та загальних умов події.

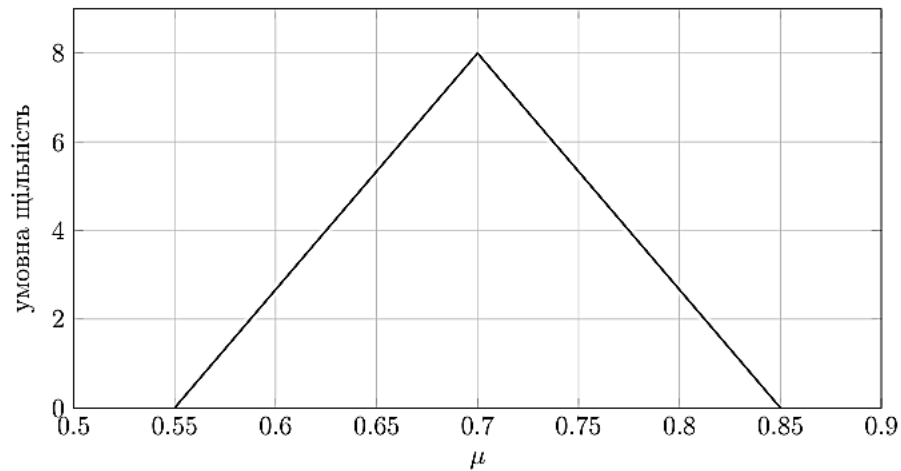


Рис.6. Задання невизначеності μ
(трикутний розподіл: межі та найбільш імовірне значення)

Фізичний зміст цього рисунка полягає в тому, що μ не є сталим числом: навіть на одному й тому самому покритті він коливається через неоднорідність поверхні, локальні забруднення, різний стан шин і режим ковзання. У подальших розрахунках Монте-Карло кожна реалізація $\mu^{(j)}$ інтерпретується як “один можливий стан” контакту шина–дорога в момент гальмування. На рис. 7 наведено модель невизначеності вимірюваного гальмівного шляху s .

На рисунку 7 подано модель невизначеності вимірюваного гальмівного шляху s у вигляді нормального розподілу з математичним сподіванням 25 м та стандартним відхиленням 1 м. Такий вибір відповідає ситуації, коли s отримано з вимірів на місці пригоди (або з масштабування фото/схеми) і похибка має переважно випадковий характер: похибка рулетки/далекоміра, неоднозначність початку та кінця сліду, зсув базових точок, часткове перекриття слідів іншими ТЗ тощо.

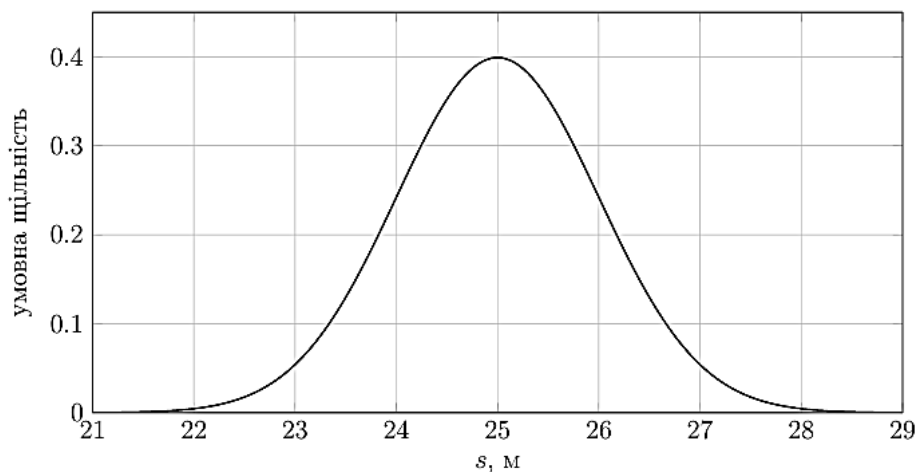


Рис.7. Задання невизначеності гальмівного шляху s
(нормальний розподіл)

Фізично s є інтегральною характеристикою процесу уповільнення: він акумулює як властивості покриття, так і режим гальмування та динаміку навантаження на колеса. Тому, навіть якщо μ задано коректно, неточність у s безпосередньо трансформується у неточність швидкості через залежність $v \propto s$. Важливо, що на рисунку показано не “ймовірність істинності” конкретного s , а модель того, як вимір може коливатися навколо номіналу 25 м за повторних вимірювань/інтерпретацій. У Монте-Карло це означає, що в кожному прогоні $s^{(j)}$ трохи відрізняється, і ми отримуємо набір можливих швидкостей, який природно враховує

метрологічну невизначеність. Практичний сенс такого подання полягає в тому, що експерт може “звужити” або “розширити” розподіл s залежно від якості фіксації слідів (наприклад, $\sigma = 0.5$ м при якісній схемі чи $\sigma = 2$ м при сумнівній фотофіксації) і одразу побачити, як це вплине на інтервал швидкості у висновку.

4.7.3 Хід експерименту та результати (Монте-Карло)

Точкова оцінка (для порівняння). Для номінальних значень $\mu = 0.70$ та $s = 25$ м:

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot 0.70 \cdot 9.81 \cdot 25} \approx 18.5 \text{ м/с} \approx 66.6 \text{ км/год. (7)}$$

Стохастична оцінка. У Монте-Карло експерименті для кожної реалізації j обчислюється $v^{(j)}$ за (5). Результат представляється розподілом і квантилями.

На рисунку. 8 наведено графічний приклад інтервального подання результату у вигляді гістограми та квантилів.

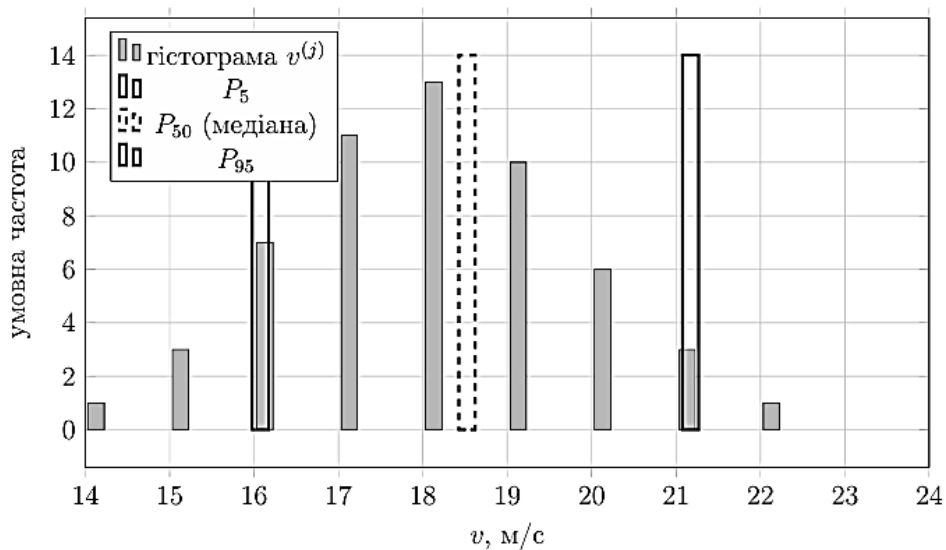


Рис.8. Розподіл оцінок швидкості v (Монте-Карло) з позначенням квантилів P_5 , P_{50} , P_{95} .

Рисунок 8 є графічним поданням результату моделювання Монте-Карло у вигляді гістограми швидкості v . Кожен стовпчик відповідає кількості (умовній частоті) реалізацій $v^{(j)}$, що потрапили в певний інтервал значень. У фізичному сенсі це означає, що через варіативність μ та похибку s швидкість на початку гальмування не може бути коректно описана одним числом без застережень: існує “хмара” можливих швидкостей, і різні значення мають різну правдоподібність. Вертикальні маркери показують квантили P_5 , P_{50} (медіану) та P_{95} , які зручно інтерпретувати в експертній практиці як інтервальну оцінку: з імовірністю близько 0.90 істинна швидкість лежить між P_5 і P_{95} (за умови, що прийняті розподіли вхідних даних адекватні). На відміну від “точкового” розрахунку результату одразу показує стійкість/нестійкість v_0 , така форма висновку: якщо інтервал широкий, то навіть Інтервальна інтерпретація результату має вигляд: швидкість на початку гальмування належить до інтервалу $[P_5; P_{95}]$ з медіаною P_{50} , що є більш коректним для судово-експертного опису, ніж одне “точкове” число.

4.7.4 Чутливісний аналіз (ранжування факторів)

Для задачі $v = \sqrt{2\mu g s}$ розбіжність результатів найчастіше визначається невизначеністю μ , оскільки μ варіює ширше, ніж похибка вимірювання s . Ілюстративний результат ранжування наведено на рисунку 9.

Діаграма на рисунку 9 ілюструє результат чутливісного аналізу, тобто оцінку внеску кожного вхідного параметра в загальну невизначеність вихідної величини (тут — швидкості v). Для моделі $v = \sqrt{2\mu gs}$ чутливість має зрозумілу фізичну інтерпретацію: швидкість пропорційна квадратному кореню від добутку μs , тому відносні зміни μ та s впливають на v приблизно “вполовину” від їхніх відносних змін. Однак реальна частка внеску визначається не лише формулою, а й тим, наскільки широко варіюють параметри у вихідних даних

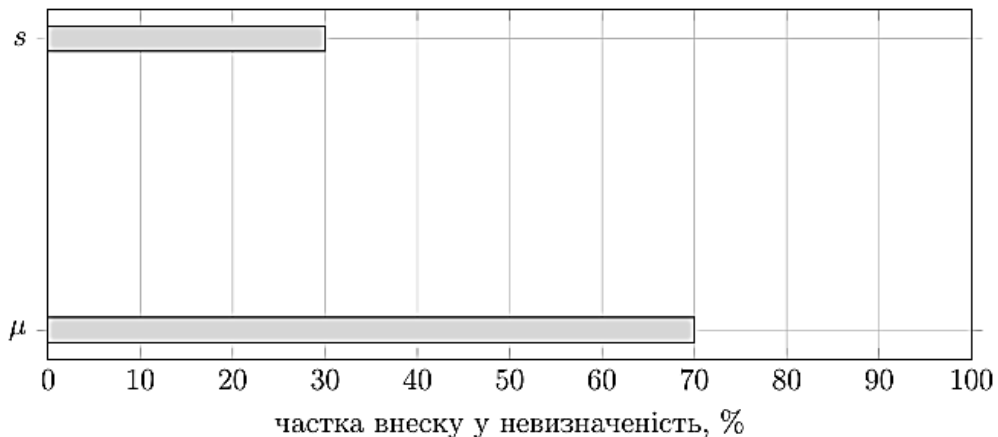


Рис. 9. Чутливісний аналіз.

Відносний внесок невизначеностей μ та s у розкид швидкості v .

У демонстраційному експерименті діапазон μ (від 0.55 до 0.85) значно ширший у відносному вимірі, ніж похибка s (стандартне відхилення близько 1 м при номіналі 25 м), тому саме μ стає домінуючим фактором і формує більшу частину розкиду швидкості. Практична цінність такого рисунка — у прямому “управлінні достовірністю”: він показує, що зусилля зі зменшення невизначеності треба спрямовувати не рівномірно на всі параметри, а насамперед на ті, що домінують. У нашому випадку це означає: (1) максимально докладно описати дорожні умови та стан покриття, (2) за можливості виконати інструментальне вимірювання зчеплення або використовувати підтверджені локальні дані, (3) документувати стан шин/ABS, що впливають на ефективний μ . Якщо ж рисунок показував би домінування s , тоді першочерговими були б повторні виміри слідів, уточнення меж гальмування і крос-перевірка зі схемою/відео. Отже, чутливісний аналіз перетворює загальну фразу “дані неточні” на конкретний висновок: які саме дані визначають результат і що саме потрібно уточнювати для підвищення доказової сили експертизи.

Експеримент показав, що обрана методика дозволяє:

- (1) формалізувати невизначеність ключових вихідних даних через розподіли (рис. 6, 7);
- (2) отримувати результат у вигляді інтервалу/розподілу швидкості замість одного значення (рис. 8);
- (3) ранжувати фактори, що формують основний внесок у похибку (рис. 9).

Для підвищення достовірності висновків у першу чергу доцільно уточнювати μ (через детальніший опис дорожніх умов або інструментальні вимірювання) та забезпечувати максимально точне визначення s ; цифрові джерела (відео/EDR) слід використовувати як інструмент крос-перевірки узгодженості.

5. Результати та обговорення

Результати експерименту підтверджують доцільність переходу від “точкових” автотехнічних оцінок до інтервального/імовірнісного подання. У прикладі з гальмуванням показано, що одна й та сама вихідна інформація (довжина слідів та припущення про дорожні умови) може приводити до помітно різних значень швидкості, якщо враховувати реалістичні

похибки. Це має прямий вплив на ключові експертні питання: момент виникнення небезпеки, технічну можливість уникнення та коректність причинно-наслідкових висновків.

Наукова новизна отриманих результатів. До елементів наукової новизни (в межах виконаної роботи) віднесено:

1. Формалізацію достовірності вихідних даних через розподіли/інтервали з подальшим отриманням інтервальних оцінок результатів (швидкість, шлях, часові інтервали).
2. Поєднання Монте-Карло з чутливісним аналізом як практичного інструмента для ранжування параметрів і обґрунтування “мінімально достатнього” набору замірів.
3. Ідею крос-перевірки цифрових і традиційних джерел у єдиній логіці “нев’язок” (наприклад, $\Delta v(t)$), що дозволяє виявляти систематичні помилки синхронізації/масштабу

Перспективними подальших досліджень є такі напрями :

1. розширення моделі до повного зупинкового шляху з урахуванням часу реакції t_r і затримки спрацювання гальм;
2. розробка формальних правил узгодження відео– EDR (оцінка зсуву часу, контроль FPS, оцінка систематичних похибок масштабу);
3. перехід від демонстраційних розподілів до базованих на емпіричних вимірюваннях/серіях випробувань (для μ на різних покриттях);
4. апробація підходу на наборі анонімізованих реальних кейсів з публікацією “типових профілів невизначеності” для різних сценаріїв ДТП;
5. дослідження можливостей байєсівського ф’юзну даних для випадків із суперечливими доказами.

6. Висновки

1. Систематизовано основні джерела невизначеності вихідних даних автотехнічної експертизи ДТП (схема/виміри, фото- та відеоматеріали, дорожні умови, електронні дані EDR/ACM) і показано, що без явної процедури контролю якості навіть формально коректні розрахунки можуть приводити до нестійких експертних висновків.

2. Обґрунтовано доцільність переходу від “точкових” оцінок до інтервального подання результатів: у задачах визначення швидкості, гальмівного та зупинкового шляху, часових інтервалів і технічної можливості уникнення ДТП правильніше подавати не одне число, а діапазон/розподіл з поясненням причин його ширини.

3. Запропоновано практично орієнтовану методику, що поєднує детерміністичні фізичні моделі (кінематика гальмування) з моделюванням Монте-Карло для поширення похибок та з чутливісним аналізом для ранжування параметрів за внеском у невизначеність результату.

4. На демонстраційному експерименті показано реалізацію підходу: задано розподіли ключових параметрів (μ , s), отримано розподіл швидкості та інтервальні оцінки через квантили P_5 , P_{50} , P_{95} , а також визначено домінувальні фактори невизначеності.

5. Встановлено, що для розглянутого типового сценарію гальмування домінувальним джерелом невизначеності є коефіцієнт зчеплення μ , тоді як похибка вимірювання гальмівного шляху s зазвичай має менший внесок; відповідно, найбільший ефект підвищення достовірності забезпечують уточнення дорожніх умов/зчеплення та належна фіксація слідів.

6. Запропоновано використання крос-перевірки цифрових і традиційних джерел як інструмента валідації (аналіз невязок $\Delta v(t)$ між оцінками швидкості за відео та EDR), що дозволяє виявляти систематичні помилки масштабування, FPS та синхронізації часу.

7. Практичний результат роботи полягає у формуванні основи для “паспорта невизначеності” та чек-листів мінімально достатніх замірів і правил контролю якості матеріалів справи, що підвищує прозорість, відтворюваність і доказову силу експертних розрахунків.

Список літератури:

- 1) Dahl, J., & Javadi, S. (2020). Vehicle speed measurement model for video-based systems. *Sensors*, 20(13), 3697. <https://doi.org/10.3390/s20133697>
- 2) Hahner, M., & Dudek, K. (2018). Verification of the reliability of vehicle speed estimation based on recordings from video recorders. *Forensic Science International*, 288, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.04.002>
- 3) Hahner, M., & Dudek, K. (2020). Determining the image scale factor in forensic camera measurements. *Forensic Science International*, 308, 110229. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110229>
- 4) Chun, M., Hahner, M., & Dudek, K. (2024). Estimation of an impact speed in collision with stationary barrier: error analysis. *Forensic Science International: Reports*, 9, 100489. <https://doi.org/10.1016/j.fsir.2024.100489>
- 5) Choi, B., & Kong, S. (2026). Vehicle speed estimation in traffic videos with occluded scenes. *Multimedia Tools and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11042-026-21222-9>
- 6) Giovannini, D., Hocking, M., & Humphries, D. (2021). Dashcam footage in a fatal pedestrian collision: A case report. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 17, 641–646. <https://doi.org/10.1007/s12024-021-00374-4>
- 7) Ahmed, W., Luo, M., & Baker, B. (2022). Simulation-based moving vehicle accident reconstruction with monocular camera. *Science & Justice*, 62(2), 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2021.11.001>
- 8) Chen, Y., Kohler, J., & Lathrop, S. (2021). Analytical modeling of vehicle speed by forensic video analysis. In *Computing in Civil Engineering 2021* (pp. 751–758). <https://doi.org/10.1061/9780784483565.091>
- 9) Cai, T., et al. (2024). A deep learning approach to automatically extract traffic characteristics from CCTV video. *Applied Sciences*, 14(19), 8664. <https://doi.org/10.3390/app14198664>
- 10) Javadi, S., & Dahl, J. (2025). ForeSpeed: A large-scale dataset for vehicle speed estimation and forecasting in real-world road scenes (arXiv:2512.19364).
- 11) Qian, H., Wu, Z., & Cheng, J. (2014). Response surface methodology and Monte Carlo simulation for uncertainty analysis of traffic accident reconstruction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 49, 107–122. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.09.004>
- 12) Hahner, M., & Dudek, K. (2016). Reliability of results from calculations performed in traffic accident reconstruction. *Forensic Science International*, 266, 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.03.038>
- 13) Davis, J. (2003). Bayesian reconstruction of traffic accidents. *Law, Probability and Risk*, 2(2), 69–89. <https://doi.org/10.1093/lpr/2.2.69>
- 14) Davis, J. (2009). Sample-based Bayesian reconstruction of traffic accidents. *Journal of Transportation Safety & Security*, 1(3), 166–183. <https://doi.org/10.1080/19439960903149579>
- 15) Richardson, M., Sego, S., & Weir-Jones, I. (2012). Yaw mark critical speed formulas: A review of the assumptions and limitations. *SAE Technical Paper 2012-01-0600*. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0600>
- 16) Saulić, N., Dedović, V., Papić, Z., & Marković, N. (2020). Throw distance prediction in pedestrian-vehicle collision. *Promet – Traffic & Transportation*, 32(3), 315–325. <https://doi.org/10.7307/ptt.v32i3.3312>
- 17) Ueckermann, A., Wang, D., Oeser, M., & Steinauer, B. (2015). Calculation of skid resistance from texture measurements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2(1), 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.01.001>
- 18) Fwa, T. F. (2021). Skid resistance determination for pavement management and wet-weather safety. *Journal of Road Engineering*, 27(12), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2021.12.001>
- 19) Blundell, M. V., Harty, D., & Rezaei, A. (2017). Road friction virtual sensing: A review of estimation techniques with emphasis on low excitation modes. *Applied Sciences*, 7(12), 1230. <https://doi.org/10.3390/app7121230>

- 20) .Hu, C., Wang, R., Yan, F., & Chen, N. (2020). Robust longitudinal road friction coefficient estimation based on vehicle dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(11), 2685–2698. <https://doi.org/10.1177/0954407020929233>
- 21) .Chen, Y., Zhang, K., & Lian, X. (2024). Road friction estimation based on vision for safe autonomous driving. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 203, 111019. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.111019>
- 22) Han, X., & Chen, Z. (2025). Data enforced unscented Kalman filter for road friction coefficient estimation. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 38, 54. <https://doi.org/10.1186/s10033-025-01354-z>
- 23) Matsumura, D., White, K., & Spence, K. (2024). Reconstructing pre-crash behavior using event data recorders and dashboard camera video. *SAE Technical Paper 2024-01-2891*. <https://doi.org/10.4271/2024-01-2891>
- 24) Ruth, C. J., & Reust, T. (2009). Chrysler airbag control module event data recorder accuracy and applications in crash reconstruction. *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*, 2(1), 774–789. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0877>
- 25) Ray, S. (2023). Reconciliation of electronic data from event data recorders and other sources in accident reconstruction. *Journal of the Organization of Traffic Accident Forensic Examiners*, 40(2), 34–47. https://doi.org/10.51501/jot_nafe.v40i2.837
- Dolia, K. (2026). Complex modeling of the functionality of routes. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 5(1), 58–65. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20260501.06>
- 26) Dolia, K. (2026). GIS — osnova dlia intelektualnykh transportnykh system [GIS — the basis for intelligent transport systems]. *Naukoiemni Tekhnolohii*, 69(1), 126–130. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.69.20953>
- 27) Dolia, K. (2026). Research on passenger traffic parameters in air transport. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 5(2), 113–129. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20260502.11>
- 28) Dolia, K. (2026). Tsyfrovyi dviinykh multimodalnoho transportnoho vuzla dlia adaptivnoho keruvannia pasazhyrskymy ta vantazhnymy potokamy v realnomu chasi [Digital twin of a multimodal transport hub for adaptive real-time management of passenger and cargo flows]. *Suchasni Tekhnolohii v Mashynobuduvanni ta Transporti*, 1(26). <https://doi.org/10.36910/emwxn052>
- 29) Dolia, K., & Grigorovich, A. (2026). Car technical expertise. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 5(2), 130–142. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20260502.12>
- 30) Dolia, K., & Kobrina, N. (2026). Organization and management of automobile service. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 5(2), 143–153. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20260502.13>
- 31) Dolia, K. V. (2025). Optymizatsiia planovo-poperedzhuvalnoho tekhnichnoho obsluhovuvannia rukhomoho skladu z urakhuvanniam ryzyku vidmov [Optimization of preventive maintenance of rolling stock taking into account the risk of failures]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Natsionalnoho Universytetu Imeni Volodymyra Dalia*, 298(12), 79–87. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-79-87>
- 32) Dolia, K. V. (2026). Modeling and forecasting passenger flows in multimodal route systems taking into account transfers and schedule reliability [Modeliuvannia ta prohnozuvannia potokiv pasazhyriv u multimodalnykh marshrutnykh systemakh z urakhuvanniam peresadok i nadiinosti rozkladiv]. *Tsentrlnoukrainskyi Naukovyi Visnyk. Tekhnichni Nauky*, 13(44), 382–389. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).382-389](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).382-389)
- 33) Dolia, K. V. (2026). Real-time development of an integrated model of adaptive urban passenger traffic management in railway transport [Rozrobka intehrovanoi modeli adaptivnoho upravlinnia miskymy pasazhyropotokamy na zaliznychnomu transporti u rezhymi realnoho času]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Natsionalnoho Universytetu Imeni Volodymyra Dalia*, 2(300), 107–118. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-107-118>

- 34) Dolia, K. V. (2026). Vyznachennia zakonornosti kolyvannia pasazhyropotoku [Determining the regularities of passenger flow fluctuations]. *Tekhnichna Inzheneriia*, 1(97), 24–31. [https://doi.org/10.26642/ten-2026-1\(97\)-24-31](https://doi.org/10.26642/ten-2026-1(97)-24-31)
- 35) Dolia, K. V. (2026). Vyznachennia optymalnoi marshrutnoi shvydkosti jizdky pry ekspluatatsii avtomobilnykh zasobiv transportu v pasazhyrskykh perevezenniakh [Determination of the optimal route speed during the operation of motor vehicles in passenger transportation]. *Visnyk Khersonskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu. Inzhenerni Nauky*, 1(96), 41–49. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.5>
- 36) Dolia, K. V., & Dolia, O. Ye. (2026, April 24). Safety of transport systems. In *Information and operational technologies in shipping: Conference materials* (pp. 65–69). Odesa.
- 37) Dolia, K. V., & Hryhorovych, A. M. (2026, April 24). Integrated decision support system for safe navigation and energy-efficient management of vessel operations in port water areas. In *Information and operational technologies in shipping: Conference materials* (pp. 269–273). Odesa.
- 38) Dolia, K. V., & Kobrina, N. V. (2026, April 24). Intelligent decision support system for early detection of vessel conflict situations in port waters. In *Information and operational technologies in shipping: Conference materials* (pp. 264–268). Odesa.
- 39) Dolia, O. Ye., & Dolia, K. V. (2026). *Doslidzhennia pasazhyrskykh transportnykh korespondentsii* [Research on passenger transport correspondences]. Primedia eLaunch. <https://doi.org/10.46299/979-8-90383-427-3>

Assessment of the reliability of output data for automotive technical examination of a road traffic accidents

Anton Grigorovich

Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: 0000-0001-5388-3159

Konstantin Dolia

Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: 0000-0002-4693-9158

Abstract: This paper addresses the reliability of input data used in forensic traffic accident reconstruction and shows that uncertainty in key parameters (road–tire friction coefficient μ , braking distance/mark length s , time intervals, video measurement scale and frame rate, and electronic event records) is a primary source of instability in expert conclusions. The aim is to develop a practice-oriented framework to (1) formalize measurement and interpretation errors, (2) quantify their effect on typical reconstruction outputs (initial speed, braking and stopping distance, time-to-collision, and the technical possibility to avoid the crash), and (3) report results as intervals or probability distributions rather than single point estimates.

The proposed workflow combines a deterministic physical braking model with probabilistic uncertainty propagation. Input parameters are represented by justified ranges or distributions and propagated through the model using Monte Carlo simulation to obtain distributions of output quantities and relevant quantiles. A sensitivity analysis step is used to rank the most influential inputs and to justify which measurements should be prioritized in on-scene documentation. In addition, the framework includes cross-validation of heterogeneous evidence sources (dashcam/CCTV video and EDR/ACM data) by analyzing the residual speed difference $\Delta v(t)$ and diagnosing systematic biases caused by scale calibration, variable FPS, or time synchronization errors.

A demonstration braking case study confirms that uncertainty in μ typically dominates the overall spread of the estimated speed, while the measurement error of s often provides a secondary contribution. Therefore, improving reconstruction reliability primarily requires better characterization of road surface conditions/friction and rigorous documentation of braking evidence, complemented by consistent digital-data checks. The results support the development of uncertainty “passports”, standardized checklists for data acquisition, and more transparent and reproducible forensic calculations.

Keywords: traffic accident reconstruction; forensic engineering; data reliability; uncertainty; friction coefficient; video measurement; EDR; Monte Carlo simulation; sensitivity analysis.
