

А. А. Кашканова

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЧІТКОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА РЕАЛІЗАЦІЮ ЗЧІПНОЇ ЗДАТНОСТІ ДОРОГИ І ШИНИ

Вінницький національний технічний університет

Задача оцінювання зчипної здатності дороги і шини є однією з найбільш актуальних в автотехнічній експертизі дорожньо-транспортних пригод (ДТП), оскільки результати її розв'язання безпосередньо впливають на оцінювання ефективності гальмування колісних транспортних засобів (ТЗ), як основного способу попередження виникнення аварійних ситуацій на автомобільному транспорті. У разі наявності таких пошкоджень ТЗ, що унеможливають проведення дорожніх випробувань, експерту доводиться використовувати застарілі розрахункові методики. Це сприяє виникненню похибок та збільшує невизначеність даних, на основі яких формуються експертні висновки.

В роботі запропоновано шляхи удосконалення існуючих підходів щодо оцінювання коефіцієнта зчеплення та показників ефективності гальмування ТЗ при автотехнічній експертизі ДТП в умовах наявності композиційної (стохастичної та нечіткої) невизначеності. Аналіз застосування математичних методів в практиці розслідування ДТП показав, що при відсутності можливості використання традиційних математичних методів, які базуються на виявленні точних кількісних взаємозв'язків, для дослідження ДТП в умовах невизначеності доцільно застосовувати наближені методи моделювання, які засновані на нечітких (неперервних) логіках. Здійснено вибір та обґрунтування методу оцінювання зчипних якостей автомобільних шин при дослідженні ДТП в умовах невизначеності на основі використання результатів дослідження ефективності гальмування транспортних засобів категорії М1 в умовах експлуатації та оцінювання інформативності факторів, які впливають на коефіцієнт зчеплення, засобами Fuzzy Logic Toolbox обчислювального середовища Matlab. В результаті чого встановлено, що удосконалення існуючих підходів щодо оцінювання коефіцієнта зчеплення та показників ефективності гальмування ТЗ при автотехнічній експертизі ДТП в умовах наявності композиційної невизначеності можна досягти за рахунок використання простих ANFIS-моделей, які забезпечують кращі узагальнюючі властивості.

Ключові слова: транспортний засіб, зчипна здатність дороги і шини, коефіцієнт зчеплення, сповільнення, гальмівний шлях, композиційна невизначеність, експертиза дорожньо-транспортних пригод.

Вступ

Забезпечення безпеки руху транспортних засобів є актуальною проблемою для багатьох країн світу. Щорічно в результаті дорожньо-транспортних пригод гине близько 1,35 мільйона людей, від 20 до 50 мільйонів отримують травми, а збитки від ДТП обходяться більшості країн у 3 % їхнього валового внутрішнього продукту [1]. Це ставить цілий комплекс завдань, спрямованих на вирішення проблеми аварійності на автомобільному транспорті. Ефективність розв'язання цих завдань значною мірою залежить від точності та об'єктивності методів аналізу ДТП, виявлення причинно-наслідкових зв'язків.

Основним методом попередження ДТП є процес гальмування ТЗ [2, 3, 4]. Ефективність цього процесу залежить від особливостей конструкції та роботи гальмівних систем ТЗ (наявності антиблокувальної системи гальм, системи екстреного гальмування, превентивних систем безпеки тощо) та обмежується величиною сил тертя в контакті шин з дорогою [5, 6, 7].

Існує багато різних методів, засобів і технологій, що застосовуються для оцінювання гальмівних властивостей автомобілів з метою забезпечення роботи систем активної безпеки [8, 9, 10], керування дорожнім рухом [11, 12], удосконалення конструкції доріг [13, 14] чи аналізу аварійних ситуацій [15, 16, 17]. Чинні вимоги [5, 14] визначають критеріями оцінки ефективності гальмування автомобілів при дорожніх випробуваннях гальмівний шлях і усталене сповільнення. Під час розслідування аварійних ситуацій експерт повинен оцінити усталене сповільнення шляхом слідчого експерименту в дорожніх умовах місця події або аналогічних йому, а потім на підставі отриманих даних розрахувати зупинний шлях [18]. У разі наявності таких пошкоджень ТЗ, що унеможливають проведення дорожніх випробувань, експерту доводиться використовувати середньостатистичні значення сповільнення, коефіцієнт зчеплення шин з дорогою або використовувати застарілі розрахункові методики [19]. Це сприяє виникненню похибок та збільшує невизначеність даних, на основі яких формуються експертні висновки.

Невизначеність може мати стохастичну або нечітку природу. При прийнятті рішень стохастична

невизначеність виникає при використанні даних, про які відомі не точні значення, а їх статистичні оцінки. Нечітка невизначеність властива практично будь-якій ситуації експертного оцінювання і може бути об'єктивною, властивою всім реальним величинам чи суб'єктивною, властивою людській природі в цілому, і особливо можливостям людини оцінювати інформацію.

Мета роботи полягає в узагальненні та розвитку існуючих підходів щодо оцінювання коефіцієнта зчеплення та показників ефективності гальмування ТЗ при автотехнічній експертизі ДТП в умовах наявності композиційної (стохастичної та нечіткої) невизначеності.

Результати дослідження

Гальмування транспортних засобів (ТЗ), ефективність якого залежить від реалізації зчіпних властивостей шини з дорожнім покриттям, є основним методом попередження аварійних ситуацій [3, 4, 18]. Показником для оцінювання якості взаємодії шин з дорогою є величина коефіцієнта тертя покою (коефіцієнта зчеплення ϕ), а при заблокованих колесах – коефіцієнта тертя ковзання, який має нижчі показники ніж коефіцієнт зчеплення. Безрозмірна величина ϕ для звичайних дорожніх шин змінюється в діапазоні (0; 1] [5]. Значення ϕ близькі до нуля позначають гладку слизьку поверхню в контакт з шиною з дорогою, що характеризується низькими величинами сил тертя (поздовжніх, поперечних, бічного уводу). Зі збільшенням значень ϕ підвищуються сили тертя, які необхідно подолати або передати.

Зчеплення шини з дорожнім покриттям є наслідком дії великої кількості складних процесів, що відбуваються в зоні контакту шини з дорогою. Воно залежить від великої кількості факторів (рис. 1), основними з яких є: тип і стан дорожнього покриття; конструкція, стан та умови роботи шини [2, 6].



Рис. 1. Фактори впливу на потенціал реалізації зчіпних властивостей коліс автомобіля з дорожнім покриттям

Результуюча сила, що передається шиною на дорогу, є векторною сумою поперечних та поздовжніх сил (рис. 2). Вона збільшується зі зростанням зчіпної здатності в зоні контакту дороги і шини або нормального навантаження на колесо [5, 6].

Величину коефіцієнта зчеплення при аналізі ДТП можна визначити одним з трьох способів [4, 10, 18]:

- на основі інформації електронних систем керування, безпеки і комфорту ТЗ;
- експериментальним шляхом;
- за довідковими даними експериментально-розрахункових значень.

Перший спосіб є достатньо новим. Обмеженням його широкого використання є те, що встановлення параметрів руху записаних на основі інформації електронних систем ТЗ бортовими реєстраторами даних про події (EDR), можливо за наявності таких систем в конструкції ТЗ. Відсоток таких ТЗ у світовому парку автомобілів досить малий, але має тенденцію до збільшення з кожним роком [21, 22].

Інструкція з передової практики реконструкції обставин ДТП Європейської мережі установ судової експертизи [18] рекомендує для оцінювання взаємодії шин з дорогою виконувати слідчий експеримент в дорожніх умовах місця події або аналогічних йому. При цьому, експериментально визначають коефіцієнт зчеплення або гальмівний шлях чи сповільнення, значення яких характеризують процеси тертя в контакт з шиною з дорогою. Однак, використання цього способу не завжди є можливим в силу дії низької об'єктивних причин [4].

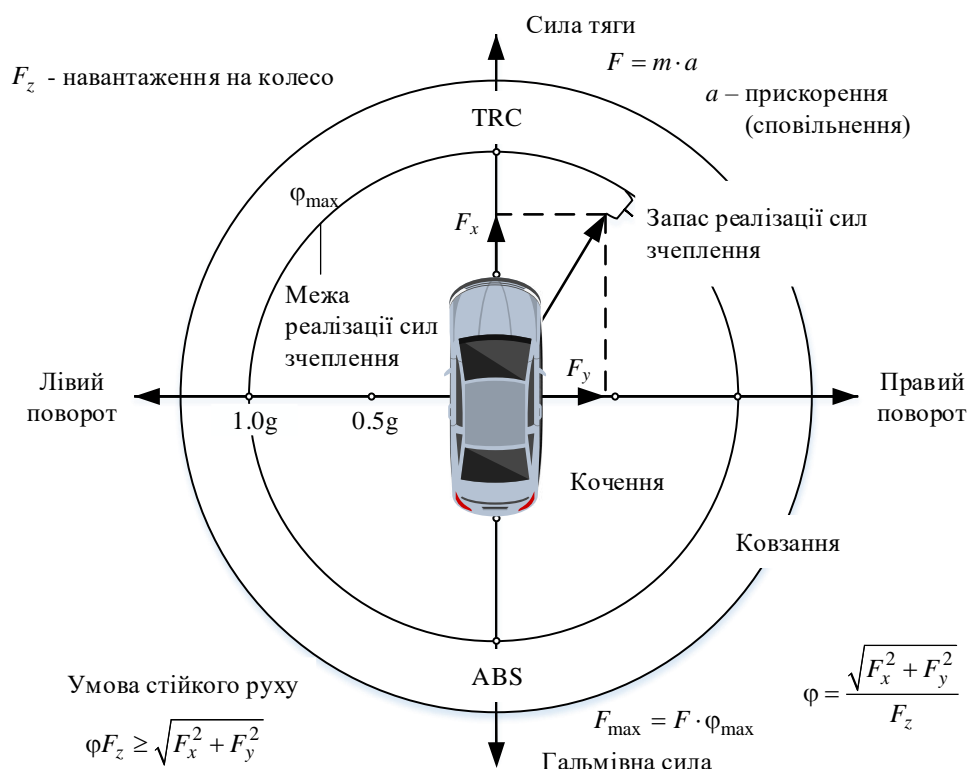


Рис. 2. Сили, що діють на шину в колі Камма

У випадку коли проведення експерименту неможливе, величина коефіцієнта зчеплення, сповільнення та гальмівного шляху може бути визначена за довідковими даними експериментально-розрахункових значень [18] або прийнята як нормативна, встановлена Правилами дорожнього руху та нормативним документом Council Directive 71/320/ЕЕС. Визначення параметрів ефективності гальмування можливе розрахунковим шляхом за відомими в експертній практиці формулами [3, 19], отриманими на основі математичних моделей системи «водій – автомобіль – дорога – середовище» (ВАДС).

При використанні математичних моделей системи ВАДС невизначеність значень розрахункових параметрів залежить від точності визначення вхідних параметрів та прийнятої структури моделі, яка є лише наближенням реальності. При використанні записів EDR, невизначеність значень розрахункових параметрів може бути результатом помилок вимірювання значень, що характеризують рух автомобіля та помилок в результаті обробки записаних даних. Точність експериментальних методів залежить від методики проведення випробувань, використовуваної апаратури та якості обробки результатів вимірювань [23, 24].

Аналіз застосування математичних методів в практиці розслідування ДТП, виконаний в роботі [15], показав, що при відсутності можливості використання традиційних математичних методів, які базуються на виявленні точних кількісних взаємозв'язків, для дослідження ДТП в умовах невизначеності доцільно застосовувати наближені методи моделювання, які засновані на нечітких (неперервних) логіках.

Роботи [2, 7, 27], основані на визначенні коефіцієнта зчеплення за допомогою апарату теорії нечітких множин [26], значною мірою сприяли уточненню його визначення в конкретних умовах експлуатації. Серед факторів впливу на коефіцієнт зчеплення найбільш впливовими можна визнати [2, 3, 5–8, 10, 13, 27]: тип і стан дорожнього покриття; швидкість автомобіля при гальмуванні; навантаження на колесо; ступінь проковзування шини; зношеність шини; тиск в шині. Таким чином, задача знаходження коефіцієнта зчеплення зводиться до пошуку багатофакторної залежності.

Оцінювання коефіцієнта зчеплення виконувалось на базі методу ідентифікації нелінійних об'єктів нечіткими базами знань [26] в нейро-нечіткому редакторі Anfis [28] пакета Fuzzy Logic Toolbox обчислювального середовища Matlab [29]. Математичні моделі будувались в два етапи (рис. 3): структурна ідентифікація; параметрична ідентифікація.

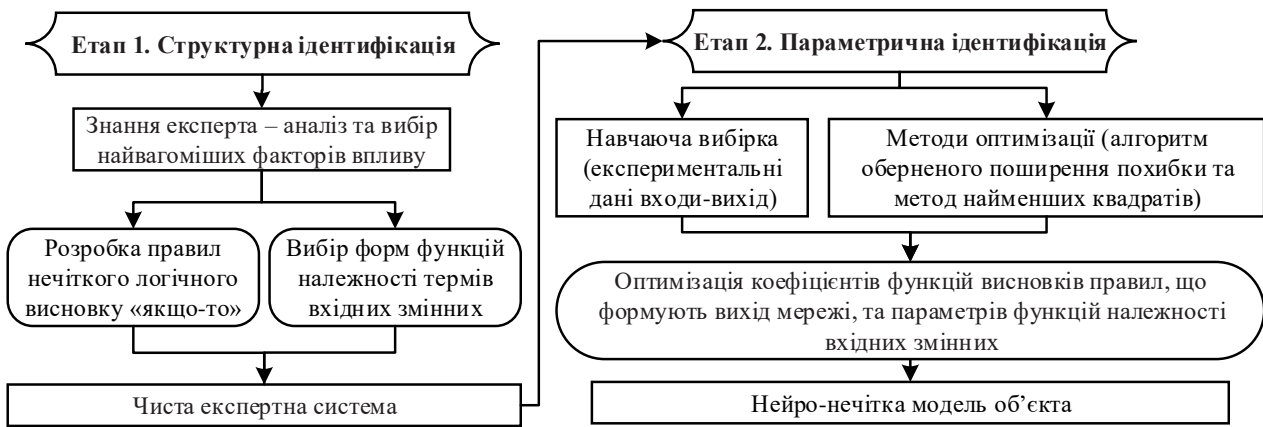


Рис. 3. Етапи налаштування системи оцінювання коефіцієнта зчеплення

На етапі структурної ідентифікації формувалась структура залежності коефіцієнта зчеплення від факторів впливу на основі правил «якщо-то». Параметрична ідентифікація проводилась шляхом підбору таких параметрів бази знань, які б забезпечували максимальну наближеність результатів моделювання та експериментальних даних. Як видно з рис. 4, нейро-нечітка мережа залежності складається з п'яти шарів.

Кожен вузол першого шару являє собою один терм з гауссовою функцією належності [30]

$$\mu_j(x_i) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - c_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)^2\right), \quad (1)$$

де $\mu_j(x_i)$ – функція належності нечіткої множини a_{ij} ; c_{ij} та σ_{ij} – координата максимуму та коефіцієнт концентрації – параметри функції належності.

Кількість вузлів другого шару дорівнює кількості правил нечіткої бази знань Сугено [29]. Кожен вузол другого шару з'єднаний з такими вузлами першого шару, які утворюють антецеденти відповідного правила. Виходом вузла є ступінь виконання вкладеного в ньому правила τ_r , що дорівнює добутку вхідних сигналів.

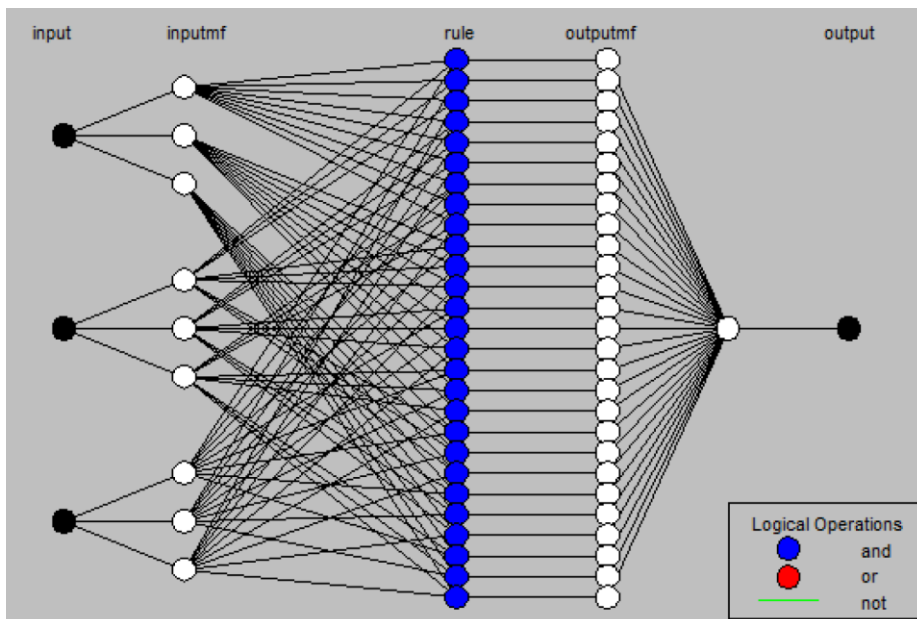


Рис. 4. Приклад нейро-нечіткої мережі сформованої в редакторі ANFIS

Усі вузли третього шару визначають відносну ступінь виконання відповідного нечіткого правила τ_r^* (залежність (2)). У вузлах четвертого шару визначаються вклади нечітких правил у вихід мережі ϕ .

$$\varphi_r = \tau_r \cdot (b_{0,r} + b_{1,r} \cdot jq + b_{2,r} \cdot N + b_{3,r} \cdot V + b_{4,r} \cdot BS), \quad (2)$$

де $b_{q,r}$ – коефіцієнти функції консеквентів r -го правила ($r = 1, 2, \dots, m; q = 0, 1, 2, 3, 4$).

Єдиний вузол п'ятого шару агрегує вклади всіх правил

$$\varphi = \varphi_1 + \dots + \varphi_j + \dots + \varphi_m. \quad (3)$$

Всі фактори впливу на коефіцієнт зчеплення (табл. 1) розглядаються як лінгвістичні змінні, що визначені на відповідних універсальних множинах і оцінюються за допомогою нечітких термів.

Рекомендації для оцінки інтегрального показника «шини – дорога» jq надані в [27].

Правила нечіткого логічного висновку «якщо-то» були сформовані в нейро-нечіткому редакторі ANFIS обчислювального середовища Matlab в автоматичному режимі.

В загальному випадку алгоритм визначення коефіцієнта зчеплення зводиться до виконання таких кроків:

1. Визначення типу і стану дорожнього покриття, типу шин.
2. Оцінювання величини інтегрального показника «шини – дорога» Q на основі рекомендацій, представлених у додатку 1.
3. Оцінювання остаточної висоти протектора шин за якою встановлюється відсоток їх зношення.
4. Заміряємо тиск в шинах.
5. Виходячи з технічної характеристики ТЗ встановлюємо конструктивні особливості його гальмівної системи та аналізуємо сліди гальмування (з метою визначення ступеня проковзування шин).
6. Встановлюємо навантаження на колесо.
7. Визначаємо величину початкової швидкості гальмування, км/год.
8. На основі залежностей (1)–(3) виконуємо моделювання за допомогою розробленої нейронечіткої системи оцінювання коефіцієнта зчеплення коліс автомобіля з дорожнім покриттям у середовищі Matlab.

Даний алгоритм може скорочуватися у разі обґрунтованого використання неповного переліку обраних факторів та за умови забезпечення необхідної точності моделювання.

Таблиця 1

Фактори впливу на коефіцієнт зчеплення [27]

Фактор	Універсальна множина	Терми для оцінок
Q – інтегральний показник «тип шин – дорога» (integrated indicator "type of tires - road")	(0–9) у. о.	низький (Q_1), нижчий середнього (Q_2), середній (Q_3), вищий середнього (Q_4), високий (Q_5)
S – ступінь проковзування шини (slippage)	(0–100) %	кочення з проковзуванням (S_1), юз (S_2)
H – зношеність шини (wear)	(0–100) %	нова (H_1), в межах допустимого (H_2), зношена (H_3)
P – тиск в шині (pressure)	(50–150) %	понижений (P_1), нормальний (P_2), підвищений (P_3)
N – навантаження на колесо (load)	(0–100) %	без навантаження (N_1), середнє (N_2), повне (N_3)
V – швидкість автомобіля (car speed)	(0–130) км/год	низька (V_1), нижча середньої (V_2), середня (V_3), вища середньої (V_4), висока (V_5)

Експериментальне дослідження ефективності гальмування транспортних засобів категорії М1 в умовах експлуатації здійснювалось з метою отримання статистичного матеріалу, необхідного для перевірки адекватності запропонованих математичних моделей та підтвердження висунутих

теоретичних положень.

Експериментальні дослідження проводились у такій послідовності:

- обґрунтування переліку вимірюваних показників;
- вибір обладнання та вимірювальної апаратури;
- вибір режимів випробувань в дорожніх умовах;
- вимірювання обраних показників.

Обрані показники за видами випробувань та відповідна вимірювальна апаратура представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Досліджувані показники та засоби їх вимірювання

Вид випробування	Показники, що підлягали фіксації	Вимірювальна апаратура та допоміжні засоби
Інерційне оцінювання взаємодії автомобільних шин з дорогою при екстремому гальмуванні ТЗ	Тип і стан дорожнього покриття, тип і стан шин, тиск в шині, навантаження на колесо, початкова швидкість гальмування ТЗ, конструкція гальмівної системи ТЗ (наявність ABS, ВА), усталене сповільнення ТЗ, наявні сліди гальмування	Деселерометри МАНА VZM 100, МАНА VZM 300

Отримані результати вимірювання сповільнення ТЗ (рис. 5) при екстремому гальмуванні разом з експериментальними даними [27] було об'єднано в одну базу, яка має характеристики подані в табл. 3.



Рис. 5. Два з багатьох ТЗ, що були задіяні у випробуваннях ефективності гальмівних систем

База даних, отримана за результатами натурних експериментальних досліджень (фрагмент)

№	φ	Q	S	H	P	N	V
1	0,69	6,15	20	62	0,2	15	20
2	0,45	4,45	100	65	0,2	15	60
3	0,47	4,7	100	65	0,18	20	100
4	0,23	0,9	60	10	0,14	100	20
5	0,42	3,7	64	95	0,25	45	72
6	0,82	7,9	34	21	0,27	17	15
7	0,81	8,1	67	72	0,25	20	58
...
39	0,57	5	37	15	0,18	17	25
40	0,39	2,8	30	95	0,24	35	60
...
63	0,3	1,7	35	30	0,16	74	34
64	0,87	8,23	25	10	0,18	10	55

Оцінювання інформативності факторів, які впливають на коефіцієнт зчеплення, здійснювалось засобами Fuzzy Logic Toolbox середовища Matlab. Застосування ANFIS для прогнозування величини коефіцієнта зчеплення дозволяє використати засоби теорії нечітких множин та нейронних мереж [26, 28–30] для розв'язання типової задачі нелінійного регресійного аналізу. Прогнозування здійснювалось за параметрами, представленими в табл. 1. Експериментальні дані (табл. 3) були записані у файл та розділені на навчальну та тестову вибірки. Вибір найкращого набору вхідних змінних здійснювався за допомогою функції exhsrch [29]. З метою скорочення часу перебору можливих варіантів, нечіткі моделі з різними входами навчались за одну ітерацію ANFIS-алгоритма.

Спочатку була виконана процедура оцінювання інформативності параметрів впливу на коефіцієнт зчеплення на основі грубих моделей «вхід-вихід». Результати тестування 6 нечітких моделей подані на рис. 6.

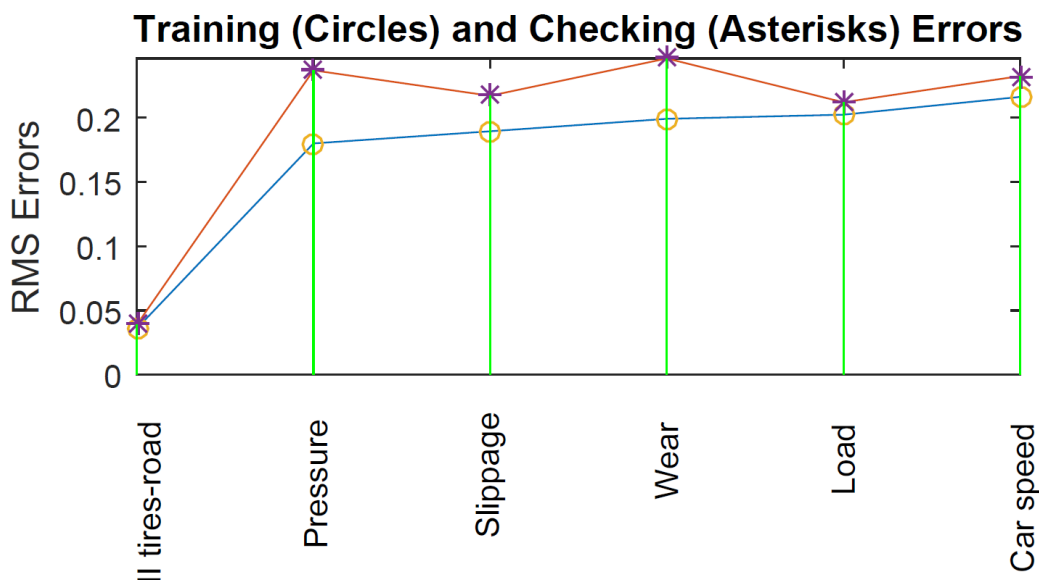


Рис. 6. Результати тестування шести однофакторних нечітких моделей оцінювання коефіцієнта зчеплення

Значення нев'язки RMSE (Root Mean Squared Error) на навчальній та тестовій вибірках позначені відповідно кружечками та зірочками. Як видно з графіка (рис. 6), найбільш інформативною ознакою є інтегральний показник «тип шин – дорога», а другим за рангом – тиск. Нев'язки на навчальній та тестовій вибірках одного порядку, тому можна додати в модель ще одну вхідну змінну. Інтуїтивно можна було б обрати зазначені вище дві змінні, оскільки для них значення похибок навчання мінімальні. Проте такий директивний підхід не гарантує, що обрана ANFIS-модель з двома входами забезпечить максимальну точність прогнозування.

Результати оцінювання інформативності 15 пар вхідних змінних подані на рис. 7.

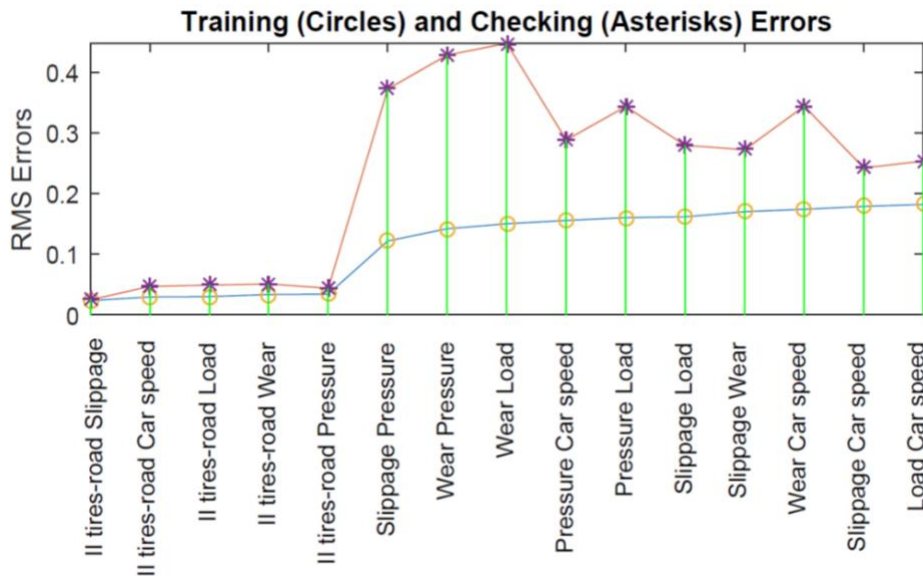


Рис. 7. Результати тестування п'ятнадцяти двофакторних нечітких моделей оцінювання коефіцієнта зчеплення

Як видно з рис. 7, найбільш інформативною парою ознак «вхід-вихід» є інтегральний показник «тип шин – дорога» та ступінь проковзування шини. Також не погані результати, але з дещо більшою похибкою дають пари інтегрального показника «тип шин – дорога» з швидкістю автомобіля, навантаженням на колесо, зношеністю шини та тиском в шині. Далі різниця на навчальній і тестовій вибірках значно зростає, що говорить про наближення ефекту переускладнення моделі.

Результати оцінювання інформативності трійок вхідних змінних при тестуванні 20 синтезованих моделей «три входи – вихід» подані на рис. 8.

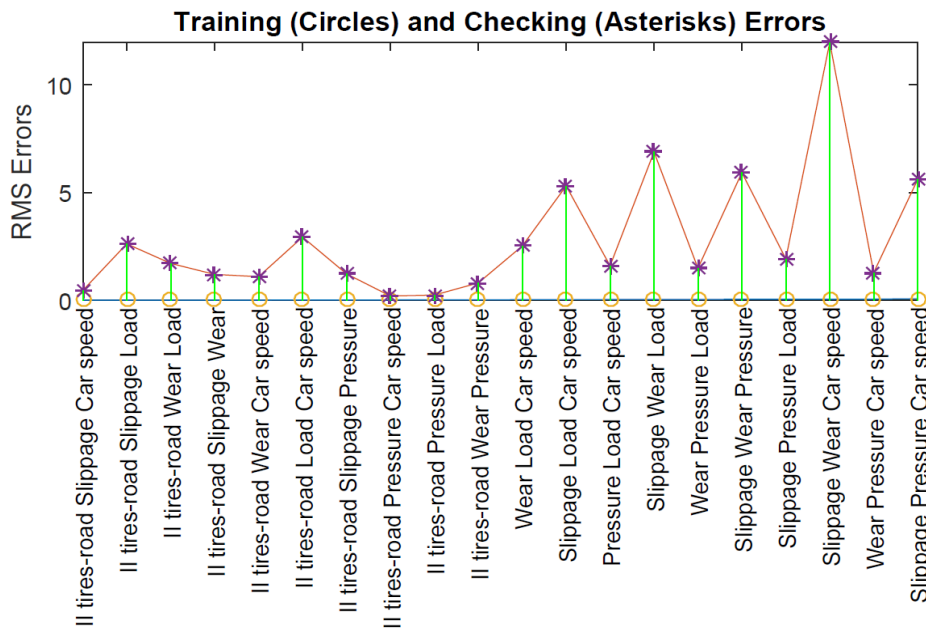


Рис. 8. Результати тестування двадцяти трифакторних нечітких моделей оцінювання коефіцієнта зчеплення

Найкраще прогнозування забезпечує модель з такими вхідними параметрами: інтегральний показник «тип шин – дорога», ступінь проковзування шини та початкова швидкість гальмування автомобіля. Мінімальні нев'язки на навчальній та тестовій вибірках суттєво не зменшились порівняно з найкращою моделлю «два входи – вихід». Це означає, що додавання ще однієї вхідної змінної до пари інтегральний показник «тип шин – дорога» та ступінь проковзування шини не дуже підвищить точність прогнозування величини коефіцієнта зчеплення. З метою забезпечення кращих узагальнюючих властивостей надається перевага використанню більш простих моделей, тому для подальших досліджень обирається модель «два входи – один вихід».

Для кращої ANFIS-моделі «два входи – один вихід» («тип шин – дорога», ступінь проковзування

шини – коефіцієнт зчеплення) значення RMSE на навчальній та тестовій вибірках дорівнює 0,0231 та 0,0243 відповідно. Для порівняння, звичайна лінійна модель, яка враховує вплив усіх обраних факторів (див. табл. 1), забезпечує значення RMSE 0,0324 та 0,0347 на навчальній та тестовій вибірках відповідно. Результати навчання обраної двофакторної моделі подані на рис. 9.



Рис. 9. ANFIS-навчання та контроль помилок

На попередніх етапах моделі-кандидати навчались за допомогою функції *exhsrch* [29] лише протягом однієї ітерації ANFIS-алгоритму. Це було зроблено для швидкого вибору доцільної множини вхідних змінних. Тепер, коли вхідні змінні обрані, можна витратити більше часу для навчання. Рис. 9 ілюструє динаміку навчання нечіткої моделі у вигляді залежностей помилок навчання (нижня крива) та помилок тестування (верхня крива) від кількості ітерацій алгоритму. Мінімум похибки тестування досягається на 78 ітерації алгоритму. Потім похибка тестування зростає, що вказує на ефект перенавчання, тобто на втрату моделлю властивостей узагальнення. Точка мінімуму відмічена на графіку кружечком.

На рис. 10 подана поверхня «входи – вихід» нечіткої моделі з мінімальною похибкою тестування. Для цієї моделі похибки на навчальній та тестовій вибірках дорівнюють 0,0176 та 0,02 відповідно.

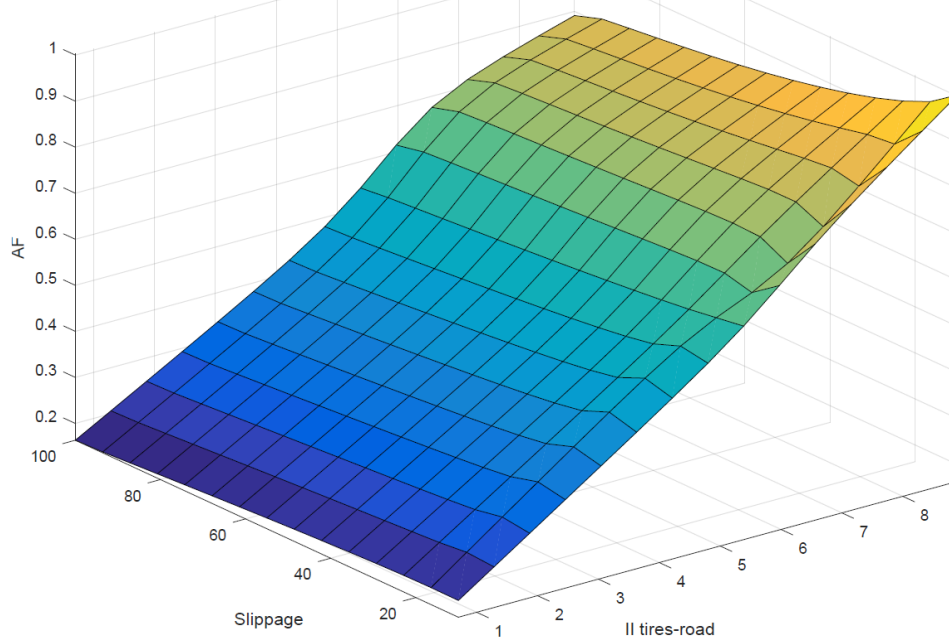


Рис. 10. Поверхня «входи – вихід» нечіткої моделі після навчання

При розгляді правого ближнього кута поверхні (рис. 10) виявляється парадоксальний ефект – максимум коефіцієнта зчеплення спостерігається при значеннях ступеня проковзування шини близьких до нуля. Така неочікувана поведінка моделі спостерігається внаслідок відсутності в навчальній вибірці даних в цій області факторного простору, що можна побачити на рис. 11.

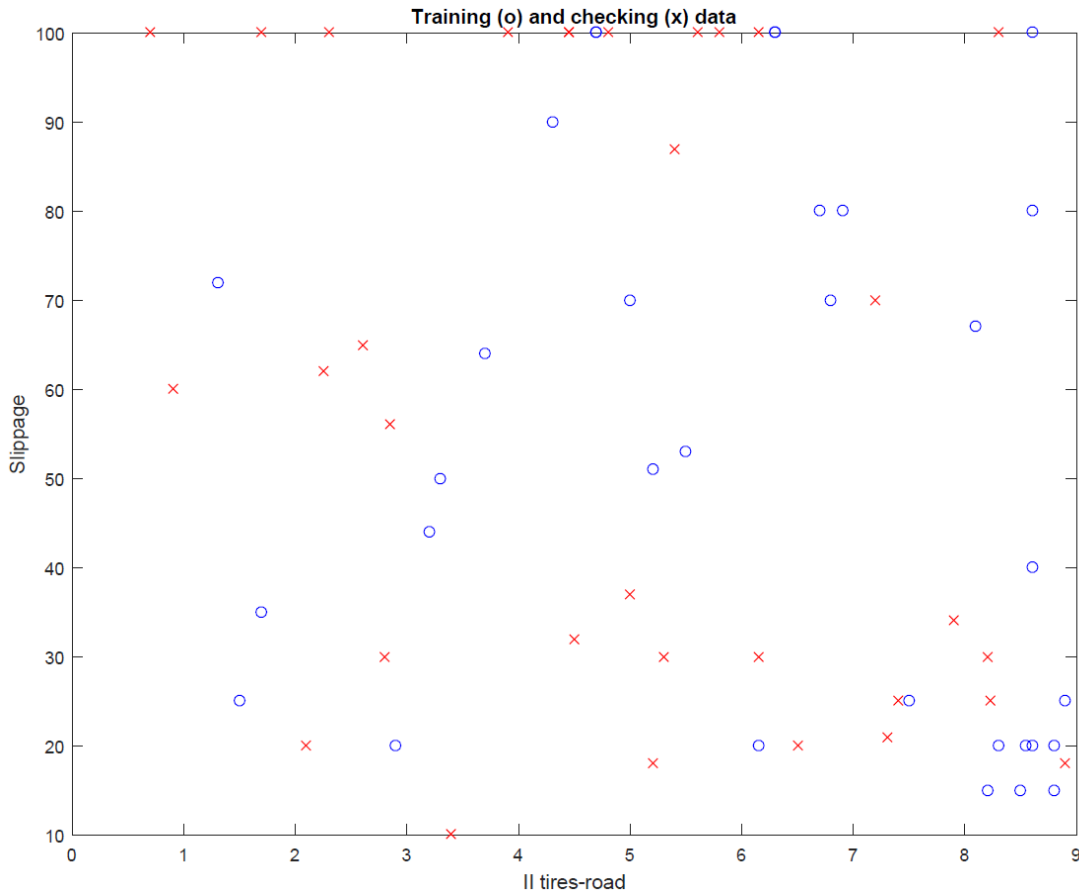


Рис. 11. Навчальна (кружечки) та тестова (хрестики) вибірки

Для застосування результатів виконаного дослідження на практиці при дослідженні ДТП потрібно вдосконалити існуючий протокол огляду місця ДТП, шляхом введення додаткових граф з факторами впливу на коефіцієнт зчеплення для обов'язкового заповнення на місці ДТП співробітником поліції, при відсутності детермінованих значень, потрібно надати якісний опис параметрів конкретного фактора (див. табл. 1). На базі початкових даних удосконаленого протоколу огляду місця ДТП проводити розрахунок коефіцієнта зчеплення для конкретної дорожньої обстановки з використанням розробленої експертної системи за спрощеним алгоритмом.

Висновки

При вирішенні задач автотехнічної експертизи ДТП прийняття рішень відбувається в умовах неповноти інформації, тобто в умовах невизначеності. В процесі прийняття рішень виникають різні види невизначеності в залежності від причин її появи: кількісна, інформаційна, вартісна, професійна, обмежувальна, зовнішнього середовища. Крім того, невизначеність може мати стохастичну або нечітку природу. Аналіз застосування математичних методів в практиці розслідування ДТП показав, що при відсутності можливості використання традиційних математичних методів, які базуються на виявленні точних кількісних взаємозв'язків, для дослідження ДТП в умовах невизначеності доцільно застосовувати наближені методи моделювання, які засновані на нечітких (неперервних) логіках.

На основі сформованої експериментальної бази даних щодо дослідження ефективності гальмування транспортних засобів категорії М1 в умовах експлуатації було проведено оцінювання інформативності факторів, які впливають на коефіцієнт зчеплення, засобами Fuzzy Logic Toolbox обчислювального середовища Matlab. В результаті чого встановлено, що удосконалення існуючих підходів щодо оцінювання коефіцієнта зчеплення та показників ефективності гальмування транспортних засобів при автотехнічній експертизі ДТП в умовах наявності композиційної (стохастичної та нечіткої) невизначеності можна досягти за рахунок використання простих ANFIS-моделей, які забезпечують

кращі узагальнюючі властивості. Саме тому для подальшого навчання була обрана модель «два входи – один вихід», яка дозволяє прогнозувати величину коефіцієнта зчеплення з похибкою в межах 2 %. Однак, слід пам'ятати, що моделі, синтезовані за допомогою ANFIS або за допомогою іншої технології автоматичного навчання, можуть адекватно описувати лише закономірності, представлені репрезентативними вибірками даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] World Health Organization. Road traffic injuries. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs358/en/>.
- [2] *Совершенствование методов автотехнической экспертизы при дорожно-транспортных происшествиях*: монографія / [В. П. Волков, В. Н. Торлин, В. М. Мищенко, А. А. Кашканов, В. А. Кашканов, В. П. Кужель, В. А. Ксенофонтова, А. А. Ветрогон, Н. В. Скляр]. Харьков: ХНАДУ, 2010, 476 с.
- [3] А. М. Туренко, В. І. Клименко, О. В. Сарасв, С. В. Данець, *Автотехнічна експертиза. Дослідження обставин ДТП*. Харків: ХНАДУ, 2013, 320 с.
- [4] D. Struble, *Automotive accident reconstruction: practices and principles*. Boca Raton: CRC Press, 2013, 498 p.
- [5] *Bosch Automotive Handbook*. 9th Edition. / [Reif K., Dietsche K.-H. & others]. Karlsruhe : Robert Bosch GmbH, 2014, 1544 p.
- [6] Pacejka Hans B. *Tyre and vehicle dynamics*. 3rd Ed. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2012, 629 p.
- [7] A. A. Kashkanov, A. P. Rotshtein, V. Yu. Kucheruk, V. A. Kashkanov, «Tyre-Road friction Coefficient: Estimation Adaptive System», *Bulletin of the Karaganda University. «Physics» series*, № 2(98), pp. 50-59, 2020. Doi: 10.31489/2020Ph2/50-59.
- [8] K.B. Singh, M. Ali Arat, S. Taheri, “An Intelligent Tire Based Tire-Road Friction Estimation Technique and Adaptive Wheel Slip Controller for Antilock Brake System”, *ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control*, no. 135(3), pp. 031002-031002-26, 2013. Doi:10.1115/1.4007704.
- [9] J. Breuer, A. Faulhaber, P. Frank and S. Gleissner, “Real world safety benefits of brake assistance systems”, in *Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2007,-no. 07-0103.
- [10] Kanwar Bharat Singh & Saied Taheri, “Estimation of tire-road friction coefficient and its application in chassis control systems”, *Systems Science & Control Engineering*, no. 3:1, pp. 39-61, 2015. Doi: 10.1080/21642583.2014.985804.
- [11] C. Laugier, I. E. Paromtchik, M. Perrollaz, J.-D. Yoder, C. Tay, M. Yong, A. Nègre, K. Mekhnacha, “Probabilistic analysis of dynamic scenes and collision risks assessment to improve driving safety”, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, no. 3, pp. 4-19, 2011.
- [12] R. Zhang, L. Cao, S. Bao, J. Tan, “A method for connected vehicle trajectory prediction and collision warning algorithm based on V2V communication”, *International Journal of Crashworthiness*, vol. 22, no. 1, pp. 15-25, 2017.
- [13] В. П. Волков, Г. Б. Вільський, *Теорія руху автомобіля*. Суми: Університетська книга, 2010, 320 с.
- [14] AASHTO Green Book, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, 7th Edition, 2018, 1047 p.
- [15] А. А. Кашканов, «Математичні методи обґрунтування рішень в автотехнічній експертизі дорожньо-транспортних пригод», *Автомобільний транспорт*, № 43, с. 78-89, 2018. Doi: 10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.78.
- [16] H. Franck, D. Franck, *Mathematical methods for accident reconstruction: a forensic engineering perspective*. Boca Raton: CRC Press, 2009, 328 p.
- [17] А. А. Кашканов, В. А. Кашканов, А. А. Кашканова, «Моделювання траєкторії руху автомобіля при дослідженні ДТП», *Вісник машинобудування та транспорту*, № 1(9), с. 53-65, 2019. Doi: 10.31649/2413-4503-2019-9-1-53-65.
- [18] European Network of Forensic Science Institutes. *Best Practice Manual for Road Accident Reconstruction, ENFSI, ENFSI-BPM-RAA-01. Version 01 - November 2015*. URL: http://enfsi.eu/wp-content/uploads/2016/09/4._road_accident_reconstruction_0.pdf.
- [19] О. М. Сумець, В. Ф. Голодний, *Основи експертизи дорожньо-транспортних пригод: автотехнічна експертиза*. К.: Хай-Тек Прес, 2008, 160 с.
- [20] L. Rieger, J. Scheef, H. Becker, M. Stanzel and R. Zobel, “Active safety systems change accident environment of vehicles significantly – a challenge for vehicle design”, in *Nineteenth International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Washington, 2005, pp. 05-0074.
- [21] Marco P daSilva, *Analysis of Event Data Recorder Data for Vehicle Safety Improvement*. URL: <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/EDR/Research/811015.pdf>.
- [22] D. Hynd, M. McCarthy, *Study on the benefits resulting from the installation of Event Data Recorders*. URL: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/docs/study_edr_2014.pdf.
- [23] W. Wach, J. Unarski, “Uncertainty of calculation results in vehicle collision analysis”, *Forensic Science International*, vol. 167(2), pp. 181–188, 2007. Doi: 10.1016/j.forsciint.2006.06.061.
- [24] А. А. Кашканов, «Методика оцінювання і зменшення невизначеності в задачах автотехнічної експертизи дорожньо-транспортних пригод», *Вісник машинобудування та транспорту*, № 1(11), с. 71-78, 2020. Doi: 10.31649/2413-4503-2020-11-1-71-78.
- [25] В. М. Дубовой, О. О. Ковалюк, *Моделі прийняття рішень в управлінні розподіленими динамічними системами*. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2008, 185 с.
- [26] A. Rotshtein, H. Rakytyanska, *Fuzzy Evidence in Identification, Forecasting and Diagnosis*. Berlin: Springer, 2012, 313 p. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25786-5>.
- [27] В. А. Кашканов, В. М. Ребедайло, А. А. Кашканов, В. П. Кужель, *Інтелектуальна технологія ідентифікації коефіцієнта зчеплення при автотехнічній експертизі ДТП*. Вінниця: ВНТУ, 2011, 128 с.
- [28] J.-S. R. Jang, «ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665-685, May 1993.
- [29] H. Andy, *Register. A Guide to MATLAB Object-Oriented Programming*. Chapman and Hall/CRC, 2007, 384 p.
- [30] Ю. П. Зайченко, *Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах*. Киев: Слово, 2008, 344 с.

Кашканова Анастасія Андріївна – магістрант кафедри автомобілів і транспортного менеджменту, e-mail: kashkanov9a@gmail.com

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

A. Kashkanova

The use of a fuzzy neural network to determine the information content of factors affecting the implementation of the grip properties of a road with a tire

Vinnitsia National Technical University

The task of assessing the traction of the road and tires is one of the most relevant in the technical examination of road accidents, as the results of its solution directly affect the assessment of the effectiveness of braking of wheeled vehicles, as the main method of preventing road accidents on motor transport. In the presence of such damage to the vehicle, which makes it impossible to conduct road tests, the expert has to use outdated calculation methods. This contributes to errors and increases the uncertainty of the data on which expert opinions are formed.

The paper proposes ways to improve existing approaches to estimating the adhesion factor and indicators of braking efficiency of vehicles in the automotive examination of accidents in the presence of compositional (stochastic and fuzzy) uncertainty. Analysis of the use of mathematical methods in the practice of accident investigation showed that in the absence of the possibility of using traditional mathematical methods based on the detection of accurate quantitative relationships, to study accidents in uncertainty, it is advisable to use approximate modeling methods based on fuzzy (continuous) logics. The results of the study of the braking efficiency of vehicles of category M1 in operating conditions and the results of the evaluation of the informativeness of the factors influencing the adhesion factor, using the Fuzzy Logic Toolbox of the Matlab computing environment were used to the choice and substantiation of the method of estimating the coupling qualities of car tires in the study of road accidents in conditions of uncertainty. As a result, it was found that the improvement of existing approaches to estimating the adhesion factor and efficiency of vehicle braking in autotechnical examination of road accidents in the presence of compositional uncertainty can be achieved through the use of simple ANFIS models that provide better generalizing properties.

Keywords: vehicle, traction of road and tires, adhesion factor, deceleration, braking distance, compositional uncertainty, examination of road accidents.

Kashkanova Anastasia – a graduate student of the Department of Automobile and Transport, e-mail: kashkanov9a@gmail.com