

ВИБІР І ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ
ЗЧІПНИХ ЯКОСТЕЙ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ
ДОРОЖНЬО-ТРАНСПОРТНОЇ ПРИГОДИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ПОТЕНЦІАЛ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗЧІПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОЛІС АВТОМОБІЛЯ З ДОРОЖНІМ ПОКРИТТЯМ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАЛЬМУВАННЯ	4
1.1 Результати аналізу розвитку конструкції гальмівних систем автомобілів категорії М1	4
1.2 Фактори, що визначають якість взаємодії автомобільних шин з дорогою та ефективність процесу гальмування	5
2 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ УДОСКОНАЛЕННЯ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЗЧЕПЛЕННЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	9
2.1 Вибір переліку впливових факторів та математичних методів для оцінювання коефіцієнта зчеплення	9
2.2 Методика ідентифікації та побудови структури математичних моделей оцінювання коефіцієнта зчеплення	11
2.3 Загальний алгоритм моделювання величини коефіцієнта зчеплення, що реалізується в умовах експлуатації	15
3 МОДЕЛЮВАННЯ ВЕЛИЧИН КОЕФІЦІЄНТА ЗЧЕПЛЕННЯ В ОБЧИСЛЮВАЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MATLAB	16
3.1 Експериментальне дослідження ефективності гальмування транспортних засобів категорії М1 в умовах експлуатації та формування вихідних даних для моделювання	16
3.2 Оцінювання інформативності факторів, які впливають на коефіцієнт зчеплення, засобами Fuzzy Logic Toolbox	19
3.3 Навчання та аналіз параметрів оптимальної ANFIS-моделі	22
ВИСНОВКИ	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	27
ДОДАТКИ	30

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% їх 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 даного 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.

1 ПОТЕНЦІАЛ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗЧІПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОЛІС АВТОМОБІЛЯ З ДОРОЖНІМ ПОКРИТТЯМ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАЛЬМУВАННЯ

1.1 Результати аналізу розвитку конструкції гальмівних систем автомобілів категорії M1

Історія впровадження систем зменшення гальмівного шляху автомобілів розпочалась з антиблокувальної системи гальм (ABS), основним призначенням якої є запобігання блокуванню коліс під час гальмування, збереження курсової стійкості автомобіля та керованості. З 2004 року ABS є частиною стандартної комплектації усіх нових автомобілів, що продаються у Євросоюзі [3, 5]. В сучасних автомобілях ABS як правило є частиною більш складної електронної системи гальмування, в склад якої також можуть входити: система розподілу гальмівних зусиль, система електронного контролю стійкості, система екстреного гальмування.

Основним призначенням системи розподілу гальмівних зусиль (EBD) є попередження блокування задніх коліс шляхом керування гальмівним зусиллям задньої осі. Вона працює на компонентній базі ABS і припиняє свою роботу з початком блокування ведучих коліс.

Система електронного контролю стійкості (ESP) є системою активної безпеки високого рівня, яка призначена для динамічної стабілізації автомобіля в критичних ситуаціях. ESP включає в себе ABS, EBD, систему електронного блокування диференціала (EDS) та систему запобігання буксуванню (ASR). З 2011 року ESP є частиною стандартної комплектації усіх нових легкових автомобілів, що продаються у Євросоюзі, США та Канаді [5, 14].

Система екстреного гальмування – це адаптивна система призначена для підвищення ефективності використання водієм робочої гальмівної системи в екстремій ситуації. Застосування систем екстреного гальмування може бути вирішальним фактором для попередження ДТП чи зменшення її наслідків за

рахунок скорочення гальмівного шляху автомобіля на 15-45% [9, 20]. Існує два види систем екстреного гальмування: система допомоги при екстреному гальмуванні (ВА), яка дозволяє реалізувати максимальне гальмівне зусилля у разі натиснення водієм на важіль гальма, та система автоматичного екстреного гальмування, яка створює часткове чи максимальне гальмівне зусилля без участі водія. В системах автоматичного екстреного гальмування крім основної реалізується ряд інших функцій шляхом поєднання роботи систем активної і пасивної безпеки автомобіля, що перетворює їх у так звані превентивні (попереджувачі) системи безпеки.

Якою б досконалою не була гальмівна система сучасних автомобілів, її можливості обмежені якістю взаємодії автомобільних шин з дорогою.

1.2 Фактори, що визначають якість взаємодії автомобільних шин з дорогою та ефективність процесу гальмування

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 контактi шини 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].

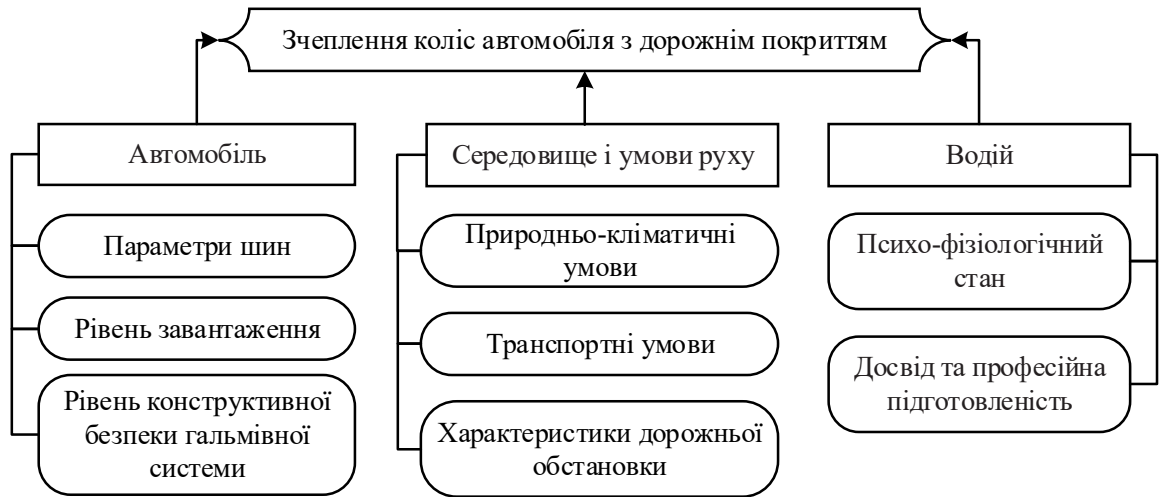


Рисунок 1.1 – Фактори впливу на потенціал реалізації зчіпних властивостей коліс автомобіля з дорожнім покриттям

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].

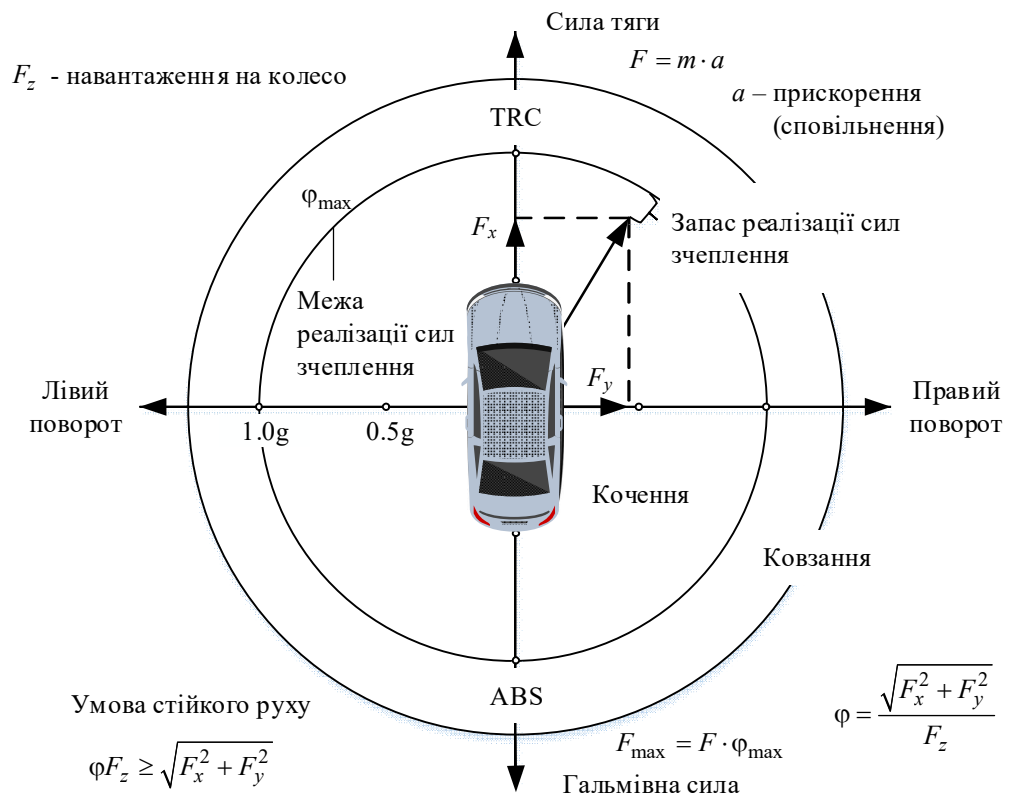


Рисунок 1.2 – Сили, що діють на шину в колі Камма

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 експерименту 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 контакті шин з дорогою. Однак, використання цього способу не завжди є можливим в силу дії ряду об'єктивних причин [4].

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].

2. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ УДОСКОНАЛЕННЯ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЗЧЕПЛЕННЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

2.1 Вибір переліку впливових факторів та математичних методів для оцінювання коефіцієнта зчеплення

В спеціальній дорожній та автомобільній літературі опубліковано багато даних, що характеризують коефіцієнт зчеплення шини з дорогою, який визначає межу гальмівних властивостей автомобіля. Відомо, що цей коефіцієнт може змінюватися приблизно у 10 разів від значення, близького до 1 на шорсткуватій поверхні, до 0,1 і менше на зледенілій поверхні.

Необхідно відзначити, що величини коефіцієнтів зчеплення, які вказуються в різних джерелах для одного і того ж типу дорожнього покриття, часто відмінні. Це пояснюється не тільки відмінностями в застосовуваній при дослідженнях методиці і апаратурі, але й у важкості точної характеристики стану дорожнього покриття (тип, структура, забрудненість, зношеність та ін.). При аналітичному визначенні гальмівного шляху автомобіля важливо мати найбільш достовірні дані стосовно коефіцієнта зчеплення, який значно впливає на точність отриманого результату, що особливо важливо при аналізі механізму скоєння ДТП.

Оскільки при вирішенні задач автотехнічної експертизи ДТП прийняття рішень відбувається в умовах неповноти інформації, тобто в умовах не-визначеності, для вирішення проблеми автоматизації цього виду діяльності можуть використовуватися багато з формальних методів, які розроблені в рамках кібернетичної науки [25]. Таким чином, неповнота інформації призводить до виникнення задач прийняття рішень в умовах невизначеності [26].

В процесі прийняття рішень виникають різні види невизначеності в залежності від причин її появи. Зокрема розрізняють невизначеність [24]:

- кількісну, зумовлену значним числом об'єктів чи елементів в ситуації;

- інформаційну, обумовлену недостатністю інформації чи її неточністю через технічні, соціальні та інші причини;
- вартісну через надто дорогу чи недоступну плату за визначеність;
- професійну як наслідок недостатнього професіоналізму особи, що приймає рішення;
- обмежувальну (спричинену обмеженнями в ситуації прийняття рішень, наприклад обмеження в часі та інш.);
- зовнішнього середовища, пов'язану з його поведінкою чи реакцією на процес прийняття рішення.

Крім того, 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. Причинами виникнення суб'єктивної невизначеності є [24]:

- неповнота знань експерта про властивості об'єктів;
- його недостатній ступінь впевненості в правильності свої оцінок;
- суперечливість експертних знань;
- нечіткість представлення інформації;
- семантична невизначеність, пов'язана з неоднозначністю природної мови, недовизначеністю понять і термінів;
- особливості агрегування індивідуальних експертних оцінок тощо.

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], в значній мірі 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 багатofакторної залежності $\varphi = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

2.2 Методика ідентифікації та побудови структури математичних моделей оцінювання коефіцієнта зчеплення

Оцінювання коефіцієнта зчеплення виконувалось на базі метода 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. 2.1): структурна ідентифікація; параметрична ідентифікація.

На етапі структурної ідентифікації формувалась структура залежності коефіцієнта зчеплення від факторів впливу (рис. 2.2) 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. 2.2, нейро-нечітка мережа залежності складається з п'яти шарів.



Рисунок 2.1 – Етапи налаштування системи оцінювання коефіцієнта зчеплення

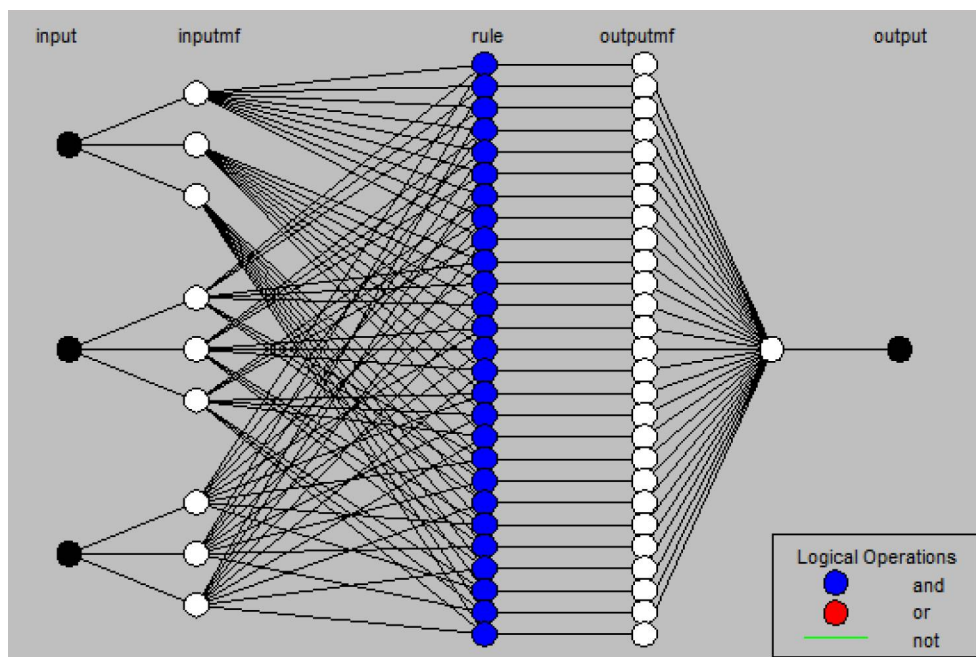


Рисунок 2.2 – Приклад нейро-нечіткої мережі сформованої в редакторі ANFIS

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

$$\mu_j(x_i) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - c_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)^2\right), \quad (2.1)$$

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.

Усі вузли третього шару визначають відносну ступінь виконання відповідного нечіткого правила τ_r^* (залежність (2.2)). У вузлах четвертого шару визначаються вклади нечітких правил у вихід мережі ϕ .

$$\phi_r = \tau_r^* \cdot (b_{0,r} + b_{1,r} \cdot jq + b_{2,r} \cdot N + b_{3,r} \cdot V + b_{4,r} \cdot BS), \quad (2.2)$$

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

$$\phi = \phi_1 + \dots + \phi_j + \dots + \phi_m. \quad (2.3)$$

Всі фактори впливу на коефіцієнт зчеплення (табл. 2.1) розглядаються як лінгвістичні змінні, що визначені на відповідних універсальних множинах і оцінюються за допомогою нечітких термів.

Таблиця 2.1 – 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), нижче середнього (Q_2), середній (Q_3), вище 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), нижче середньої (V_2), середня (V_3), вище середньої (V_4), висока (V_5)

Рекомендації для оцінки інтегрального показника «шини – дорога» j_q надані в додатку 1.

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

2.3 Загальний алгоритм моделювання величини коефіцієнта зчеплення, що реалізується в умовах експлуатації

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 проковзання шин).
6. Встановлюємо навантаження на колесо.
7. Визначаємо величину початкової швидкості гальмування, км/год.
8. На основі залежностей (2.1)-(2.3) виконуємо моделювання за допомогою розробленої нейро-нечіткої системи оцінювання коефіцієнта зчеплення коліс автомобіля з дорожнім покриттям у середовищі Matlab (див. п. 2.2).

Даний алгоритм може скорочуватися у разі обґрунтованого використання неповного переліку обраних факторів та за умови забезпечення необхідної точності моделювання. Дослідженню таких обставин присвячено третій розділ даного наукового дослідження.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ВЕЛИЧИН КОЕФІЦІЄНТА ЗЧЕПЛЕННЯ В ОБЧИСЛЮВАЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

3.1 Експериментальне дослідження ефективності гальмування транспортних засобів категорії М1 в умовах експлуатації та формування вихідних даних для моделювання

Мета експерименту полягає в отриманні 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 таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – 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 екстреному 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, BA), усталене сповільнення ТЗ, наявні сліди гальмування	Деселерометри МАНА VZM 100, МАНА VZM 300

Технічні параметри вимірювальної апаратури, що використовувалась під час експериментальних досліджень наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічна характеристика деселерометрів

Прилад/Параметр	МАНА VZM 100	МАНА VZM 300
Загальний вигляд		
Країна виробник	Німеччина	Німеччина
Діапазон вимірювань	від 0 до 10 м/с ²	від 0 до 22 м/с ²
Похибка вимірювань	± 0.1 м/с ²	± 0.1 м/с ²
Максимальна величина вимірюваної сили на педалі гальм	1.0 кН	1.0 кН
Максимальна швидкість «кльовка»	30 град/с	40 град/с
Кількість вимірювань в пам'яті	1-6	7-14
Запис величин вимірювання	60 Гц	100 Гц
Робоча температура	від -10 до +50 °С	від 0 до +50 °С
Вага	1100 г	1000 г
Габарити приладу	245 x 120 x 65 мм	260 x 124 x 60 мм
Кількість випробувань при повній зарядці батареї живлення	близько 30 з врахуванням друку результатів	близько 50 з врахуванням друку результатів
Джерело живлення	NiHM 6B/1.2 А·год 230В/9В AC 12В DC	NiHM 6B/1.8 А·год 230В/15В AC 12/24В DC

Отримані результати вимірювання сповільнення ТЗ (рис. 3.1) при екстремому гальмуванні (рис. 3.1) разом з експериментальними даними [27] було об'єднано в одну базу, яка має характеристики подані в таблиці 3.3.



Рисунок 3.1 – Одні з багатьох ТЗ, що були задіяні у випробуваннях ефективності гальмівних систем

Таблиця 3.3 – База даних, отримана за результатами проведених 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

3.2 Оцінювання інформативності факторів, які впливають на коефіцієнт зчеплення, засобами Fuzzy Logic Toolbox

Застосування ANFIS для прогнозування величини коефіцієнта зчеплення дозволяє застосувати 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. 2.1. Експериментальні дані (додаток 2) були записані у файл auto-gas.dat.

Для побудови моделі прогнозування коефіцієнта зчеплення експериментальні дані було розділено на навчальну та тестову вибірки.

Вибір найкращого набору входних змінних здійснювався за допомогою функції `exhsrch`. З метою скорочення часу перебору можливих варіантів, нечіткі моделі з різними входами навчались за одну ітерацію ANFIS-алгоритма.

З початку була виконана процедура оцінювання інформативності параметрів впливу на коефіцієнт зчеплення на основі грубих моделей «вхід-вихід». Результати тестування 6 нечітких моделей подані на рис. 3.2.

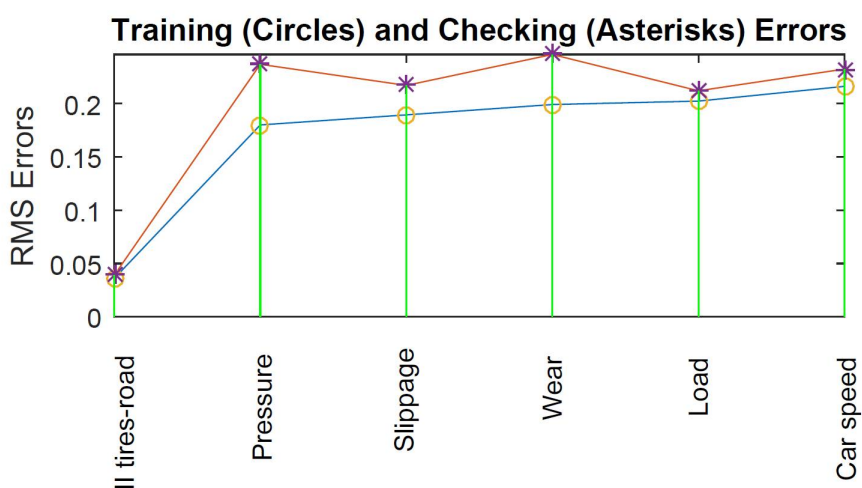


Рисунок 3.2 – Результати тестування шести однофакторних нечітких моделей оцінювання коефіцієнта зчеплення

Значення нев'язки RMSE (Root Mean Squared Error) на навчальній та тестовій вибірках позначені відповідно колами та зірочками. Чисельні значення нев'язок подані в додатку 3 в лістингу виконання програми.

Як видно з графіка (див. рис. 3.2), 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. 3.3.

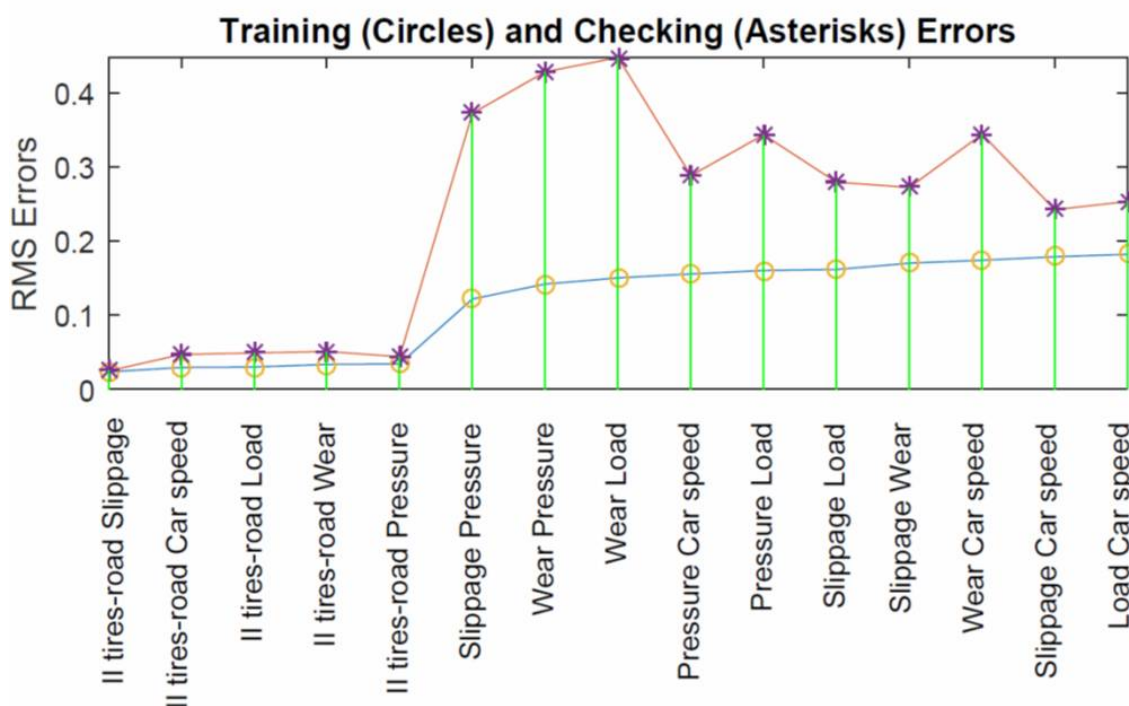


Рисунок 3.3 – Результати тестування п'ятнадцяти двофакторних нечітких моделей оцінювання коефіцієнта зчеплення

Як видно з рис. 3.3, найбільш інформативною парою ознак є «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. 3.4.

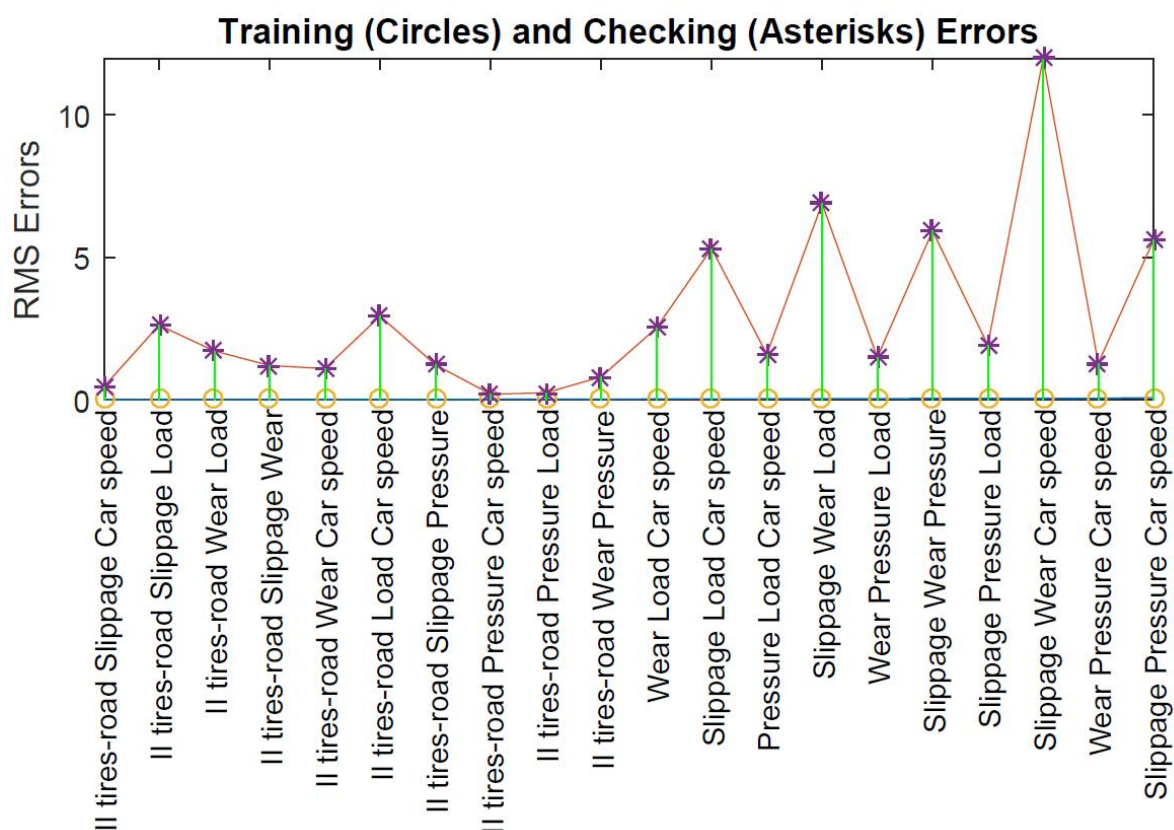


Рисунок 3.4 – Результати тестування двадцяти трифакторних нечітких моделей оцінювання коефіцієнта зчеплення

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».

3.3 Навчання та аналіз параметрів оптимальної ANFIS-моделі

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 (див. Додаток 2). Для порівняння, звичайна лінійна модель, яка враховує вплив усіх обраних факторів (див. табл. 2.1), забезпечує значення RMSE 0.0324 та 0.0347 на навчальній та тестовій вибірках відповідно.

Результати навчання обраної двофакторної моделі подані на рис. 3.5.



Рисунок 3.5 – ANFIS-навчання та контроль помилок

На попередніх етапах моделі-кандидати навчались за допомогою функції `exhsrch` лише протягом однієї ітерації ANFIS-алгоритму. Це було зроблено для швидкого вибору доцільної множини вхідних змінних. Тепер, коли вхідні змінні обрані, можна потратити більше часу для навчання. Рис. 3.5 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 колом.

На рисунку 3.6 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.

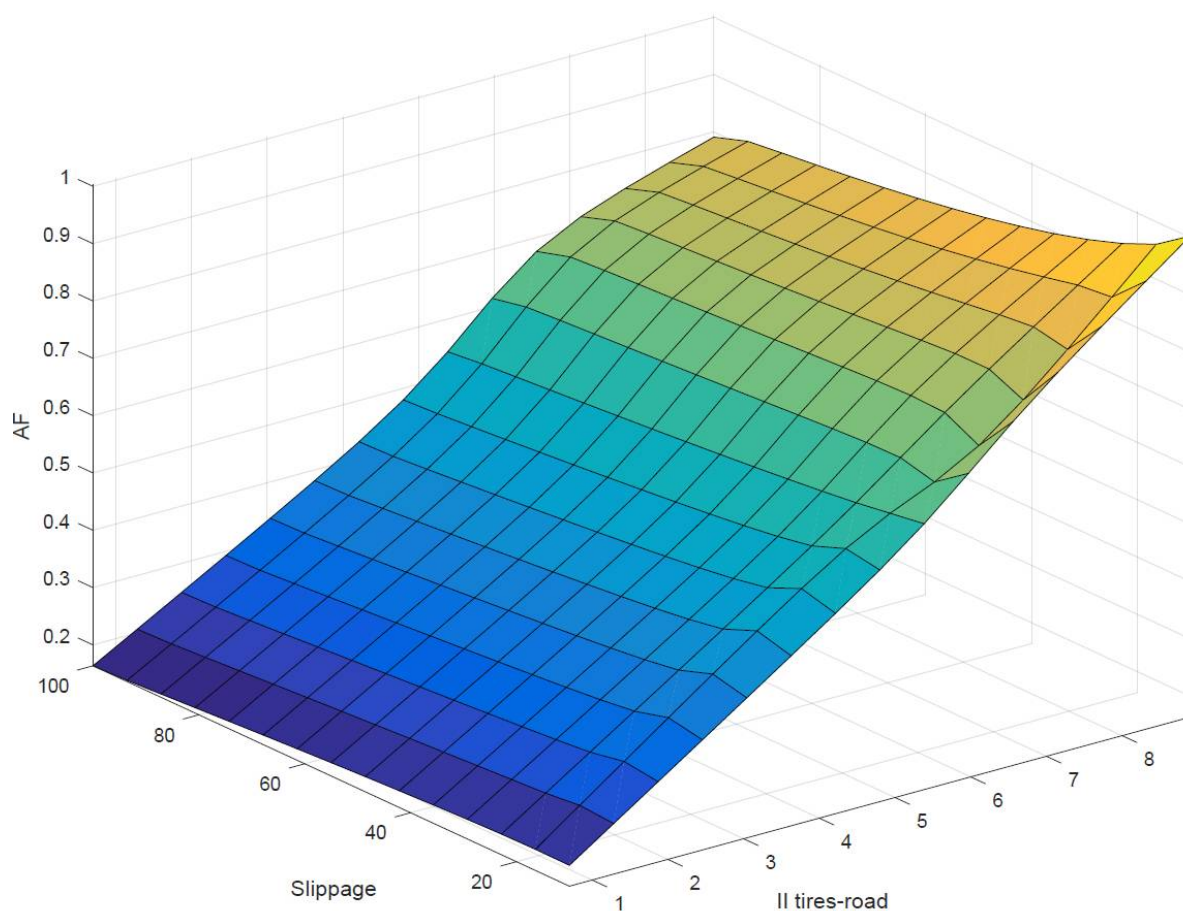


Рисунок 3.6 – Поверхня «входи – вихід» нечіткої моделі після навчання

При розгляді правого ближнього кута поверхні (рис. 3.6) виявляється парадоксальний ефект – максимум коефіцієнта зчеплення спостерігається при значеннях ступеня проковзання 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. 3.7.

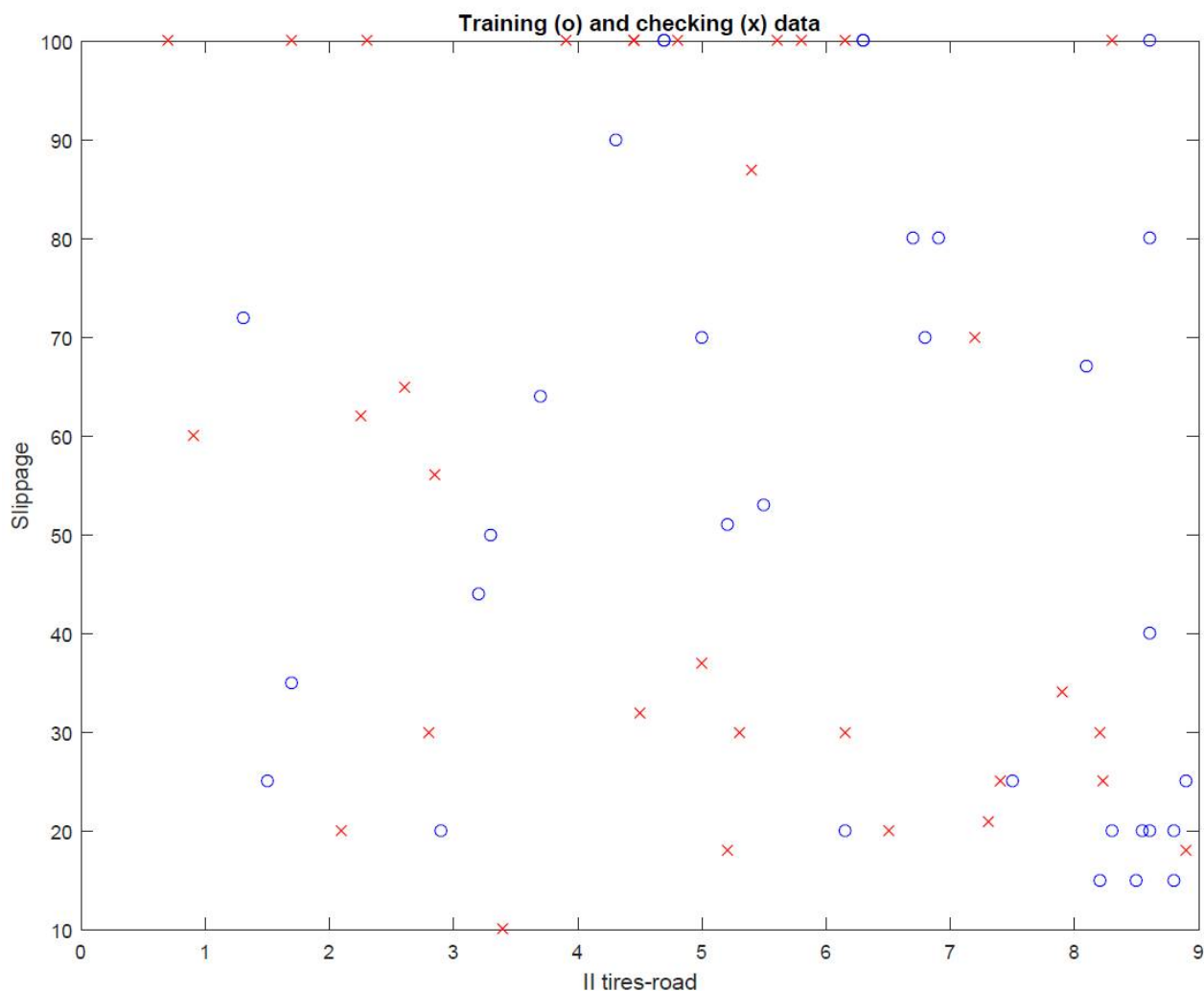


Рисунок 3.7 – Навчальна (кола) та тестова (хрестики) вибірки

Використовуючи моделі, синтезовані за допомогою ANFIS або за допомогою іншої технології автоматичного навчання, необхідно пам'ятати, що вони адекватно можуть описувати лише закономірності, представлені репрезентативними вибірками даних.

Отже, 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».

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 фактору (табл. 2.1). 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 на основі інформації п. 2.3.

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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Health Organization. Road traffic injuries. Retrieved from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs358/en/>.
2. Совершенствование методов автотехнической экспертизы при дорожно-транспортных происшествиях: монография / [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. Туренко А.М., Клименко В.І., Сараєв О.В., Данець С.В. Автотехнічна експертиза. Дослідження обставин ДТП: підручник для вищих навчальних закладів. – Харків: ХНАДУ, 2013. – 320 с.
4. Struble D. 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. Kashkanov A. A., Rotshtein A. P., Kucheruk V. Yu., Kashkanov V. A. Tyre-Road friction Coefficient: Estimation Adaptive System. Bulletin of the Karaganda University. «Physics» series. 2020. № 2(98). P. 50-59. DOI: 10.31489/2020Ph2/50-59.
8. Singh KB, Ali Arat M, Taheri S. An Intelligent Tire Based Tire-Road Friction Estimation Technique and Adaptive Wheel Slip Controller for Antilock Brake System // ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control. – 2013. – 135(3):031002-031002-26. doi:10.1115/1.4007704.
9. Breuer J., Faulhaber A., Frank P. and Gleissner S. Real world safety benefits of brake assistance systems. Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration. Paper 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. – 2015. – №3:1. – P. 39-61. DOI: 10.1080/21642583.2014.985804.
11. Laugier, C., Paromtchik, I. E., Perrollaz M., Yoder J.-D., Tay, C., Yong, M., Nègre, A., Mekhnacha, K. Probabilistic analysis of dynamic scenes and collision risks assessment to improve driving safety // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. – 2011. – №3. – P. 4-19.
12. Zhang R., Cao L., Bao S., Tan J. A method for connected vehicle trajectory prediction and collision warning algorithm based on V2V communication // International Journal of Crashworthiness. 2017. Vol. 22. No. 1. P. 15-25.
13. Волков В. П., Вільський Г. Б. Теорія руху автомобіля : підручник. 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. Кашканов А. А. Математичні методи обґрунтування рішень в автотехнічній експертизі дорожньо-транспортних пригод. Автомобільний транспорт. 2018. №43. С. 78-89. DOI: 10.30977/АТ.2219-8342.2018.43.0.78.
16. Franck H., Franck D. Mathematical methods for accident reconstruction: a forensic engineering perspective. Boca Raton: CRC Press, 2009. 328 p.
17. Кашканов А. А., Кашканов В. А., Кашканова А. А. Моделювання траєкторії руху автомобіля при дослідженні ДТП. Вісник машинобудування та транспорту. 2019. №1(9). С. 53-65. 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. Retrieved from http://enfsi.eu/wp-content/uploads/2016/09/4._road_accident_reconstruction_0.pdf.
19. Пучкин В. А. Основы экспертного анализа дорожно-транспортных происшествий: База данных. Экспертная техника. Методы решений. Ростов н/Д: ИПО ПИ ЮФУ, 2010. 400 с.

20. Active safety systems change accident environment of vehicles significantly – a challenge for vehicle design / Rieger L., Scheef J., Becker H., Stanzel M. and Zobel R. // Nineteenth International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Washington. 2005. Paper 05-0074.

21. Marco P daSilva. Analysis of Event Data Recorder Data for Vehicle Safety Improvement. Retrieved from <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/EDR/Research/811015.pdf>.

22. Hynd, D., McCarthy, M. Study on the benefits resulting from the installation of Event Data Recorders. Retrieved from https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/docs/study_edr_2014.pdf.

23. Wach W., Unarski J. Uncertainty of calculation results in vehicle collision analysis // Forensic Science International. – 2007. – Vol. 167(2), P. 181–188. DOI: 10.1016/j.forsciint.2006.06.061.

24. Кашканов А. А. Методика оцінювання і зменшення невизначеності в задачах автотехнічної експертизи дорожньо-транспортних пригод. Вісник машинобудування та транспорту. 2020. №1(11). С. 71-78. DOI: 10.31649/2413-4503-2020-11-1-71-78.

25. М. Эддоус, Р. Стэнсфилд. Методы принятия решений. Пер. с англ. под ред. И. И. Елисеевой. М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997. 590 с.

26. Rotshtein A., Rakytyanska H. Fuzzy Evidence in Identification, Forecasting and Diagnosis. – Berlin : Springer, 2012. – 313 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25786-5>.

27. Кашканов В. А., Ребедайло В. М., Кашканов А. А., Кужель В. П. Інтелектуальна технологія ідентифікації коефіцієнта зчеплення при автотехнічній експертизі ДТП : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 128 с.

28. Jang J.-S. R., ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, P. 665-685, May 1993.

29. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.

30. Зайченко Ю. П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах. Киев: Издательський дом «Слово», 2008. 344 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Рекомендації для оцінки інтегрального показника Q [27]

Дорожнє покриття		Показник Q для типу шин (T)		
Тип (D_1)	Стан (D_2)	Високого тиску	Низького тиску	Високої прохідності
Асфальтобетонне, цементобетонне	Сухе	5.63 – 7.88	7.88 – 9	7.88 – 9
	Зволожено дощем	3.1 – 4.33	4.33 – 4.95	4.33 – 4.95
	Мокре	3.94 – 5.06	5.06 – 6.19	5.63 – 6.75
	Покрите гряззю	2.81 – 5.06	2.81 – 4.5	2.81 – 5.06
	Мокрий сніг ($t > 0^\circ\text{C}$)	2.1 – 3.4	2.1 – 4.2	2.1 – 4.2
	Ожеледиця ($t < 0^\circ\text{C}$)	0.9 – 1.69	1.13 – 2.25	0.56 – 1.13
Булижне	Сухе	4.5 – 5.63	5.63 – 6.19	6.75 – 7.88
	Мокре	2.7 – 3.75	3.75 – 4.43	4.5 – 6.19
Щебенева	Сухе	5.63 – 6.75	6.75 – 7.88	6.75 – 7.88
	Мокре	3.38 – 4.5	4.5 – 5.63	4.5 – 6.19
Ґрунтова дорога	Суха	4.5 – 5.63	5.63 – 6.75	5.63 – 6.75
	Зволожена дощем	2.25 – 4.5	3.38 – 5.06	3.94 – 5.63
	В період роздоріжжя	1.68 – 2.81	1.68 – 2.81	2.25 – 3.38
Цілина літом: Пісок	Сухий	2.25 – 3.38	2.48 – 4.5	2.25 – 3.38
	Вологий	3.94 – 4.5	4.5 – 5.63	4.5 – 5.63
Цілина літом: Суглинок	Сухий	4.5 – 5.63	5.06 – 6.19	4.5 – 5.63
	Зволожений до пластичного стану	2.25 – 4.5	2.81 – 4.5	3.38 – 5.06
	Зволожений до текучого стану	1.69 – 2.25	1.69 – 2.81	1.69 – 2.81
Цілина зимою: сніг	Рихлий	2.25 – 3.38	2.25 – 4.5	2.25 – 4.5
	Втоптаний	1.69 – 2.25	2.25 – 2.81	3.38 – 5.63

Додаток 2

Навчальна вибірка, отримана за результатами проведених натурних експериментальних досліджень

φ	Q	S	H	P	N	V
0,69	6,15	20	62	0,2	15	20
0,45	4,45	100	65	0,2	15	60
0,47	4,7	100	65	0,18	20	100
0,43	3,4	10	15	0,17	95	120
0,42	3,7	64	95	0,25	45	72
0,82	7,9	34	21	0,27	17	15
0,81	8,1	67	72	0,25	20	58
0,76	7,4	25	20	0,14	15	15
0,9	8,6	40	75	0,18	20	45
0,42	3,9	100	35	0,29	45	110
0,88	8,9	25	70	0,19	60	90
0,6	5,3	30	5	0,26	90	35
0,82	8,6	80	20	0,2	15	20
0,7	6,15	30	62	0,2	15	40
0,68	6,3	100	65	0,18	20	20
0,22	1,7	100	65	0,18	20	60
0,88	8,5	15	25	0,18	65	78
0,54	4,5	32	75	0,19	90	80
0,81	7,5	25	25	0,18	71	67
0,35	2,6	65	50	0,16	60	55
0,53	5	70	20	0,17	100	25
0,16	0,7	100	75	0,18	20	10
0,92	8,6	20	10	0,2	15	30
0,45	4,45	100	65	0,2	15	20
0,67	6,3	100	65	0,18	20	60
0,56	5,6	100	75	0,2	25	100
0,39	2,9	20	25	0,24	51	68
0,37	2,85	56	75	0,29	40	40
0,58	5,5	53	98	0,18	100	35
0,58	5,2	18	20	0,17	38	129
0,77	8,2	15	10	0,2	100	115
0,77	8,3	100	30	0,17	80	40
0,93	8,8	15	55	0,21	62	32
0,57	5	37	15	0,18	17	25
0,71	6,8	70	28	0,16	90	52
0,8	7,3	21	37	0,2	50	65
0,69	6,7	80	75	0,12	56	62
0,48	4,8	100	20	0,23	10	80

φ	Q	S	H	P	N	V
0,37	3,3	50	90	0,3	50	85
0,35	2,1	20	55	0,23	70	40
0,95	8,8	20	10	0,2	0	10
0,67	6,15	100	62	0,2	15	60
0,89	8,3	20	15	0,18	20	40
0,74	7,2	70	70	0,19	15	60
0,3	1,7	35	30	0,16	74	34
0,75	6,5	20	30	0,22	20	94
0,22	1,3	72	35	0,15	70	53
0,33	2,25	62	21	0,31	85	64
0,44	4,3	90	10	0,13	10	80
0,95	8,9	18	5	0,22	10	10
0,77	8,6	100	62	0,2	15	80
0,86	8,2	30	45	0,2	15	40
0,46	4,7	100	65	0,18	20	20
0,23	0,9	60	10	0,14	100	20
0,57	5,2	51	70	0,22	38	97
0,27	2,3	100	62	0,21	35	70
0,39	3,2	44	55	0,23	10	40
0,59	5,8	100	5	0,22	100	35
0,26	1,5	25	68	0,14	35	30
0,52	5,4	87	60	0,25	75	40
0,71	6,9	80	4,5	0,16	30	50
0,39	2,8	30	95	0,24	35	60
0,92	8,55	20	20	0,21	0	37
0,87	8,23	25	10	0,18	10	55

Додаток 3

Лістинг програми та результатів моделювання величини коефіцієнта зчеплення в обчислювальному середовищі Matlab

```
function [data, input_name] = loadgas

%LOADGAS Load data file for automobile Fi (adhesion factor) prediction
%
% ===== Get data from original data file

data_file = 'auto-gas.dat';
fprintf('Getting data from file '%s'...\n', data_file);
pause(0.1);
fid = fopen(data_file, 'r', 'n', 'utf8');

raw_data = zeros(500, 8);
i = 1;
while 1
    line = fgetl(fid);
    if ~isstr(line), break, end
    if isempty(find(line=='?')), % get rid of data with missing value
        raw_data(i, :) = sscanf(line, '%f');
        i = i+1;
    end
end
fclose(fid);
raw_data(i:500, :) = [];

% Rearrange the data so that inputs come first

data = [raw_data(:, 2:7) raw_data(:, 1)];

% ===== Get variable names
% 1. AF: continuous
% 2. II tires-road: continuous
% 3. slippage: multi-valued discrete
% 4. wear: multi-valued discrete
% 5. pressure: continuous
% 6. load: multi-valued discrete
% 7. car speed: multi-valued discrete
% 8. origin: multi-valued discrete

input_name = ...
    str2mat('II tires-road', 'Slippage', 'Wear', 'Pressure', 'Load', 'Car
speed', 'AF');

%% Partitioning Data
% The data set is obtained from the original data file 'auto-gas.dat'. The
% dataset is then partitioned into a training set (odd-indexed samples) and
% a checking set (even-indexed samples).

[data, input_name] = loadgas;
trn_data = data(1:2:end, :);
chk_data = data(2:2:end, :);

%% Input Selection
% The function |exhsrch| performs an exhaustive search within the available
% inputs to select the set of inputs that most influence the fuel
% consumption. The first parameter to the function specifies the number of
% input combinations to be tried during the search. Essentially, |exhsrch|
```

```

% builds an ANFIS model for each combination and trains it for one epoch
% and reports the performance achieved. In the following example, |exhsrch|
% is used to determine the one most influential input attribute in
% predicting the output.

exhsrch(1, trn_data, chk_data, input_name);

Train 6 ANFIS models, each with 1 inputs selected from 6 candidates...

ANFIS model 1: II tires-road --> trn=0.0359, chk=0.0388
ANFIS model 2: Slippage --> trn=0.1894, chk=0.2170
ANFIS model 3: Wear --> trn=0.1991, chk=0.2461
ANFIS model 4: Pressure --> trn=0.1800, chk=0.2368
ANFIS model 5: Load --> trn=0.2023, chk=0.2120
ANFIS model 6: Car speed --> trn=0.2162, chk=0.2324

% *Figure 1:* Every input variable's influence on adhesion factor

%%
% The left-most input variable in Figure 1 has the least error or in other
% words the most relevance with respect to the output.
%
% The plot and results from the function clearly indicate that the input
% attribute 'Load' is the most influential. The training and checking
% errors are comparable, which implies that there is no overfitting. This
% means we can push a little further and explore if we can select more than
% one input attribute to build the ANFIS model.
%
% Intuitively, we can simply select 'II tires-road' and 'Load' directly since
they
% have the least errors as shown in the plot. However, this will not
% necessarily be the optimal combination of two inputs that result in the
% minimal training error. To verify this, we can use |exhsrch| to search
% for the optimal combination of 2 input attributes.

input_index = exhsrch(2, trn_data, chk_data, input_name);

Train 15 ANFIS models, each with 2 inputs selected from 6 candidates...

ANFIS model 1: II tires-road Slippage --> trn=0.0231, chk=0.0243
ANFIS model 2: II tires-road Wear --> trn=0.0332, chk=0.0507
ANFIS model 3: II tires-road Pressure --> trn=0.0339, chk=0.0435
ANFIS model 4: II tires-road Load --> trn=0.0298, chk=0.0487
ANFIS model 5: II tires-road Car speed --> trn=0.0291, chk=0.0466
ANFIS model 6: Slippage Wear --> trn=0.1698, chk=0.2720
ANFIS model 7: Slippage Pressure --> trn=0.1215, chk=0.3720
ANFIS model 8: Slippage Load --> trn=0.1612, chk=0.2790
ANFIS model 9: Slippage Car speed --> trn=0.1785, chk=0.2419
ANFIS model 10: Wear Pressure --> trn=0.1416, chk=0.4279
ANFIS model 11: Wear Load --> trn=0.1499, chk=0.4472
ANFIS model 12: Wear Car speed --> trn=0.1737, chk=0.3437
ANFIS model 13: Pressure Load --> trn=0.1599, chk=0.3430
ANFIS model 14: Pressure Car speed --> trn=0.1553, chk=0.2880
ANFIS model 15: Load Car speed --> trn=0.1816, chk=0.2531

% *Figure 2:* All two input variable combinations and their influence
% on adhesion factor

%%
% The results from |exhsrch| indicate that 'II tires-road' and 'Slippage' form
the
% optimal combination of two input attributes. The training and checking

```

```
% errors are getting distinguished, indicating the outset of overfitting.
% It may not be prudent to use more than two inputs for building the ANFIS
% model. We can test this premise to verify it's validity.
```

```
exhsrch(3, trn_data, chk_data, input_name);
```

```
Train 20 ANFIS models, each with 3 inputs selected from 6 candidates...
```

```
ANFIS model 1: II tires-road Slippage Wear --> trn=0.0037, chk=1.1997
ANFIS model 2: II tires-road Slippage Pressure --> trn=0.0114, chk=1.2261
ANFIS model 3: II tires-road Slippage Load --> trn=0.0019, chk=2.6159
ANFIS model 4: II tires-road Slippage Car speed --> trn=0.0016, chk=0.4593
ANFIS model 5: II tires-road Wear Pressure --> trn=0.0195, chk=0.8029
ANFIS model 6: II tires-road Wear Load --> trn=0.0033, chk=1.7094
ANFIS model 7: II tires-road Wear Car speed --> trn=0.0075, chk=1.0934
ANFIS model 8: II tires-road Pressure Load --> trn=0.0193, chk=0.2404
ANFIS model 9: II tires-road Pressure Car speed --> trn=0.0170, chk=0.1958
ANFIS model 10: II tires-road Load Car speed --> trn=0.0093, chk=2.9324
ANFIS model 11: Slippage Wear Pressure --> trn=0.0450, chk=5.9244
ANFIS model 12: Slippage Wear Load --> trn=0.0375, chk=6.8834
ANFIS model 13: Slippage Wear Car speed --> trn=0.0514, chk=11.9645
ANFIS model 14: Slippage Pressure Load --> trn=0.0471, chk=1.9230
ANFIS model 15: Slippage Pressure Car speed --> trn=0.0744, chk=5.5988
ANFIS model 16: Slippage Load Car speed --> trn=0.0300, chk=5.3062
ANFIS model 17: Wear Pressure Load --> trn=0.0417, chk=1.4851
ANFIS model 18: Wear Pressure Car speed --> trn=0.0518, chk=1.2816
ANFIS model 19: Wear Load Car speed --> trn=0.0282, chk=2.5148
ANFIS model 20: Pressure Load Car speed --> trn=0.0355, chk=1.5984
```

```
% *Figure 3:* All three input variable combinations and their influence
% on adhesion factor
```

```
%%
% The plot shows the result of selecting three inputs, in which 'II tires-road',
% 'Slippage', and 'Wear' are selected as the best combination of three input
% variables. However, the minimal training (and checking) error do not
% reduce significantly from that of the best 2-input model, which indicates
% that the newly added attribute 'Wear' does not improve the prediction
% much. For better generalization, we always prefer a model with a simple
% structure. Therefore we will stick to the two-input ANFIS for further
% exploration.
%
% We then extract the selected input attributes from the original training
% and checking datasets.
```

```
close all;
new_trn_data = trn_data(:, [input_index, size(trn_data,2)]);
new_chk_data = chk_data(:, [input_index, size(chk_data,2)]);
```

```
%% Training ANFIS Model
% The function |exhsrch| only trains each ANFIS for a single epoch in order
% to be able to quickly find the right inputs. Now that the inputs are
% fixed, we can spend more time on ANFIS training (100 epochs).
%
% The |genfis1| function generates a initial FIS from the training data,
% which is then finetuned by ANFIS to generate the final model.
```

```
in_fismat = genfis1(new_trn_data, 2, 'gbellmf');
[trn_out_fismat, trn_error, step_size, chk_out_fismat, chk_error] = ...
    anfis(new_trn_data, in_fismat, [100 nan 0.01 0.5 1.5], [0,0,0,0],
new_chk_data, 1);
```

```

%%
% ANFIS returns the error with respect to training data and checking data
% in the list of its output parameters. The plot of the errors provides
% useful information about the training process.

[a, b] = min(chk_error);
plot(1:100, trn_error, 'g-', 1:100, chk_error, 'r-', b, a, 'ko');
title('Training (green) and checking (red) error curve','fontsize',10);
xlabel('Epoch numbers','fontsize',10);
ylabel('RMS errors','fontsize',10);

%%
% *Figure 4:* ANFIS training and checking errors

%%
% The plot above shows the error curves for 100 epochs of ANFIS training.
% The green curve gives the training errors and the red curve gives the
% checking errors. The minimal checking error occurs at about epoch 78,
% which is indicated by a circle. Notice that the checking error curve
% goes up after 80 epochs, indicating that further training overfits the
% data and produces worse generalization

%% ANFIS vs Linear Regression
% A good exercise at this point would be to check the performance of the
% ANFIS model with a linear regression model.
%
% The ANFIS prediction can be compared against a linear regression model by
% comparing their respective RMSE (Root mean square) values against
% checking data.

% Performing Linear Regression
N = size(trn_data,1);
A = [trn_data(:,1:6) ones(N,1)];
B = trn_data(:,7);
coef = A\B; % Solving for regression parameters from training data

Nc = size(chk_data,1);
A_ck = [chk_data(:,1:6) ones(Nc,1)];
B_ck = chk_data(:,7);
lr_rmse = norm(A_ck*coef-B_ck)/sqrt(Nc);
% Printing results
fprintf('\nRMSE against checking data\nANFIS : %1.3f\tLinear Regression :
%1.3f\n', a, lr_rmse);

RMSE against checking data
ANFIS : 0.020      Linear Regression : 0.030

%%
% It can be seen that the ANFIS model outperforms the linear regression
% model.
%
%% Analyzing ANFIS Model
% The variable |chk_out_fismat| represents the snapshot of the ANFIS model
% at the minimal checking error during the training process. The
% input-output surface of the model is shown in the plot below.

chk_out_fismat = setfis(chk_out_fismat, 'input', 1, 'name', 'II tires-road');
chk_out_fismat = setfis(chk_out_fismat, 'input', 2, 'name', 'Slippage');
chk_out_fismat = setfis(chk_out_fismat, 'output', 1, 'name', 'AF');

% Generating the FIS output surface plot
gensurf(chk_out_fismat);

```

```

%%
% *Figure 5:* Input-Output surface for trained FIS

%%
% The input-output surface shown above is a nonlinear and monotonic surface
% and illustrates how the ANFIS model will respond to varying values of
% 'II tires-road' and 'Slippage'.

%% Limitations and Cautions
% We can see some spurious effects at the far-end corner of the surface.
% The elevated corner says that the smallest tires slippage is, the more
% adhesion factor it will be. This is not quite true, and it is a
% direct result from lack of data.

plot(new_trn_data(:,1), new_trn_data(:, 2), 'bo', ...
     new_chk_data(:,1), new_chk_data(:, 2), 'rx');
xlabel('II tires-road','fontsize',10);
ylabel('Slippage','fontsize',10);
title('Training (o) and checking (x) data','fontsize',10);

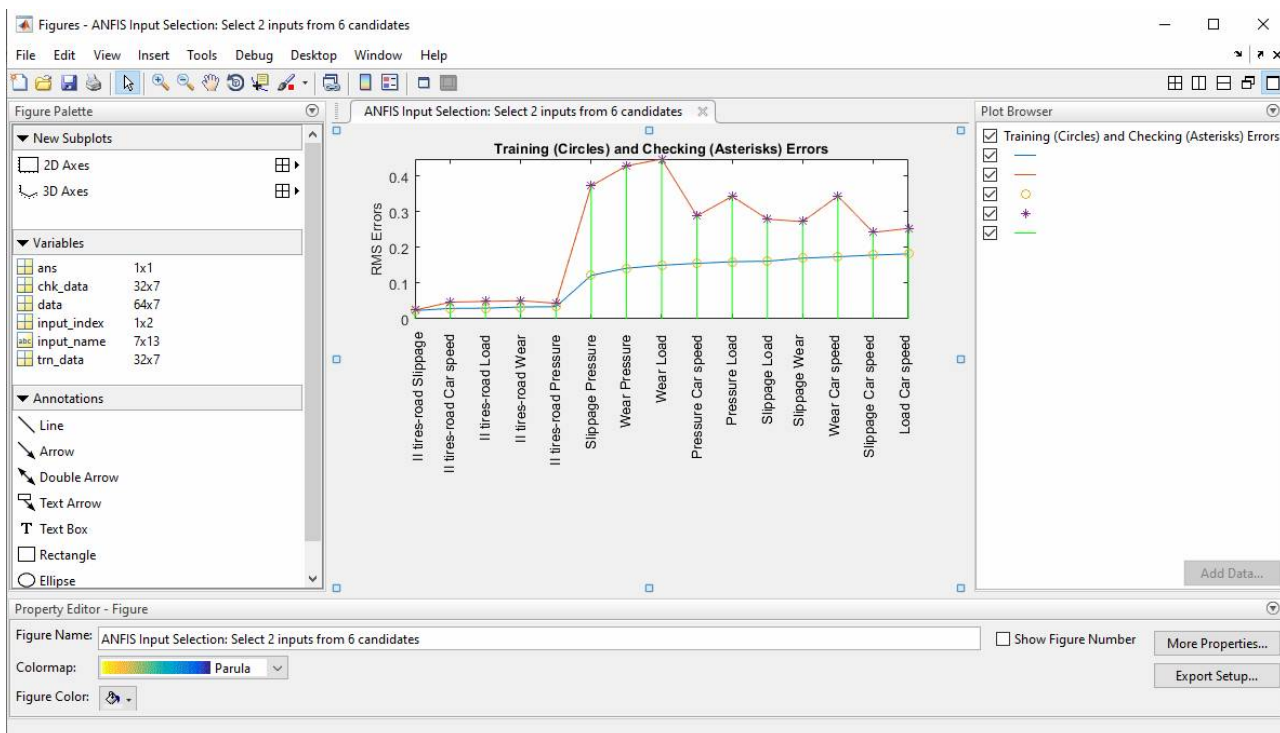
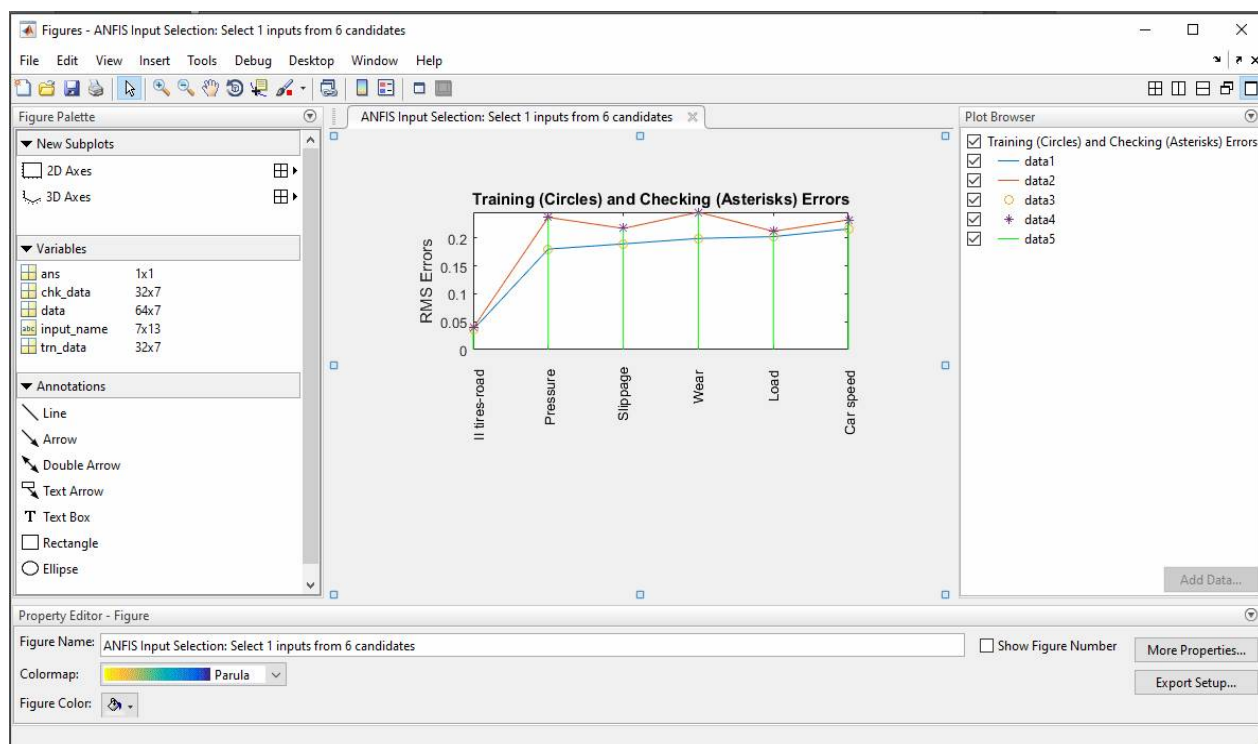
%%
% *Figure 6:* II tires-road vs Slippage plot showing lack of data in the upper-
left corner

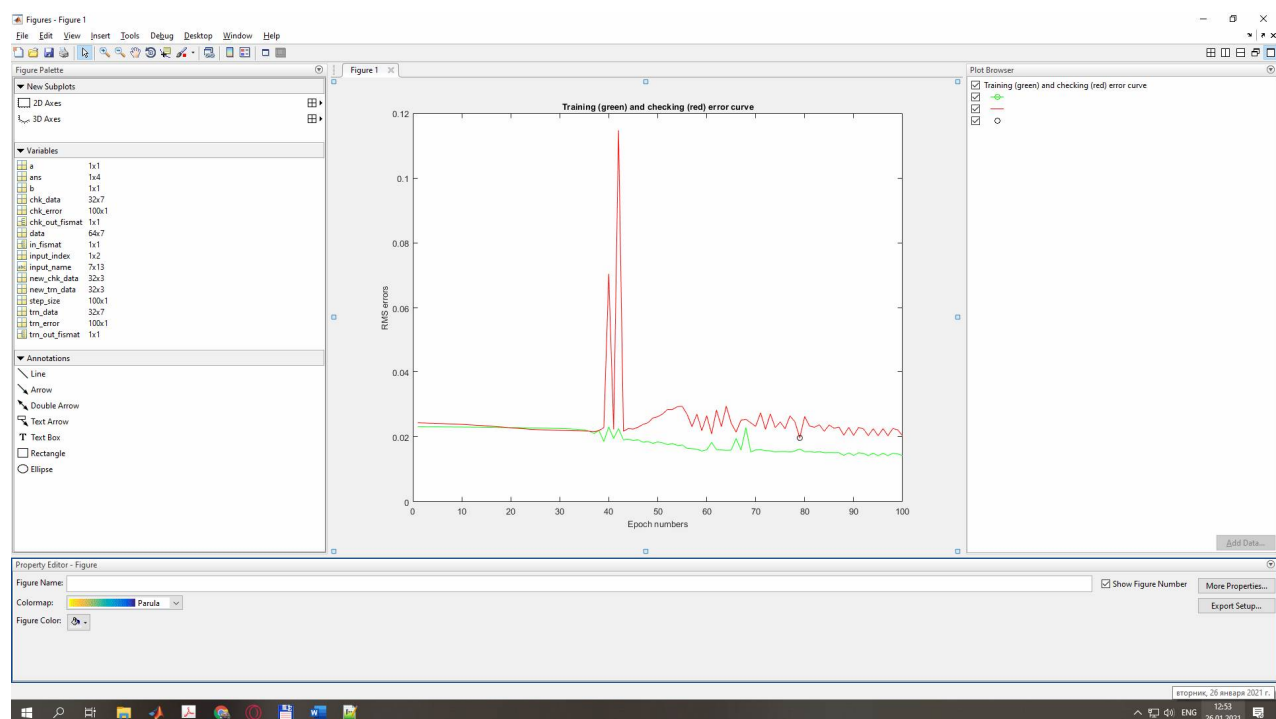
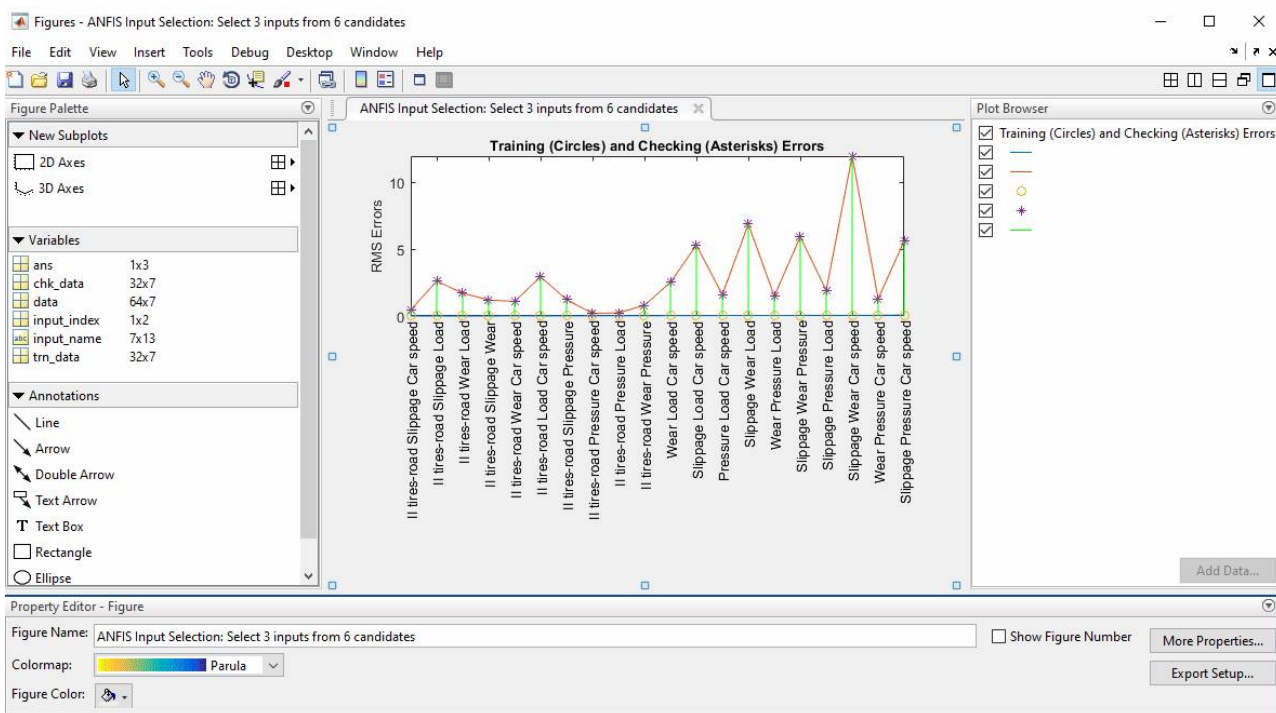
%%
% This plot above shows the data distribution. The lack of training data at
% the upper left corner causes the spurious ANFIS surface mentioned
% earlier. Therefore the prediction by ANFIS should always be interpreted
% with the data distribution in mind.

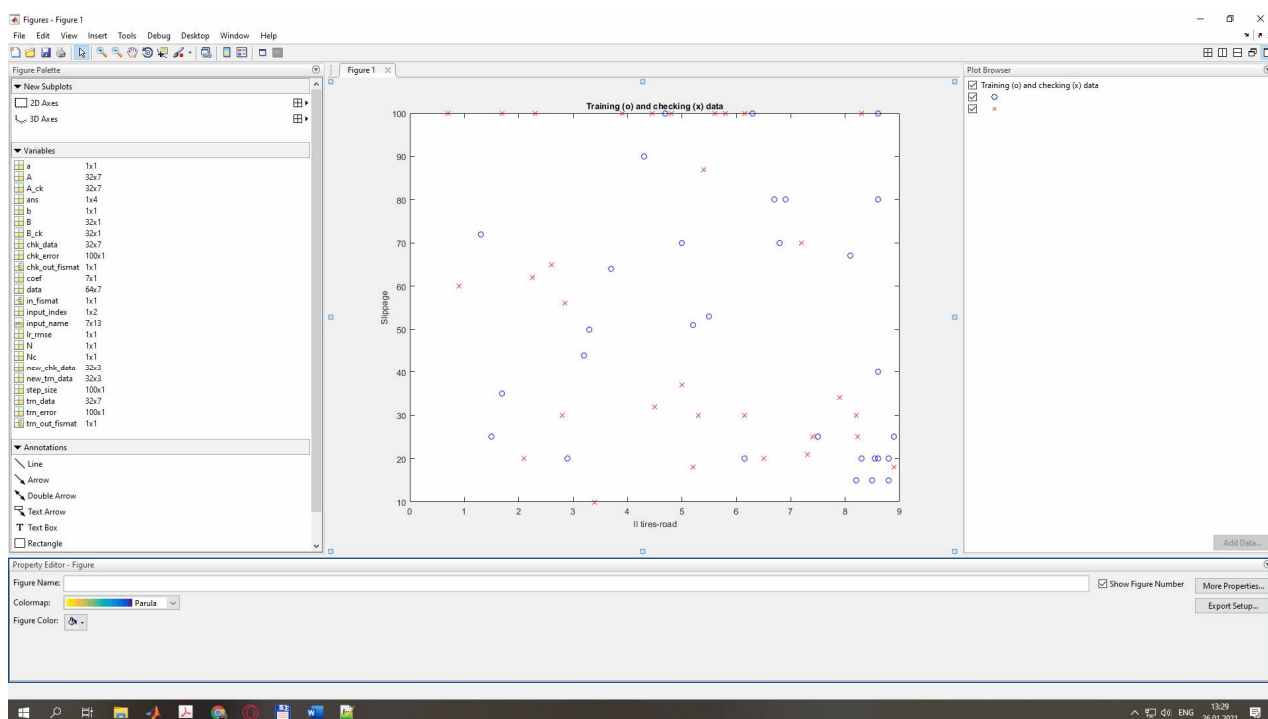
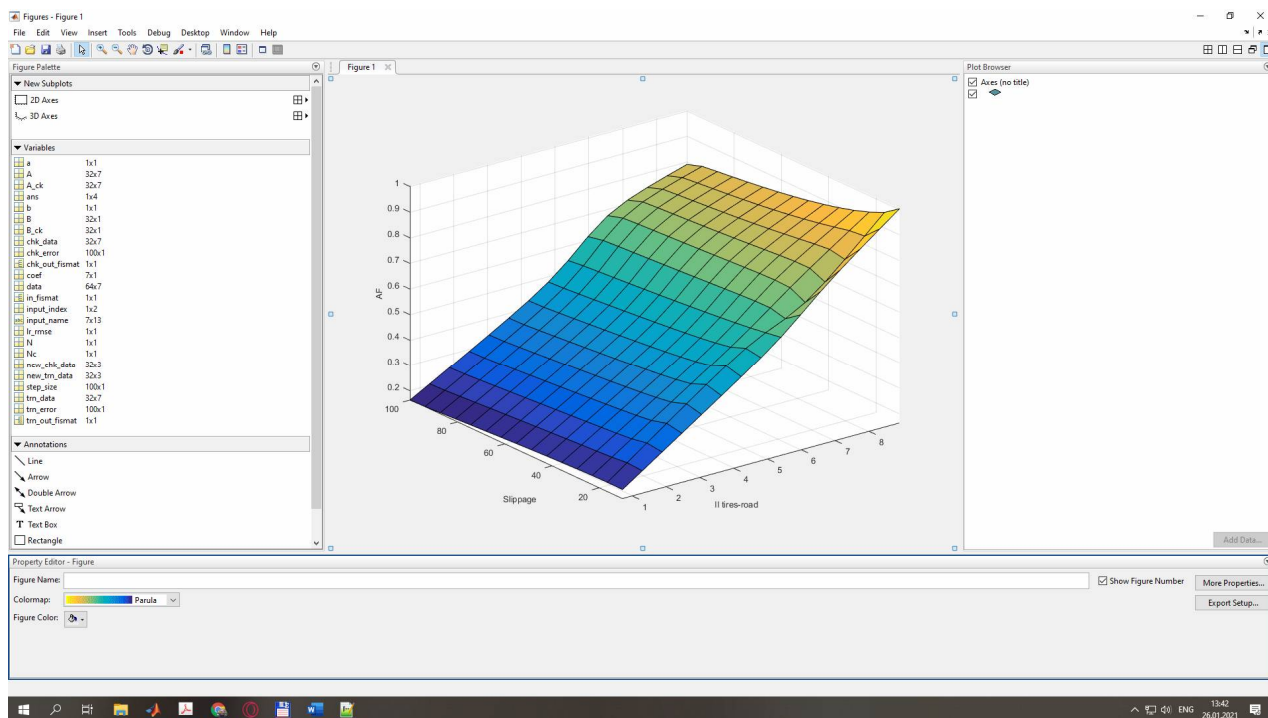
```

Додаток 4

Скріншоти виконання програми та візуалізації результатів моделювання величини коефіцієнта зчеплення в обчислювальному середовищі Matlab







АНОТАЦІЯ

Наукова робота під шифром «коефіцієнт зчеплення» містить 30 сторінок формату А4, включаючи 11 рисунків, 4 таблиці, 30 найменувань використаних джерел, крім того в роботі є 4 додатки, розміщені на 11 сторінках.

Предметом наукової роботи є оцінювання зчіпних якостей автомобільних шин при дослідженні дорожньо-транспортної пригоди (ДТП) в умовах невизначеності.

Робота складається з 3 розділів: потенціал реалізації зчіпних властивостей коліс автомобіля з дорожнім покриттям та ефективність гальмування; теоретичні засади удосконалення існуючих підходів щодо оцінювання коефіцієнта зчеплення в умовах невизначеності; моделювання величини коефіцієнта зчеплення в обчислювальному середовищі Matlab.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії автомобільних шин з дорожнім покриттям в умовах експлуатації.

Метою роботи є удосконалення існуючих підходів щодо оцінювання коефіцієнта зчеплення та показників ефективності гальмування транспортних засобів (ТЗ) при автотехнічній експертизі ДТП в умовах наявності композиційної (стохастичної та нечіткої) невизначеності.

В роботі здійснюється вибір та обґрунтування методу оцінювання зчіпних якостей автомобільних шин при дослідженні дорожньо-транспортної пригоди 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.

Ключові слова: сили тертя, коефіцієнт зчеплення, автомобільна шина, дорожнє покриття, процес гальмування, сповільнення, гальмівний шлях, композиційна невизначеність, експертиза дорожньо-транспортних пригод.