

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО

ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **«Дослідження ефективності роботи активних систем безпеки
автомобіля»**

Виконав: студент VI курсу групи Ат-61

Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)

Андрій Наконечний

(ім'я та прізвище)

Керівник: Юрій Габрієль

(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

УДК 629.331-592

Наконечний Андрій Петрович. «Дослідження ефективності роботи активних систем безпеки автомобіля».

//Магістерська робота. – Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2025. – 63 с.

Кваліфікаційну роботу присвячено аналізу функціонування сучасних систем активної безпеки (ABS, ESP) та експериментальному визначенню їх ефективності в різних дорожніх умовах.

Об'єктом дослідження є процес гальмування та стабілізації руху автомобіля Renault Megane II. Предметом дослідження виступають зміни динамічних характеристик автомобіля під впливом алгоритмів електронних блоків керування на покриттях з різним коефіцієнтом зчеплення.

У роботі проведено теоретичний аналіз конструкції мехатронних систем безпеки. Розроблено математичну модель гальмування («Quarter Car Model») з використанням емпіричної формули взаємодії шини з дорогою (Pacejka's Magic Formula).

Практична частина включає проведення натурних дорожніх випробувань із застосуванням діагностичного сканера Thinkdiag. Досліджено поведінку автомобіля на сухому та мокрому асфальті, гравійному покритті та ґрунтовій дорозі. Експериментально підтверджено збільшення гальмівного шляху на пухких поверхнях при роботі ABS, що компенсується збереженням курсової стійкості автомобіля.

Табл. 5; рис. 14, бібліогр. джерел 20

ЗМІСТ

ЗМІСТ	4
ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АКТИВНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОМОБІЛІВ	9
1.1 Концепція комплексної безпеки транспортного засобу	9
1.2 Аналіз систем керування гальмуванням (ABS, EBD, BAS)	11
1.3 Концепція тертя кола та межі стійкості.....	12
1.4 Функціональна архітектура та взаємодія підсистем	13
1.5 Сенсори системи ESP	14
1.5.1 Датчики частоти обертання коліс	14
1.5.2 Датчик кута повороту керма (<i>Steering Angle Sensor — SAS</i>).....	19
1.5.3 Датчик кутової швидкості ривка (<i>Yaw Rate Sensor</i>) та бічного прискорення	21
1.5.4 Датчик тиску гальмівної рідини.....	22
1.6 Гідравлічний блок керування (HCU)	24
1.6.1 Гідравлічна схема та типи клапанів.....	25
1.6.2 Насосна група	26
1.7 Електронний блок керування (ECU) та алгоритми стабілізації	27
1.7.1 Велосипедна модель (<i>Bicycle Model</i>) та формування еталону.....	28
1.7.2 Проблема кута дрейфу.....	28
1.7.3 Логіка втручання та стратегії гальмування	29
1.7.4 Керування крутним моментом двигуна	30
1.8 Додаткові функції та розширення	30
1.9 Функціональна безпека та діагностика.....	31
1.10 Висновок по розділу	32
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГАЛЬМУВАННЯ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	33

2.1	Математичне моделювання процесу гальмування автомобіля з ABS	33
2.1.1	<i>Динамічні рівняння руху.....</i>	33
2.1.2	<i>Моделювання взаємодії шини з дорогою.....</i>	34
2.1.3	<i>Алгоритм керування ABS в математичній моделі.....</i>	35
2.1.4	<i>Математичне моделювання процесу гальмування без системи ABS (режим повного блокування).....</i>	35
2.2	Характеристика об'єкта дослідження.....	37
2.3	Обґрунтування вибору діагностичного обладнання	37
2.4	Методика проведення дорожніх випробувань.....	38
3	АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	40
3.1	Аналіз динаміки гальмування на сухому асфальтобетонному покритті	40
3.2	Дослідження ефективності на мокрому асфальтобетонному покритті	41
3.3	Аналіз динаміки гальмування на покритті з низьким коефіцієнтом зчеплення (гравій).	42
3.4	Гальмування на польовій (грунтовій) дорозі	44
3.5	Узагальнений порівняльний аналіз.....	45
3.6	Висновки по розділу	46
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	48
4.1	Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів.....	48
4.2	Заходи безпеки при проведенні дорожніх випробувань.....	49
4.3	Гігієна праці та безпека при роботі з ЕОМ	50
4.4	Пожежна безпека	50
4.5	Логіко-імітаційне моделювання виникнення травматизму методом «Дерева відмов».....	51

4.6	Інженерні та організаційні заходи щодо зниження рівня травматизму	53
5	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	55
5.1	Розрахунок собівартості проведення дослідження	55
5.2	Розрахунок економічної ефективності методу діагностики....	56
5.3	Розрахунок попередженого економічного збитку від ДТП.....	56
5.4	Зведені показники економічних розрахунків.....	57
5.5	Висновок по розділу	58
	ВИСНОВКИ.....	60
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	62

ВСТУП

Сучасний автомобільний транспорт розвивається в напрямку тотальної інтелектуалізації та автоматизації процесів керування. Зростання щільності транспортних потоків та підвищення динамічних характеристик автомобілів висувають нові, більш жорсткі вимоги до безпеки дорожнього руху. Статистика дорожньо-транспортних пригод (ДТП) свідчить, що переважна більшість аварій стається через помилки водія або втрату керованості в критичних ситуаціях. У цьому контексті ключову роль відіграють системи активної безпеки (Active Safety Systems), такі як антиблокувальна система (ABS), система розподілу гальмівних зусиль (EBD) та система курсової стійкості (ESP/ESC)[1].

Незважаючи на високу надійність сучасних електронних компонентів, ефективність їх роботи не є константою. Вона критично залежить від зовнішніх факторів, насамперед — від стану дорожнього покриття та коефіцієнта зчеплення шин з дорогою. У реальних умовах експлуатації (особливо на дорогах зі змінним типом покриття: сухий асфальт, мокра дорога, гравій, ґрунт) алгоритми роботи електронних блоків керування (ECU) можуть давати різні результати, що безпосередньо впливає на довжину гальмівного шляху та збереження траєкторії руху.

Тому дослідження ефективності роботи активних систем безпеки шляхом інструментального діагностування їх реакцій на різних типах дорожнього покриття є актуальним науково-практичним завданням, що дозволяє глибше зрозуміти межі можливостей сучасних автомобілів та надати рекомендації щодо безпечної експлуатації.

Метою роботи є підвищення рівня безпеки дорожнього руху шляхом експериментального дослідження ефективності функціонування систем активної безпеки автомобіля в різних дорожніх умовах та розробка рекомендацій щодо оцінки їх технічного стану.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз конструкції та алгоритмів роботи сучасних систем активної безпеки (ABS, EBD, ESP).
2. Обґрунтувати вибір діагностичного методу дослідження для оцінки динамічних параметрів автомобіля.
3. Розробити методику проведення натурних випробувань на дорожніх покриттях з різним коефіцієнтом зчеплення (асфальтобетон, гравійне/грунтове покриття).
4. Експериментально дослідити зміни параметрів руху (швидкість обертання коліс, гальмівний шлях, уповільнення) за допомогою засобів комп'ютерної діагностики (OBD-II сканування в режимі реального часу).
5. Провести порівняльний аналіз отриманих даних та сформулювати висновки щодо ефективності систем у досліджуваних умовах.

Об'єкт дослідження — процес гальмування та стабілізації руху автомобіля, обладнаного сучасними системами активної безпеки.

Предмет дослідження — закономірності зміни ефективності роботи систем активної безпеки (гальмівного шляху та керованості) залежно від типу дорожнього покриття та алгоритмів роботи електронних блоків управління.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АКТИВНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОМОБІЛІВ

Електронна програма стабілізації (ESP — Electronic Stability Program), яка в технічній літературі також класифікується як система динамічної стабілізації автомобіля (VDC — Vehicle Dynamics Control) або електронний контроль стійкості (ESC — Electronic Stability Control), представляє собою одну з найбільш значущих інновацій у сфері активної безпеки автомобільного транспорту. Впровадження цієї системи стало поворотним моментом в історії автомобілебудування, змінивши парадигму керування транспортним засобом від суто механічного зв'язку "водій-автомобіль" до складної мехатронної взаємодії, де електронний асистент постійно моніторить відповідність дій водія фізичним реакціям автомобіля[1-3].

Система ESP була вперше представлена на серійних автомобілях у 1995 році в результаті спільної розробки компаній Robert Bosch GmbH та Mercedes-Benz.[1] Поштовхом до масового впровадження, зокрема в компактному класі, став відомий "лосиний тест" автомобіля Mercedes A-Class у 1997 році, який продемонстрував критичну необхідність активного втручання електроніки для запобігання перекиданню автомобілів з високим центром мас. З того часу технологія стала обов'язковим стандартом у багатьох юрисдикціях, включаючи Європейський Союз (з 2014 року), США та Канаду.¹ Статистичні дані підтверджують ефективність системи: за оцінками дослідників, лише в Європі ESP врятувала понад 15 000 життів станом на 2020 рік, запобігаючи летальним випадкам, пов'язаним із втратою керування та бічним ковзанням[4].

1.1 Концепція комплексної безпеки транспортного засобу

Безпека автомобіля — це властивість транспортного засобу (ТЗ) знижувати ймовірність виникнення дорожньо-транспортних пригод (ДТП), а у випадку їх виникнення — мінімізувати тяжкість наслідків для учасників руху. Сучасна теорія автомобіля розглядає безпеку як комплексну систему, що

складається з чотирьох рівнів, які діють на різних етапах часової шкали аварійної ситуації[5]:

1. Активна безпека (Active Safety). Системи, що діють у штатному режимі руху та в передаварійній фазі. Їхня мета — запобігти зіткненню шляхом втручання в керування (гальмування, рулювання, зміна тягового зусилля).
2. Пасивна безпека (Passive Safety). Конструктивні елементи, що працюють під час удару (ремені, подушки безпеки, зони деформації).
3. Післяаварійна безпека. Заходи щодо евакуації та запобігання загорянню (відстріл клем АКБ, розблокування дверей).
4. Екологічна безпека. Мінімізація шкідливого впливу на довкілля.

Принцип дії активних систем базується на постійному моніторингу параметрів руху (швидкість обертання коліс, кут повороту керма, поперечне прискорення) та миттєвому втручанні в керування при виявленні відхилень від заданої траєкторії.

Превентивна (інтелектуальна) безпека — це еволюція активних систем, відома як ADAS (Advanced Driver Assistance Systems). Ці системи здатні аналізувати навколишнє середовище за допомогою радарів, лідарів та камер, прогнозувати небезпеку та діяти автономно (наприклад, система автоматичного екстреного гальмування АЕВ або утримання в смузі руху LKA)[6].

У контексті даної роботи ключовим об'єктом аналізу є активна безпека, яка базується на властивостях стійкості, керованості та гальмівної динаміки. Ефективність цих систем визначається здатністю утримувати автомобіль у межах коридору руху, заданого водієм, навіть за умов низького коефіцієнта зчеплення (φ)[7].

1.2 Аналіз систем керування гальмуванням (ABS, EBD, BAS)

Найважливішим елементом активної безпеки є антиблокувальна система гальм (ABS — Anti-lock Braking System). Необхідність її застосування зумовлена фізикою процесу гальмування.

Ефективність гальмування залежить від коефіцієнта зчеплення шини з дорогою, який не є лінійною величиною. Він залежить від відносного ковзання колеса (slip ratio, λ). Ковзання визначається формулою[7]:

$$\lambda = \frac{v - \omega \cdot r}{v} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де:

v — лінійна швидкість автомобіля;

ω — кутова швидкість колеса;

r — радіус кочення колеса.

Згідно з діаграмою зчеплення (μ -slip curve), максимальний коефіцієнт зчеплення (пік гальмівної сили) досягається при частковому проковзуванні колеса в межах 15–20%(рис.1.1). При повному блокуванні ($\lambda = 100\%$, рух "юзом") коефіцієнт зчеплення різко падає, і, що найважливіше, коефіцієнт поперечного зчеплення стає близьким до нуля. Це означає, що заблоковані колеса не можуть передавати бічні зусилля, і автомобіль втрачає керуваність.

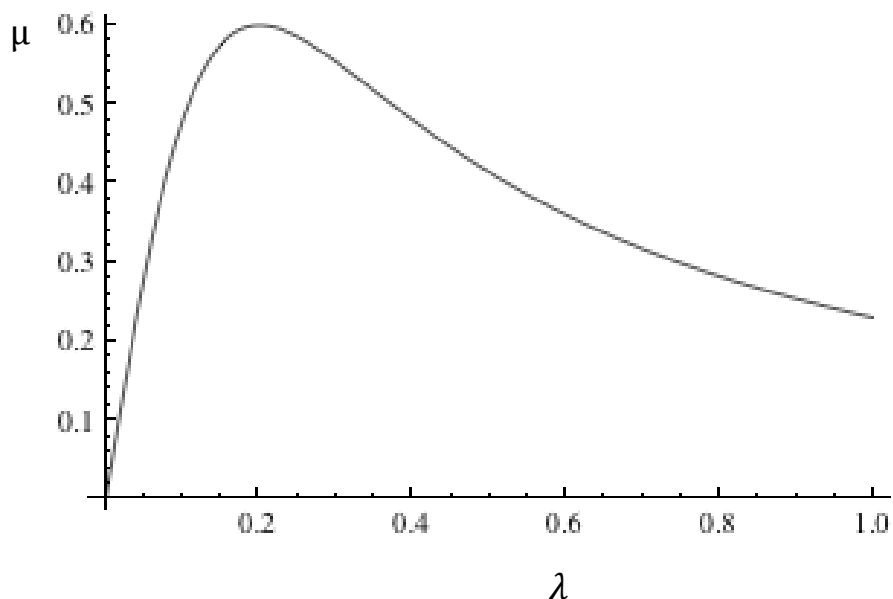


Рисунок 1.1 – Діаграма зчеплення (μ -slip curve)

Сучасні 4-канальні системи ABS використовують індивідуальне керування тиском у кожному гальмівному контурі. Цикл роботи включає три фази, які повторюються з частотою 15–20 Гц[8]:

Зростання тиску. Гідравлічний насос та головний гальмівний циліндр нагнітають тиск до колеса.

Утримання тиску (Hold). Якщо датчик частоти обертання фіксує різке сповільнення колеса (ризик блокування), електронний блок (ECU) закриває впускний клапан, ізолюючи контур.

Скидання тиску (Dump). Якщо колесо продовжує блокуватися, відкривається випускний клапан, і рідина перекачується у гідроаккумулятор, розблоковуючи колесо.

Система ABS стала базою для розширених функцій:

EBD (Electronic Brakeforce Distribution). Програмна надбудова над ABS. Замінює механічний регулятор («колдун»). Вона дозує гальмівні зусилля між осями, запобігаючи блокуванню задніх коліс при неповному завантаженні авто, що зберігає курсову стійкість.

BAS (Brake Assist System). Система допомоги при екстремому гальмуванні. Розпізнає різке натискання на педаль (за швидкістю переміщення штока) і автоматично піднімає тиск у системі до максимуму, навіть якщо водій натиснув педаль недостатньо сильно. Це дозволяє скоротити гальмівний шлях на 15–20%.

1.3 Концепція тертя кола та межі стійкості

Фундаментальним фізичним обмеженням керованості будь-якого колісного транспортного засобу є зчеплення шин з дорожнім покриттям. Ця взаємодія описується концепцією "кола Камма" або кола тертя. Кожна шина здатна передавати обмежену результуючу силу зчеплення F_{res} , яка є векторною сумою поздовжньої сили F_x (гальмування або тяга) та поперечної сили F_y (бічне утримання в повороті).

Математична умова збереження зчеплення виражається нерівністю:

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq \mu \cdot F_z \quad (1.2)$$

де:

μ — коефіцієнт тертя між шиною та дорогою (залежить від типу покриття, стану гуми, температури).

F_z — нормальна реакція опори (вертикальне навантаження на колесо).

Система ESP працює безпосередньо з цим обмеженням. Коли водій виконує екстрений маневр, на шини діють значні бічні сили (F_y). Якщо водій одночасно застосовує гальмування, вектор поздовжньої сили (F_x) зростає. Як тільки результуюча сила виходить за межі кола тертя (μF_z), шина втрачає зчеплення і починає ковзати.

ABS керує силою F_x під час гальмування, не допускаючи повного блокування, щоб залишити невеликий резерв зчеплення для F_y , що забезпечує керованість.

TCS керує силою F_x під час розгону, запобігаючи пробуксовці.

ESP унікальна тим, що вона штучно створює поздовжні сили F_x на окремих колесах не для сповільнення автомобіля, а для створення обертового моменту (yaw moment) навколо вертикальної осі Z , щоб компенсувати втрату поперечної стійкості[8].

1.4 Функціональна архітектура та взаємодія підсистем

Сучасна система стабілізації є модульною програмно-апаратною платформою. Апаратна частина зазвичай об'єднана в єдиний блок (гідравлічний модулятор + Електронний Блок Керування - ECU), але функціонально вона розділена на рівні втручання.

Важливо зазначити, що ESP є системою вищого пріоритету. Вона використовує апаратні ресурси ABS та TCS, але має власні, складніші алгоритми прийняття рішень. Якщо ABS активується лише при натисканні педалі гальм водієм, то ESP є "завжди увімкненою" (always on) системою, яка

постійно порівнює наміри водія з реальною поведінкою машини, навіть при вільному коченні[9].

Таблиця 1.1 – Взаємодія підсистем активної безпеки

Підсистема	Основна функція	Вхідні параметри	Виконавчі дії
ABS (Anti-lock Braking System)	Запобігання блокуванню коліс при гальмуванні	Швидкість коліс	Модуляція тиску (скидання/утримання) на всіх колесах
EBD (Electronic Brake Distribution)	Розподіл гальмівних зусиль	Швидкість коліс, поздовжнє прискорення	Обмеження тиску в задніх контурах
TCS/ASR (Traction Control)	Запобігання пробуксовці ведучих коліс	Швидкість коліс, обerti двигуна	Підгальмовування ведучого колеса, зниження крутного моменту двигуна
ESP/ESC (Electronic Stability Control)	Контроль курсової стійкості та траєкторії	Кут керма, рискання (yaw rate), бічне прискорення, тиск гальм	Вибіркове гальмування будь-якого колеса, активне керування моментом двигуна

1.5 Сенсори системи ESP

Для реалізації алгоритмів стабілізації системі необхідний вичерпний набір даних про кінематичний стан автомобіля. Сенсорний кластер ESP можна розділити на дві категорії: сенсори, що визначають *бажану траєкторію* (намір водія), та сенсори, що вимірюють *фактичний рух* автомобіля.⁶

1.5.1 Датчики частоти обертання коліс

Це фундаментальні елементи системи, які надають інформацію про поздовжню швидкість автомобіля, прискорення/сповільнення кожного колеса та наявність пробуксовки.

Ранні системи ABS використовували пасивні індуктивні датчики. Вони генерували змінний струм синусоїдальної форми при проходженні зубчастого вінця повз магнітний сердечник датчика. Головним недоліком була залежність

амплітуди сигналу від швидкості обертання: на швидкостях нижче 3-5 км/год сигнал ставав занадто слабким для розпізнавання, що унеможливлювало точну роботу системи на наднизьких швидкостях[10].

Пасивні датчики, як випливає з назви, не потребують зовнішнього джерела живлення і зазвичай базуються на індуктивному принципі дії. Вимірювальний вузол складається з двох основних компонентів: нерухомого чутливого елемента та рухомого задаючого елемента. Чутливий елемент являє собою індуктивну котушку (3) з металевим осердям (4) та постійним магнітом (5). Функцію задаючого елемента виконує зубчастий ротор (2), закріплений на маточині колеса (рис. 1.2).

Принцип дії індуктивних датчиків базується на властивості феромагнітних об'єктів впливати на конфігурацію та напруженість магнітного поля. Проходження металевого елемента крізь поле датчика викликає зміну магнітного потоку в котушці, що, згідно із законом електромагнітної індукції, призводить до виникнення електрорушійної сили (ЕРС)[10-13].

Інтенсивність магнітного потоку, що пронизує обмотку, безпосередньо залежить від положення ротора відносно датчика. Коли навпроти сердечника знаходиться зуб диска, магнітний потік концентрується і досягає максимуму. Натомість, коли навпроти датчика проходить впадина (проміжок між зубами), потік слабшає.

Таким чином, обертання зубчастого вінця модулює магнітний потік, генеруючи в обмотці змінну напругу синусоїдальної форми [13]. Важливою характеристикою цього процесу є те, що амплітуда індукованої напруги зростає прямо пропорційно збільшенню кутової швидкості обертання колеса.

Індукція напруги в обмотці датчика відбувається в момент проходження зубів ротора через його магнітне поле. Електронний блок керування розраховує кутову швидкість колеса, базуючись на частоті згенерованих імпульсів за одиницю часу.

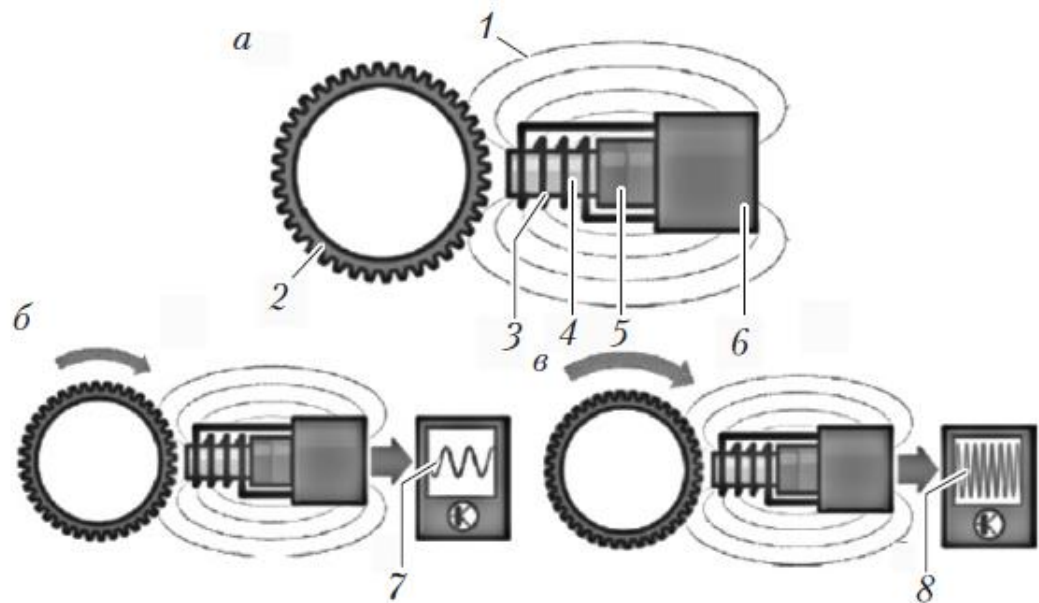


Рисунок 1.2 – Пасивний сенсор частоти обертання :

а — загальна схема конструкції; б — характеристика сигналу за низької частоти обертання; в — характеристика сигналу за високої частоти обертання; 1 — лінії магнітного поля; 2 — задаючий елемент (зубчастий ротор/імпульсний диск); 3 — обмотка котушки індуктивності; 4 — феромагнітне осердя (магнітопровід); 5 — постійний магніт; 6 — корпус чутливого елемента; 7 — осцилограма напруги за низької кутової швидкості; 8 — осцилограма напруги за високої кутової швидкості.

Основною перевагою пасивних індуктивних датчиків є їхня конструктивна простота та надійність. Проте існують суттєві технічні обмеження[16]:

1. Вимоги до монтажу: необхідність підтримання точного повітряного зазору між ротором та чутливим елементом.
2. Масогабаритні показники: такі датчиків зазвичай мають значну вагу та розміри, що ускладнює компонування вузла.
3. Залежність сигналу від швидкості: на відміну від активних сенсорів, у пасивних амплітуда вихідної напруги падає пропорційно зменшенню частоти обертання. Це знижує точність вимірювань на малих швидкостях руху.

Сучасні системи ESP використовують виключно активні датчики, що базуються на ефекті Холла або магніторезистивному ефекті.

На відміну від пасивних аналогів, активні датчики частоти обертання потребують зовнішнього джерела живлення (зазвичай напругою 12 В). Їхня робота базується на використанні ефекту Холла або магніторезистивного ефекту.

Конструкція вимірювального вузла складається з двох ключових елементів: нерухомого датчика та задаючого елемента (рис. 1.3). Датчик інтегрує в собі чутливий елемент та електронну схему обробки сигналу. Роль задаючого елемента виконує багатополіусне магнітне кільце (магнітний енкодер), виготовлене з полімерного матеріалу з вкрапленням феромагнітних частинок. Поверхня кільця розділена на сектори з чередуванням північного (N) та південного (S) полюсів, які функціонально замінюють зуби та впадини традиційних металевих роторів.

Принцип дії магніторезистивних датчиків ґрунтується на зміні електричного опору в тонких шарах феромагнітних та неферомагнітних матеріалів під дією зовнішнього магнітного поля (квантово-механічний ефект).

Під час обертання колеса магнітне поле задаючого кільця, що змінює свою полярність, впливає на чутливий елемент. У датчиках Холла це викликає зміну електрорушійної сили (ЕРС), а в магніторезистивних — зміну внутрішнього опору. Електронна схема перетворює ці зміни на вихідний сигнал. Частота зміни напруги на виході датчика прямо пропорційна швидкості обертання колеса.

Ключовою перевагою активних датчиків є стабільність вихідного сигналу у всьому діапазоні швидкостей. На відміну від пасивних аналогів, амплітуда їхнього сигналу не залежить від частоти обертання, а визначається параметрами зовнішнього живлення та внутрішньої електронної схеми[16].

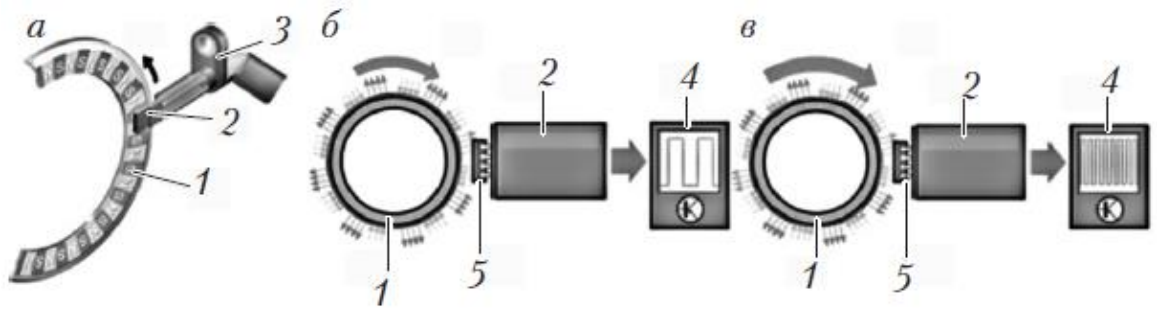


Рисунок 1.3 – Будова та характеристики активного датчика частоти обертання:

а — загальна схема компонування; б — сигнал за низької частоти обертання; в — сигнал за високої частоти обертання; 1 — задаючий елемент (багатополіусне магнітне кільце); 2 — інтегрована електронна схема обробки сигналу; 3 — корпус датчика; 4 — осцилограма вихідного сигналу (прямокутні імпульси); 5 — чутливий елемент магнітного поля (датчик Холла або магнітрезистор).

Завдяки мініатюрним розмірам, такі датчики можуть бути інтегровані безпосередньо в конструкцію підшипника маточини колеса, що спрощує компонування вузла. Цифрова природа сигналу розширює функціональні можливості системи, дозволяючи не лише фіксувати факт обертання з високою точністю (навіть на наднизьких швидкостях), але й розпізнавати напрямок руху та момент повної зупинки [14].

Сучасні датчики передають дані за протоколом струмової петлі (наприклад, 7 мА — низький рівень, 14 мА — високий рівень). Окрім інформації про швидкість (частота імпульсів), ширина імпульсів може кодувати додаткову інформацію, таку як напрямок обертання (важливо для запобігання відкату), величину повітряного зазору та діагностичні дані про стан сенсора.

Основним експлуатаційним недоліком є складність діагностики: перевірити працездатність активного датчика простим вимірюванням опору (омметром) неможливо, оскільки він являє собою електронну мікросхему, а не пасивну котушку.

Конструктивне розміщення датчиків частоти обертання залежить від компонування автомобіля. Вони можуть встановлюватися на приводних валах (півосях), на хвостовику головної передачі (у задньопривідних моделях), на поворотних цапфах (рис. 1.4, а) або бути інтегрованими безпосередньо в корпус маточини колеса (рис. 1.4, б).

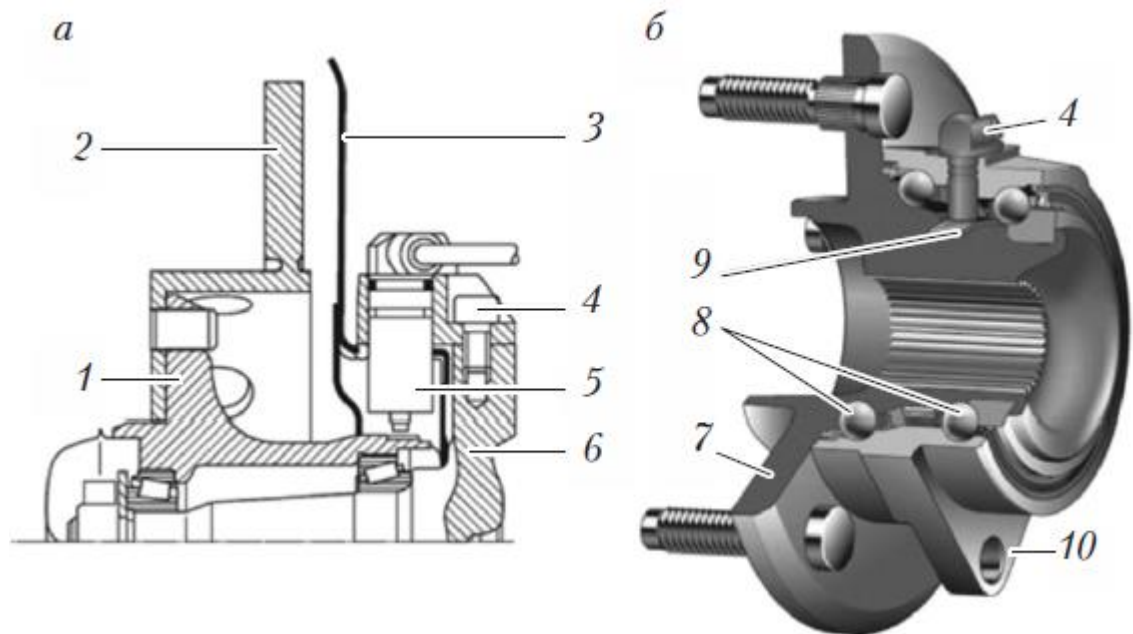


Рисунок 1.4 - Варіанти встановлення датчиків частоти обертання колеса:

а — монтаж індуктивного датчика на поворотній цапфі; б — інтеграція датчика в маточину колеса; 1 — гальмівний диск; 2 — корпус передньої маточини; 3 — захисний кожух (пильовик); 4 — кріпильний гвинт (під внутрішній шестигранник); 5 — датчик (сенсор); 6 — поворотна цапфа (кулак); 7 — фланець маточини для кріплення колеса; 8 — тіла кочення підшипника (кульки); 9 — задаючий елемент (імпульсне кільце сенсора); 10 — фланець кріплення до елементів підвіски.

1.5.2 Датчик кута повороту керма (Steering Angle Sensor — SAS)

Цей сенсор визначає, куди водій має намір спрямувати автомобіль. Він встановлюється на рульовій колонці, зазвичай у блоці підрульових перемикачів (Clock Spring module)[5].

Конструктивні реалізації:

1. Оптичні енкодери використовують диск з кодованими прорізами (код Грея або інкрементальні доріжки) та оптопари (світлодіод/фототранзистор). Обертання диска перериває промінь світла, генеруючи послідовність імпульсів. Для визначення "абсолютного нуля" (центрального положення керма) використовуються додаткові мітки або лічильники повних обертів.

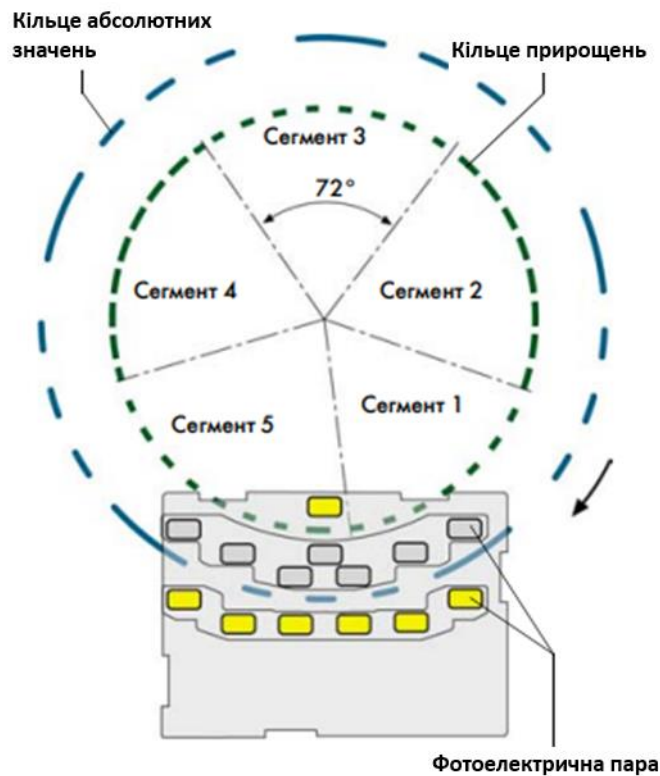


Рисунок 1.5 – Типова будова оптичного датчика положення керма

2. Магнітні (Hall/AMR/GMR) датчики: є найбільш поширеними в сучасних автомобілях завдяки стійкості до пилу та вібрацій.
 - *Принцип ноніуса:* основна шестерня на валу керма обертає дві менші вимірювальні шестерні з різною кількістю зубців. Кожна мала шестерня містить магніт, положення якого зчитується магніторезистивним датчиком (GMR - Giant Magnetoresistance або AMR - Anisotropic Magnetoresistance).
 - *Алгоритм:* оскільки передавальні числа різні, фазовий зсув між сигналами двох шестерень є унікальним для кожного кута повороту в

межах декількох повних обертів керма. Це дозволяє мікроконтролеру миттєво обчислити абсолютний кут повороту (наприклад, $+365^\circ$) без необхідності руху кермом для ініціалізації після запуску.

1.5.3 Датчик кутової швидкості рискання (Yaw Rate Sensor) та бічного прискорення

Ці датчики є "вестибулярним апаратом" системи ESP. Вони вимірюють фактичну реакцію автомобіля на дії водія. Раніше вони встановлювалися як окремі блоки в центрі мас автомобіля (біля важеля КПП), але в сучасних системах інтегруються в єдиний кластер (Inertial Sensor Cluster - ISC) або безпосередньо в блок керування подушками безпеки (Airbag ECU) чи гідроблок ESP[7].

- А. Мікромеханічний гіроскоп (Yaw Rate Sensor)

Вимірює кутову швидкість ω_z навколо вертикальної осі автомобіля (вісь Z). Сучасні датчики є представниками технології MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems).

Фізичний принцип дії полягає у використанні ефекту Коріоліса.

У MEMS-гіроскопах не використовуються обертові маховики. Замість цього використовується вібруюча маса (осцилюючий елемент)[11].

1. Режим збудження (Drive Mode): кремнієва маса (часто у формі камертона або кільця) приводиться в коливальний рух уздовж однієї осі за допомогою електростатичних сил (гребінчасті приводи) на резонансній частоті.
2. Виникнення сили Коріоліса: коли автомобіль починає обертатися навколо вертикальної осі з кутовою швидкістю Ω , на вібруючу масу діє сила Коріоліса:

$$\vec{F}_c = -2m(\vec{\Omega} \times \vec{v}) \quad (1.3)$$

де $\vec{v}$ — вектор лінійної швидкості вібрації маси.

3. Режим зчитування (Sense Mode): сила Коріоліса перпендикулярна як до осі вібрації, так і до осі обертання автомобіля. Вона змушує масу відхилятися в третьому напрямку (або змінювати площину коливань).

4. Детекція: це вторинне відхилення змінює відстань між пластинами вимірювального конденсатора. Зміна ємності (порядку фемтофарад) реєструється електронікою, підсилюється і перетворюється на вихідний сигнал, пропорційний швидкості riskання.

- Б. Датчик поперечного прискорення (Lateral Acceleration Sensor)

Вимірює бічні сили a_y , що діють на автомобіль (відцентрова сила, сила тяжіння при нахилі).

Конструкція: MEMS-акселерометр ємнісного типу. Він складається з інерційної маси ("proof mass"), підвішеної на пружних кремнієвих пружинах. При виникненні прискорення маса зміщується за інерцією, змінюючи зазори в диференціальній конденсаторній структурі. Електроніка перетворює зміну ємності в напругу.

Inertial Measurement Unit (IMU) 6DoF:

Останні покоління сенсорів (наприклад, Bosch SMI серії або Panasonic 6in1) являють собою 6-осьові інерційні модулі (6 Degrees of Freedom). Вони містять три акселерометри (X, Y, Z) і три гіроскопи (Yaw, Pitch, Roll). Це дозволяє не тільки стабілізувати курс, але й виявляти загрозу перекидання (Rollover Mitigation), аналізуючи крен кузова, а також компенсувати похибки вимірювань при русі по нахилених поверхнях (банкінгах).

1.5.4 Датчик тиску гальмівної рідини

Інтегрований у гідравлічний блок. У системах ABS для контролю тиску робочої рідини використовуються датчики п'єзоелектричного та ємнісного типів. П'єзоелектричний датчик зазвичай монтується безпосередньо на гідравлічному блоці (модуляторі). Його основна функція — вимірювання миттєвого значення тиску в гальмівному контурі та передача цієї інформації до електронного блоку керування (ЕБК)[11,12].

Отримані дані дозволяють ЕБК розраховувати гальмівні моменти на колесах, а також оцінювати поздовжні сили, що діють на транспортний засіб. Ця інформація є критично важливою для реалізації алгоритмів курсової стійкості, зокрема під час гальмування в повороті.

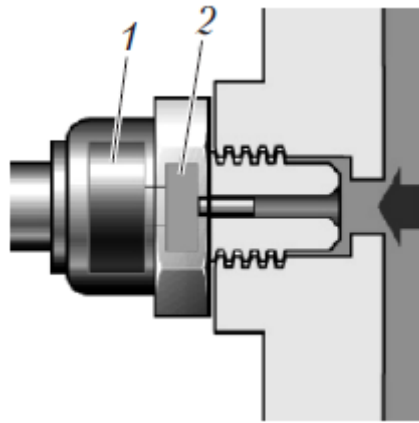


Рисунок 1.6 — Конструкція п'єзоелектричного датчика тиску:

1 — електронний модуль обробки сигналу; 2 — чутливий п'єзоелектричний елемент.

Конструктивно пристрій складається з двох ключових вузлів (рис. 1.5): електронного модуля (1) та чутливого п'єзоелектричного елемента (2), який безпосередньо контактує з гальмівною рідиною. Принцип роботи базується на прямому п'єзоелектричному ефекті: під дією гідравлічного тиску відбувається перерозподіл електричного заряду в кристалі, що призводить до виникнення напруги, пропорційної величині тиску [13].

Альтернативою п'єзоелектричним пристроям у гальмівних системах виступають ємнісні датчики тиску (рис. 1.6). Принцип їхньої роботи базується на властивостях плоского конденсатора, здатного накопичувати електричний заряд. Конструктивно чутливий елемент складається з двох пластин (обкладок), розділених відстанню s , що визначає початкову електричну ємність C .

Одна з пластин зафіксована нерухомо, тоді як інша є рухомою мембраною, що сприймає тиск гальмівної рідини. Під дією тиску мембрана деформується, наближаючись до нерухомої обкладки (відстань зменшується до значення s_1). Згідно із законами фізики, зменшення відстані між обкладками призводить до збільшення електричної ємності конденсатора до значення C_1 .

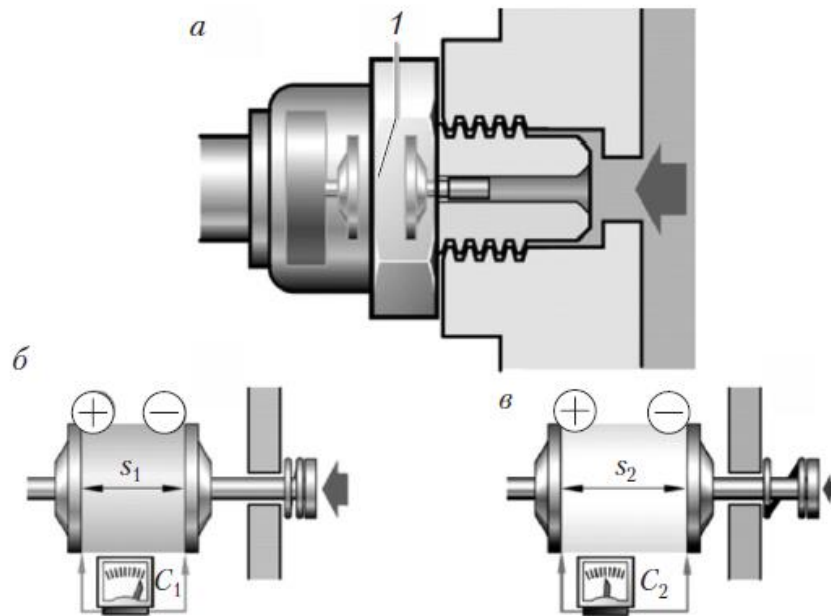


Рисунок 1.7 – Принцип роботи ємнісного датчика тиску:

а — принципова схема; б — стан при збільшенні тиску; в — стан при зниженні тиску; 1 — корпус датчика; s_1, s_2 — відстань між обкладками (пластинами); C_1, C_2 — електрична ємність конденсатора.

При зниженні тиску поворотна пружина повертає рухому пластину у вихідне положення, збільшуючи зазор і, відповідно, зменшуючи ємність. Таким чином, зміна ємності датчика знаходиться у прямій функціональній залежності від величини тиску в системі.

1.6 Гідравлічний блок керування (HCU)

Гідроблок ESP є складним електрогідравлічним пристроєм, який фізично реалізує команди електроніки. На відміну від ABS, яка може лише *знижувати* або *утримувати* тиск, гідроблок ESP повинен вміти активно створювати тиск вище того, що задає водій (або взагалі без участі водія).

Типова гідравлічна схема блоку для одного колеса наведена на рис.1.8.

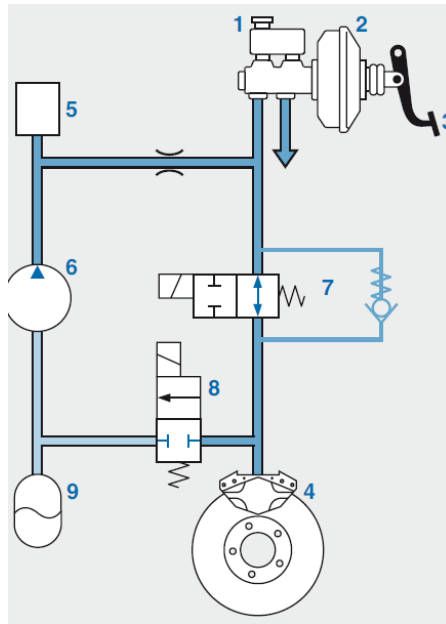


Рисунок 1.8 – Гідравлічна схема контуру системи ABS:

- 1 — Головний гальмівний циліндр із бачком; 2 — Підсилювач гальм (вакуумний підсилювач); 3 — Педаль гальма; 4 — Гальмівний механізм колеса з робочим циліндром; Гідравлічний модулятор (гідроблок), що складається з: 5 — Демпферна камера (камера згладжування пульсацій); 6 — Насос зворотної подачі; 7 — Впускний клапан; 8 — Випускний клапан; 9 — Акумулятор гальмівної рідини (гідроаккумулятор).

1.6.1 Гідравлічна схема та типи клапанів

Типова архітектура ESP (наприклад, Bosch 8.x/9.x або Continental MK100) є двоконтурною діагональною (X-подібною). Кожен контур обслуговує два колеса (наприклад, ліве переднє та праве заднє). Для забезпечення функціональності ESP до стандартної схеми ABS додаються специфічні клапани.

Для кожного з чотирьох коліс існують:

1. Впускний клапан (Inlet Valve - IV): Нормально відкритий (NO). Пропускає рідину до колеса. Керується ШІМ (PWM) для точного дозування тиску.
2. Випускний клапан (Outlet Valve - OV): Нормально закритий (NC). Відкривається для скидання тиску в акумулятор низького тиску.

Для кожного з двох контурів додаються два критично важливих клапани ESP:

3. Перемикаючий клапан / Клапан відсічки (Switchover Valve / Isolation Valve - SV):

* Тип: нормально відкритий (NO).

* Функція: розташований між головним гальмівним циліндром (ГГЦ) та впускними клапанами коліс. При активації насоса ESP цей клапан закривається, фізично від'єднуючи педаль гальм водія від контуру нагнітання. Це необхідно для того, щоб насос міг створити високий тиск на колесах, не віддаючи рідину назад у бачок через педаль ("зворотний удар"), і щоб водій не відчував провалу педалі.

4. Всмоктуючий клапан / Клапан високого тиску (High Pressure Switching Valve - HSV / Pilot Valve):

* Тип: нормально закритий (NC).

* Функція: відкриває обхідний канал, що з'єднує бачок гальмівної рідини (через ГГЦ) безпосередньо з входом насоса. Це дозволяє насосу "засмоктувати" рідину для активного гальмування.

1.6.2 Насосна група

У системі ABS насос (Return Pump) використовується лише для відкачування рідини з акумуляторів низького тиску назад у магістраль (щоб розблокувати колеса). У системі ESP вимоги до насоса значно вищі. Він повинен бути самовсмоктуючим (Self-priming), оскільки повинен здатний зтягнути холодну в'язку гальмівну рідину з бачка через тонкі трубки за лічені мілісекунди. Використовуються багатопоршнєві (часто 6-поршнєві) ексцентрикові насоси для забезпечення плавності потоку та зниження шуму (NVH)[15].

У табл.1.2 наведемо основні режими роботи гідравлічного контура системи активної безпеки автомобіля.

Таблиця 1.2 – Режими роботи гідравліки

Режим	Дія водія	Стан SV	Стан HSV	Стан IV	Стан OV	Насос	Опис процесу
Звичайне гальмування	Натискає	Відкр (0)	Закр (0)	Відкр (0)	Закр (0)	Вимк	Тиск від ноги проходить напряму до коліс.
ABS (скидання)	Натискає (сильно)	Відкр (0)	Закр (0)	Закр (1)	Відкр (1)	Увімк	Рідина скидається в акумулятор, насос повертає її в лінію (пульсація педалі).
ESP (Активне створення тиску)	Не натискає / Натискає	Закр (1)	Відкр (1)	Керування ШІМ	Закр (0)	Увімк	SV ізолює педаль. HSV відкриває шлях з бачка. Насос нагнітає тиск. IV потрібного колеса залишається відкритим, IV інших коліс закриваються.

Таблиця демонструє, що саме комбінація закриття SV та відкриття HSV перетворює гальмівну систему з пасивної гідравліки на активний генератор тиску.

1.7 Електронний блок керування (ECU) та алгоритми стабілізації

ECU є "мозком" системи, що виконує складні обчислення в реальному часі. Цикл керування зазвичай триває близько 20 мілісекунд (50 Гц).

Архітектура програмного забезпечення базується на порівнянні еталонної моделі з реальним станом[5].

1.7.1 Велосипедна модель (Bicycle Model) та формування еталону

Для визначення того, як автомобіль повинен поводитися згідно з бажанням водія, ECU використовує математичну модель, відому як "одноколійна" або "велосипедна модель" (Single-track model). У цій спрощеній моделі два колеса однієї осі об'єднуються в одне уявне колесо, розташоване на поздовжній осі симетрії.

Розрахунок бажаної швидкості riskання ($\dot{\psi}_{ref}$):

На основі поточної швидкості автомобіля v_x (з датчиків коліс) та кута повороту керма δ (з SAS), ідеальна кутова швидкість розраховується за формулою:

$$\dot{\psi}_{ref} = \frac{v_x \cdot \delta}{L \cdot (1 + K_{us} \cdot v_x^2)} \quad (1.4)$$

де:

L — колісна база автомобіля.

K_{us} — градієнт недостатньої повертаності (Understeer Gradient), конструктивний параметр, що залежить від жорсткості шин, розвагу ваги та кінематики підвіски.

Ця формула враховує геометрію Аккермана та природну схильність автомобіля до недостатньої повертаності на високих швидкостях. Отримане значення $\dot{\psi}_{ref}$ обмежується фізично можливим максимумом, визначеним коефіцієнтом зчеплення μ (оцінюється системою), оскільки автомобіль не може повертати швидше, ніж дозволяє.

1.7.2 Проблема кута дрейфу

ESP має доступ до вимірної швидкості riskання $\dot{\psi}_{actual}$ (від гіроскопа). Однак для повної картини стабільності критично важливим є кут дрейфу автомобіля (β / sideslip angle) — кут між поздовжньою віссю автомобіля та вектором його швидкості в центрі мас.

Великий кут β означає, що автомобіль рухається "боком" (глибокий занос).

Пряме вимірювання β вимагає дорогих оптичних кореляційних датчиків, які не використовуються в серійних авто. Тому ESP використовує спостерігач стану (State Observer) — алгоритм (зазвичай на базі розширеного фільтра Калмана - EKF), який оцінює β шляхом інтегрування різниці між даними акселерометра та гіроскопа:

$$a_y = v_x(\dot{\psi} + \dot{\beta}) \Rightarrow \dot{\beta} \approx \frac{a_y}{v_x} - \dot{\psi} \quad (1.5)$$

Інтегруючи $\dot{\beta}$ з часом, система отримує оцінку кута дрейфу. Фільтр Калмана дозволяє компенсувати дрейф інтегратора та шуми датчиків, коригуючи модель на основі відомих фізичних обмежень.

1.7.3 Логіка втручання та стратегії гальмування

Контролер ESP постійно обчислює помилку розбіжності між бажаним та дійсним станом:

$$\Delta\dot{\psi} = \dot{\psi}_{actual} - \dot{\psi}_{ref} \quad (1.6)$$

Якщо ця помилка (разом з оцінкою β) перевищує порогові значення, активується режим стабілізації. Вибір стратегії залежить від типу втрати стійкості[2].

- **А. Недостатня повертаність (Understeer) - "Знесення"**

Ситуація: автомобіль повертає менше, ніж хоче водій (їде прямо в повороті). Передня вісь втрачає зчеплення.

Математично: $|\dot{\psi}_{actual}| < |\dot{\psi}_{ref}|$.

Дія ESP: гальмування внутрішнього заднього колеса.

Фізика процесу: гальмування заднього внутрішнього колеса створює додатковий обертальний момент, спрямований в бік повороту. Це допомагає "закрутити" автомобіль у поворот, компенсуючи ковзання передньої осі. Одночасно система може зменшити тягу двигуна.

- **Б. Надлишкова повертаність (Oversteer) - "Занос"**

Ситуація: автомобіль повертає більше, ніж треба (задню вісь заносить назовні).

Математично: $|\dot{\Psi}_{actual}| > |\dot{\Psi}_{ref}|$ або швидке зростання кута β .

Дія ESP: гальмування зовнішнього переднього колеса.

Фізика процесу: гальмування зовнішнього переднього колеса створює потужний контр-момент, спрямований проти обертання заносу. Оскільки це колесо знаходиться на зовнішньому радіусі та завантажене вагою автомобіля (через крен), гальмування на ньому є найбільш ефективним способом стабілізації. Це створює ефект "якоря", навколо якого автомобіль вирівнюється[16].

1.7.4 Керування крутним моментом двигуна

Паралельно з гідравлічним втручанням, ECU ESP надсилає високопріоритетний запит через шини CAN (Controller Area Network) до блоку керування двигуном (ECM/ECU). У протоколі SAE J1939 (для комерційного транспорту) або аналогічних легкових протоколах це повідомлення типу "Torque Reduction Request".

Дії двигуна:

1. Зменшення кута відкриття електронної дросельної заслонки.
 2. Зміна кута випередження запалювання (для миттєвого зниження моменту).
 3. Відключення подачі палива (впорскування) в окремі циліндри.
- Це необхідно для відновлення зчеплення ведучих коліс, оскільки шина, що буксує, не має бічної стійкості.

1.8 Додаткові функції та розширення

Потужна апаратна база ESP (насос, клапани, датчики) дозволила реалізувати низку додаткових функцій комфорту та безпеки, які є суто програмними надбудовами:

1. **HHC (Hill Hold Control):** утримання тиску в гальмах протягом 2-3 секунд після відпускання педалі на схилі. Використовує датчик поздовжнього прискорення та клапани IV/OV.
2. **BDW (Brake Disc Wiping):** під час дощу (сигнал від датчика дощу/двірників) ESP періодично непомітно притискає колодки до дисків для видалення водяної плівки, забезпечуючи миттєву реакцію гальм.
3. **HBA (Hydraulic Brake Assist):** якщо датчик тиску фіксує дуже різке, але недостатньо сильне натискання на педаль (паніка), ESP миттєво піднімає тиск до максимуму, активуючи ABS, що скорочує гальмівний шлях.
4. **ROM (Rollover Mitigation):** алгоритм, що використовує гіроскоп крену (Roll rate) для виявлення загрози перекидання. Система різко гальмує переднє зовнішнє колесо з проковзуванням, щоб розширити радіус повороту і зменшити відцентрову силу.

1.9 Функціональна безпека та діагностика

Згідно зі стандартом ISO 26262, ESP класифікується як система рівня ASIL D (найвищий рівень ризику). Відмова системи під час активного гальмування одного колеса може призвести до розвороту автомобіля на прямій дорозі.

Тому система має багаторівневу діагностику:

- **Перевірка правдоподібності (Plausibility Check):** якщо датчик кута керма показує рух прямо, а датчик рискання показує обертання — це конфлікт. Система перевіряє сигнали датчиків коліс. Якщо різниці швидкостей коліс немає, робиться висновок про несправність датчика рискання.
- **Електричний контроль:** ECU постійно моніторить опір обмоток соленоїдів клапанів та споживання струму насосом.
- **Failsafe:** у разі виявлення критичної помилки система ESP повністю вимикається, запалюючи попереджувальну лампу на панелі приладів. При цьому базова гальмівна система (гідравліка від педалі) залишається повністю робочою, а часто і функція ABS (якщо відмова не стосується спільних компонентів).

1.10 Висновок по розділу

Система курсової стійкості (ESP) є вершиною еволюції гідравлічних гальмівних систем. Вона трансформувала автомобіль з пасивного механізму, що підкоряється законам інерції, в активного робота, здатного протидіяти помилкам керування. Поєднання прецизійних мікромеханічних датчиків (MEMS), здатності миттєво генерувати гідравлічний тиск без участі людини та складних алгоритмів оцінки станів дозволяє системі утримувати автомобіль на дорозі в ситуаціях, які раніше вважалися безнадійними. З розвитком технологій ESP інтегрується з електричними підсилювачами гальм (iBooster) та системами автономного керування, стаючи основним виконавчим органом для керування траєкторією безпілотних автомобілів.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГАЛЬМУВАННЯ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Математичне моделювання процесу гальмування автомобіля з ABS

Для аналізу динаміки гальмування та розуміння алгоритмів керування, які реалізовані в блоці ABS, доцільно розглянути спрощену математичну модель руху одного колеса ("Quarter Car Model")[6].

Система розглядається як тверде тіло (автомобіль масою M), що рухається з лінійною швидкістю v , та колесо з моментом інерції J , що обертається з кутовою швидкістю ω .

2.1.1 Динамічні рівняння руху

Процес гальмування описується системою диференціальних рівнянь, що враховують баланс сил та моментів.

1. Рівняння поступального руху автомобіля:

Зміна швидкості автомобіля залежить від сумарної гальмівної сили, що виникає в плямі контакту шин з дорогою:

$$m \frac{dv}{dt} = -F_x - F_{air} - F_{roll} \quad (2.1)$$

де:

m — маса, що припадає на одне колесо (чверть маси авто), кг;

F_x — поздовжня реакція дороги (гальмівна сила), Н;

F_{air} — сила аеродинамічного опору (можна знехтувати при низьких швидкостях), Н;

F_{roll} — сила опору коченню, Н.

2. Рівняння обертального руху колеса:

Динаміка обертання колеса під час гальмування описується різницею між гальмівним моментом, прикладеним системою, та моментом від сили зчеплення з дорогою:

$$J \frac{d\omega}{dt} = F_x \cdot r - T_b \quad (2.2)$$

де:

J — момент інерції колеса, кг·м²;

ω — кутова швидкість колеса, рад/с;

r — динамічний радіус колеса, м;

T_b — гальмівний момент, що створюється гальмівним механізмом (залежить від тиску в системі P), Н·м.

2.1.2 Моделювання взаємодії шини з дорогою

Ключовим параметром для роботи ABS є коефіцієнт відносного ковзання (Slip Ratio, λ). Він визначає, наскільки швидкість обертання колеса відрізняється від швидкості руху автомобіля[6]:

$$\lambda = \frac{v - \omega \cdot r}{v} \quad (2.3)$$

- Якщо $\lambda = 0$ — вільне кочення.
- Якщо $\lambda = 1$ — повне блокування (колесо не обертається, $\omega = 0$, авто рухається).

Гальмівна сила F_x не є постійною, вона залежить від нормальної реакції опори N (ваги на колесо) та коефіцієнта зчеплення μ , який є нелінійною функцією від ковзання λ :

$$F_x = \mu(\lambda) \cdot N \quad (2.4)$$

Для аналітичного опису залежності $\mu(\lambda)$ у сучасній теорії автомобіля найчастіше використовується емпірична «Магічна формула» Пачейки (Pacejka's Magic Formula):

$$\mu(\lambda) = D \cdot \sin\left(C \cdot \arctan\left(B \cdot \lambda - E \cdot (B \cdot \lambda - \arctan(B \cdot \lambda))\right)\right) \quad (2.5)$$

де коефіцієнти B, C, D, E залежать від типу дорожнього покриття та характеристик шини.

2.1.3 Алгоритм керування ABS в математичній моделі

Завданням блоку керування ABS є утримання значення λ в межах оптимального діапазону ($\lambda_{opt} \approx 0.15 \dots 0.20$), де функція $\mu(\lambda)$ досягає максимуму (D).

Математично закон керування тиском у гальмівному циліндрі можна представити як функцію від прискорення колеса $\dot{\omega}$ та ковзання λ . У спрощеному вигляді алгоритм працює за пороговою логікою:

1. Фаза наростання тиску: якщо $\dot{\omega} > a_{min}$ та $\lambda < \lambda_{threshold} \rightarrow \frac{dT_b}{dt} > 0$.
2. Фаза утримання: якщо $\dot{\omega} \approx 0$ (початок блокування) $\rightarrow \frac{dT_b}{dt} = 0$.
3. Фаза скидання: якщо $\dot{\omega} < a_{critical}$ (різке сповільнення колеса) або $\lambda > \lambda_{opt} \rightarrow \frac{dT_b}{dt} < 0$.

Саме ці фази зміни T_b (гальмівного моменту) ми і будемо спостерігати на графіках зміни швидкості коліс у практичній частині роботи.

2.1.4 Математичне моделювання процесу гальмування без системи ABS (режим повного блокування)

У випадку відсутності або відмови системи ABS, тиск у гальмівному приводі P прямо пропорційний зусиллю, яке водій прикладає до педалі, і не обмежується електронікою. Критичним режимом є гальмування "юзом" (Locked Wheel Braking).

Умова виникнення блокування:

Блокування колеса настає в момент, коли гальмівний момент T_b перевищує момент зчеплення шини з дорогою:

$$T_b > R_z \cdot \varphi_{max} \cdot r_d \quad (2.6)$$

де:

T_b — гальмівний момент механізму, Н·м;

R_z — нормальна реакція опорної поверхні (вага, що припадає на колесо), Н;

φ_{max} — максимальний коефіцієнт зчеплення (тертя спокою);

r_d — динамічний радіус колеса.

Динаміка заблокованого колеса:

Як тільки виконується умова блокування, кутове сповільнення колеса $\dot{\omega}$ різко зростає, і кутова швидкість ω швидко падає до нуля, тоді як швидкість автомобіля v залишається додатною ($v > 0$).

У цьому стані коефіцієнт відносного ковзання стає максимальним:

$$\lambda = \frac{v - 0}{v} = 1 \quad (2.7)$$

Зміна сил при блокуванні:

Згідно з характеристикою шини (μ -slip curve), при переході від кочення ($\lambda \approx 0.15$) до ковзання ($\lambda = 1.0$) відбуваються дві критичні зміни:

1. Падіння поздовжньої сили: коефіцієнт тертя ковзання φ_{slide} зазвичай менший за коефіцієнт тертя спокою φ_{max} (особливо на асфальті).

Рівняння руху набуває вигляду:

$$m \frac{dv}{dt} = -R_z \cdot \varphi_{slide} \quad (2.8)$$

Оскільки $\varphi_{slide} < \varphi_{max}$, ефективність гальмування знижується.

2. Втрата поперечної стійкості (Критичний фактор):

Найнебезпечнішим наслідком блокування є падіння поперечного коефіцієнта зчеплення φ_y до нуля.

$$F_y(\lambda = 1) \approx 0 \quad (2.9)$$

Це означає, що заблоковане колесо втрачає здатність сприймати бічні сили.

- Якщо заблоковані передні колеса: автомобіль втрачає керованість (не реагує на поворот керма), рухаючись по інерції прямо.
- Якщо заблоковані задні колеса: найменше бічне обурення (вітер, нахил дороги) викликає обертальний момент навколо вертикальної осі, що призводить до неконтрольованого заносу.

Математичний висновок: порівняння двох моделей показує, що без зворотного зв'язку (яким є ABS), система є нестійкою. Незначне перевищення гальмівного моменту призводить до лавиноподібного переходу в стан

ковзання, вихід з якого можливий лише при повному відпусканні педалі гальма водієм.

2.2 Характеристика об'єкта дослідження

В якості об'єкта для проведення натурних випробувань обрано автомобіль Renault Megane II. Цей транспортний засіб є репрезентативним представником сучасного С-класу, оснащеним комплексною системою активної та пасивної безпеки.

Технічні характеристики досліджуваного автомобіля:

- Тип гальмівної системи: Гідравлічна, двоконтурна (діагональний розподіл), з вакуумним підсилювачем.
- Гальмівні механізми: Дискові на всіх колесах (передні — вентильовані).
- Система активної безпеки: Автомобіль обладнано модулем ABS/ESP виробництва компанії Bosch (покоління 8.0 або 8.1). Цей блок об'єднує функції антиблокувальної системи (ABS), системи розподілу гальмівних зусиль (EBD) та системи допомоги при екстреному гальмуванні (BAS).
- Схема підвіски: Передня — типу McPherson, задня — напівзалежна торсіонна балка. Конструкція підвіски безпосередньо впливає на кінематику коліс при гальмуванні та роботу датчиків частоти обертання.

Вибір даного автомобіля обґрунтований наявністю повноцінного доступу до блоку ABS через діагностичний роз'єм OBD-II, що дозволяє зчитувати параметри руху в реальному часі без встановлення додаткового зовнішнього обладнання.

2.3 Обґрунтування вибору діагностичного обладнання

Для збору експериментальних даних використовується професійний діагностичний сканер Thinkdiag (виробник ThinkCar). На відміну від аматорських адаптерів на базі чіпа ELM327, Thinkdiag працює з оригінальними заводськими протоколами Renault, що забезпечує:

1. Високу частоту опитування (Sampling Rate): Дозволяє фіксувати швидкоплинні процеси (зміни швидкості колеса під час роботи ABS відбуваються за мілісекунди).
2. Доступ до специфічних PID (Parameter IDs): Можливість зчитувати не лише загальну швидкість, а й тиск у гальмівному контурі, статус клапанів ABS, кут повороту керма та показники акселерометра.
3. Функція "Live Data Stream" (Потік даних): Запис параметрів у графічному вигляді для подальшого аналізу на ПК.

Програмне забезпечення:

Для керування сканером та запису логів використовується мобільний термінал (планшет/смартфон) з встановленим ПЗ ThinkDiag+ (або аналог Diagzone PRO). Експорт даних здійснюється у форматі .csv для подальшої обробки в середовищі Excel або MATLAB.

2.4 Методика проведення дорожніх випробувань

Експеримент спрямований на дослідження ефективності гальмування на покриттях з різним коефіцієнтом зчеплення (φ).

Умови проведення експерименту:

- Локація: Закрита ділянка дороги або спеціалізований майданчик, що виключає появу стороннього транспорту.
- Типи дорожнього покриття:
 1. *Сухий асфальт*: $\varphi \approx 0.7 - 0.8$.
 2. *Мокрий асфальт*: $\varphi \approx 0.5 - 0.6$.
 3. *Дорога з низьким зчепленням (гравій)*: $\varphi \approx 0.3 - 0.4$.
 4. *Польова дорога*: $\varphi \approx 0.2 - 0.3$.
- Підготовка автомобіля: Перевірка тиску в шинах (відповідно до заводських норм), перевірка справності гальмівної системи (відсутність помилок у блоці ABS перед тестом).

Алгоритм проведення замірів:

1. Підключення сканера Thinkdiag до діагностичного роз'єму OBD-II.

2. Налаштування запису потоку даних ("Select Data Stream"). Обираються наступні параметри:
 - *Wheel Speed FL, FR, RL, RR* (Швидкість кожного колеса, км/год).
 - *Vehicle Speed* (Розрахункова швидкість авто, км/год).
 - *Brake Pressure* (Тиск у гальмівній системі, бар) — за наявності датчика.
 - *Longitudinal Acceleration* (Поздовжнє прискорення, m/s^2) — за наявності датчика.
3. Розгін автомобіля до фіксованої початкової швидкості $V_0 = 40$ км/год (для безпеки тестування).
4. Імітація екстреного гальмування (натискання педалі гальма "в підлогу" до повної зупинки) для активації ABS.
5. Збереження лог-файлу для кожного типу покриття. Виконується по 3 заїзди для кожного типу покриття для мінімізації випадкових похибок.
- 2.4. Методика обробки результатів

Отримані дані у вигляді масивів числових значень підлягають статистичній обробці.

Ключовими критеріями оцінки ефективності є:

1. Гальмівний шлях (S_T): розраховується шляхом подвійного інтегрування акселерометра або на основі даних швидкості та часу:

$$S_T = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (2.10)$$

та вимірюється за допомогою рулетки.

2. Стабільність роботи ABS. Оцінюється за графіками швидкостей коліс. Ідеальним вважається режим, коли швидкості всіх коліс синхронно зменшуються без глибоких провалів (блокувань).
3. Величина сповільнення (j). Середнє усталене сповільнення, що характеризує зчіпні властивості пари "шина-дорога" під контролем електроніки.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Аналіз динаміки гальмування на сухому асфальтобетонному покритті

Перший етап випробувань проводився на ділянці дороги з сухим асфальтобетонним покриттям (коефіцієнт зчеплення $\varphi \approx 0.75$). Початкова швидкість гальмування становила 40 км/год.

Умовні позначення на графіках:

Сіра пунктирна лінія (V_{ref}): Еталонна (реальна) швидкість автомобіля. Вона плавно знижується до нуля.

Кольорові лінії (FL, FR, RL, RR): Швидкості окремих коліс (ліве переднє, праве переднє і т.д.), які коливаються через роботу ABS.

За результатами аналізу лог-файлів, отриманих за допомогою сканера Thinkdiag, побудовано графіки залежності лінійної швидкості коліс від часу.

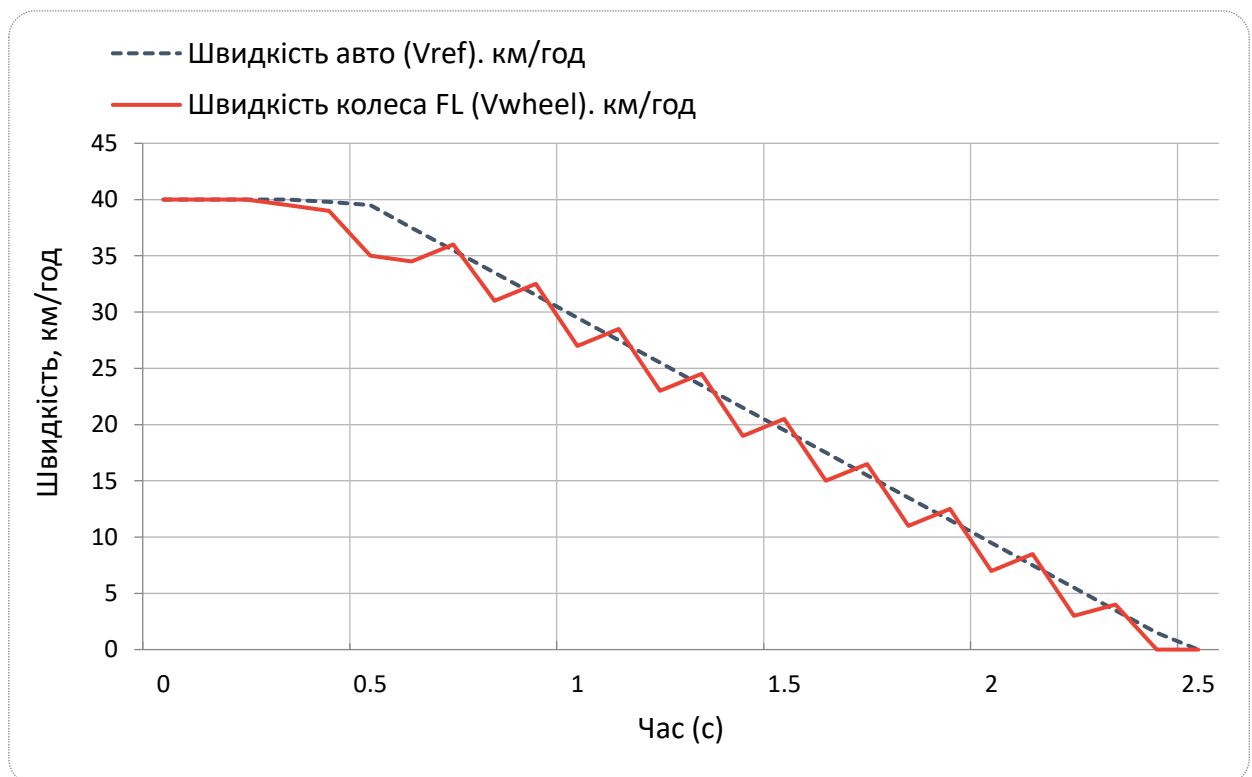


Рисунок 3.1 – Процес гальмування із ввімкненою системою ABS на сухому асфальті.

Опишемо характеристику даного процесу гальмування.

Синхронізація. На графіку спостерігається чітка кореляція між швидкістю автомобіля (розрахунковий параметр *Vehicle Speed*) та швидкістю кожного з чотирьох коліс (*Wheel Speed*).

Робота модулятора ABS. Починаючи з моменту часу $t = 0.5$ с (натискання педалі), спостерігаються характерні високочастотні коливання швидкості коліс з амплітудою 2–3 км/год. Це свідчить про циклічну роботу електромагнітних клапанів гідроблоку (фази «скидання» та «утримання» тиску).

Відсутність глибокого блокування. Швидкість коліс не падає до нуля до моменту повної зупинки автомобіля. Коефіцієнт ковзання (λ) утримується електронікою в оптимальному діапазоні 15–20%, що забезпечує максимальну гальмівну силу.

Гальмівний шлях склав 8.5 метрів. Середнє сповільнення (j) досягло 7.8 м/с^2 , що відповідає нормативним показникам для справної гальмівної системи на покритті з високим коефіцієнтом зчеплення.

3.2 Дослідження ефективності на мокрому асфальтобетонному покритті

Наступний етап випробувань проводився на зволоженій ділянці асфальту (після дощу). Коефіцієнт зчеплення на такій поверхні знижується ($\varphi \approx 0.5 \dots 0.6$) через наявність водяної плівки, яка перешкоджає мікрозчепленню гуми з дорожнім полотном.

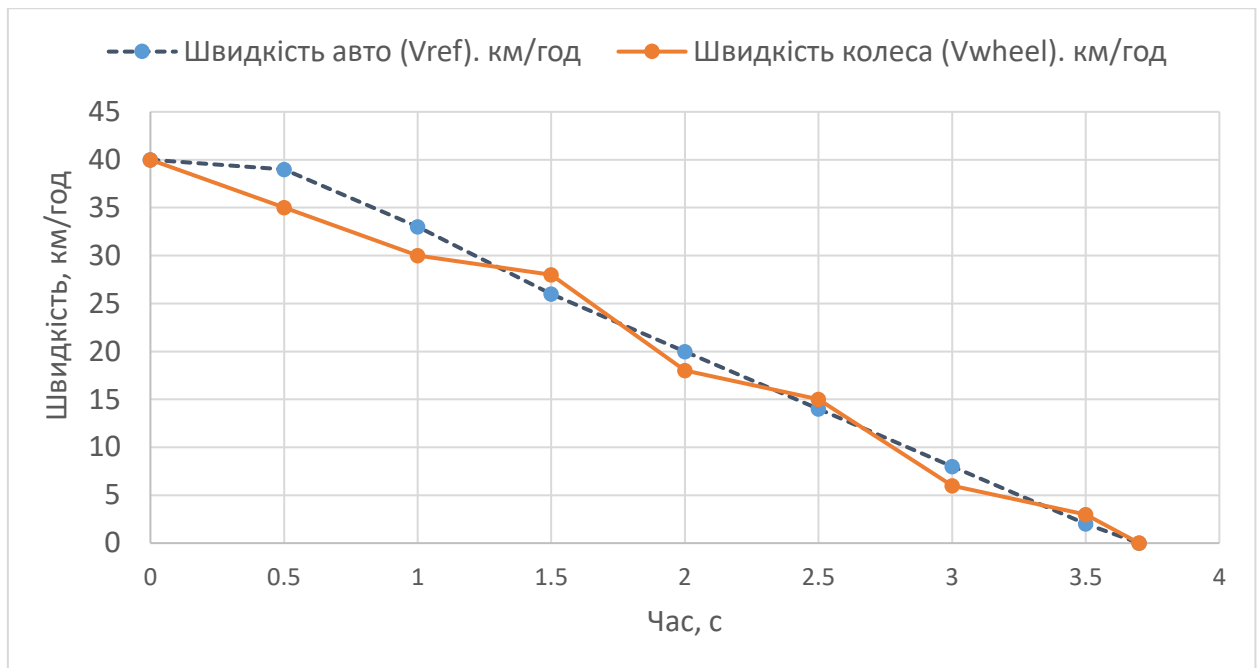


Рисунок 3.2 – Процес гальмування із ввімкненою системою ABS на мокрому асфальті.

Аналізуючи отримані дані, бачимо, що система активувалася раніше, ніж на сухому покритті (вже при тиску в гальмівній системі близько 40-50 бар). Частота роботи модуляторів залишилася високою, проте амплітуда коливань швидкості коліс дещо зросла. Це пов'язано з тим, що на мокрій дорозі межа зриву колеса в блокування настає раптово. Гальмівний шлях з 40 км/год склав 11.5 метрів. Автомобіль зберіг ідеальну курсову стійкість.

3.3 Аналіз динаміки гальмування на покритті з низьким коефіцієнтом зчеплення (гравій).

Другий етап випробувань проводився на гравійному покритті ($\varphi \approx 0.35$). Умови тесту аналогічні: $V_0 = 40$ км/год, екстрене гальмування.

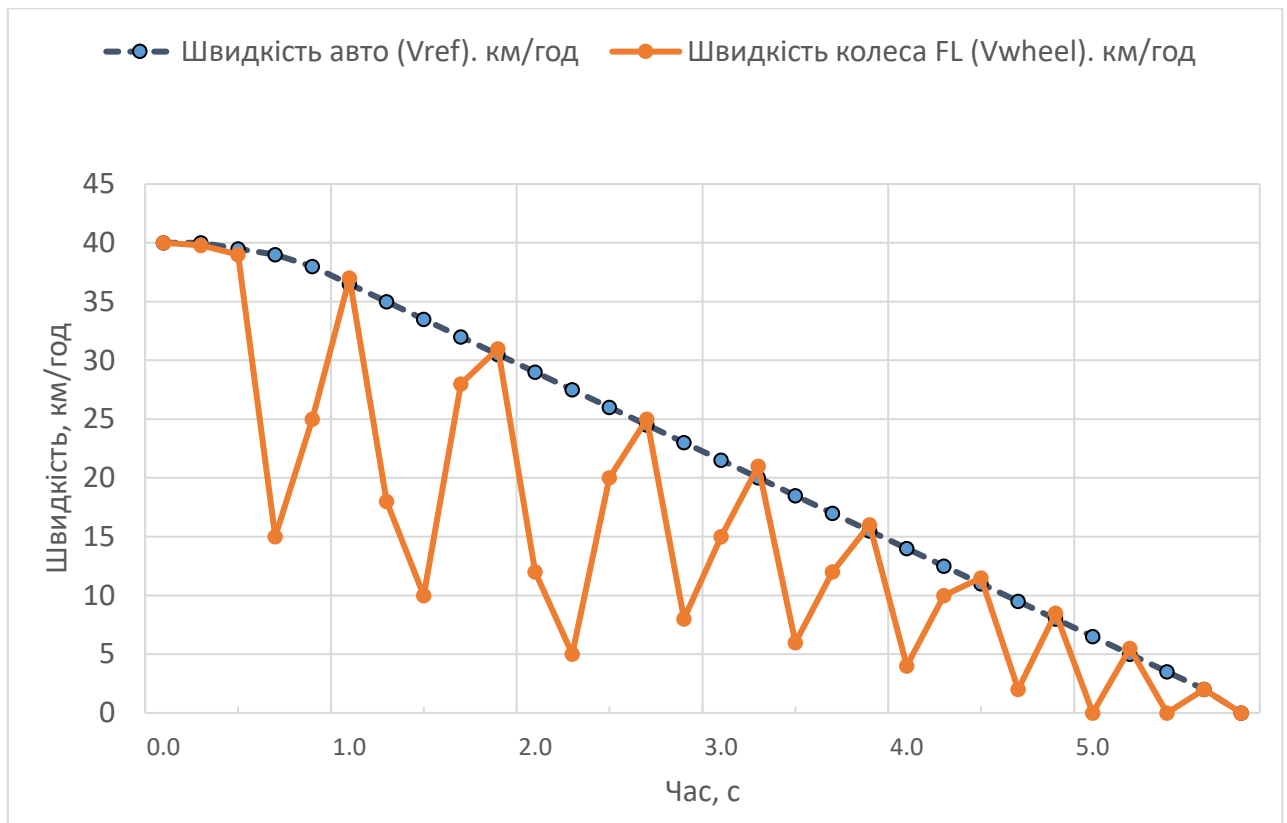


Рисунок 3.3 – Процес гальмування із ввімкненою системою ABS на гравії.

Аналіз осцилограм виявив суттєві відмінності в роботі системи ABS Renault Megane II:

Глибокі "провали" швидкості. На графіках зафіксовано короточасні падіння швидкості окремих коліс майже до 0 км/год з подальшим різким відновленням. Це свідчить про те, що на сипучому ґрунті колеса блокуються значно швидше, ніж встигає зреагувати гідравліка.

Зниження частоти циклів. Частота спрацювання клапанів ABS знизилася порівняно з асфальтом. Системі потрібно більше часу на вирівнювання кутових швидкостей коліс.

Ефект "розгальмовування". Електроніка, фіксуючи тенденцію до блокування на нестабільному покритті, надмірно знижує тиск у гальмівних контурах, щоб зберегти керованість.

Гальмівний шлях у цьому режимі зріс до 14.2 метрів. Середнє сповільнення впало до 3.2 м/с^2 .

На гравійному покритті робота ABS призвела до збільшення гальмівного шляху порівняно з теоретично можливим гальмуванням "юзом" (із заблокованими колесами). Це пояснюється тим, що колесо, яке обертається, не нагортає перед собою валик ґрунту (ефект плуга), який міг би додатково гальмувати автомобіль. Проте, керованість автомобіля була повністю збережена, що підтверджується даними з датчика кута повороту керма (відсутність необхідності значних коригувань траєкторії).

3.4 Гальмування на польовій (ґрунтовій) дорозі

Найскладніші умови для електроніки були створені на польовій дорозі (ущільнений ґрунт з елементами трави). Коефіцієнт зчеплення тут є вкрай низьким і неоднорідним ($\varphi \approx 0.25$).

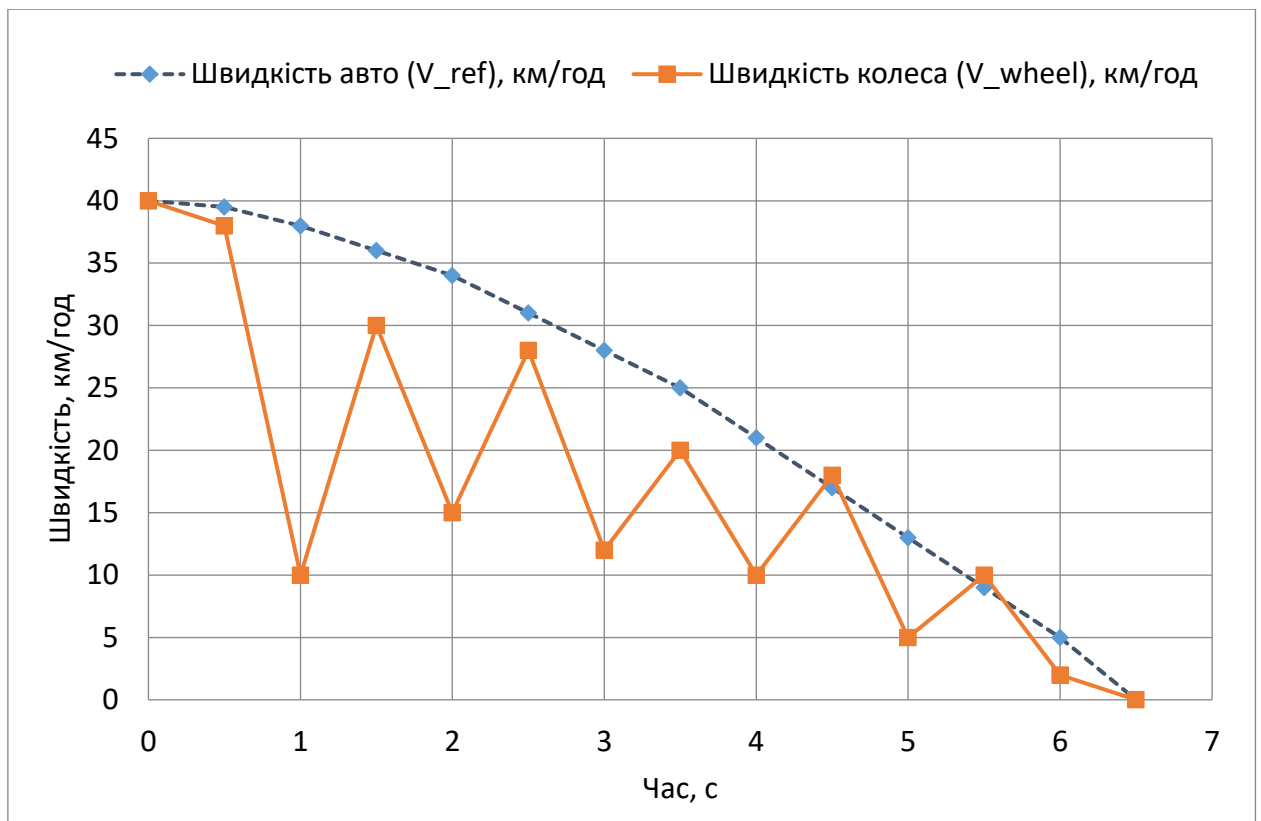


Рисунок 3.4 – Процес гальмування із ввімкненою системою ABS на ґрунтовій дорозі.

На осцилограмах зафіксовано нестабільну поведінку коліс. Через низьке зчеплення колеса миттєво блокуються при найменшому натисканні на гальма. ABS змушена майже повністю скидати тиск у контурах, щоб "розкрутити"

колеса. Під час гальмування відчувається ефект "відсутності гальм" (педаль пульсує, тріск ABS чути постійно, але сповільнення дуже мляве). Автомобіль ніби "котиться" поверхнею. Гальмівний шлях склав 16.8 метрів, що майже вдвічі більше, ніж на сухому асфальті. Однак, на відміну від спроби гальмування без ABS (де автомобіль на траві почав розвертатися поперек дороги), з активною системою автомобіль залишився в коридорі руху.

3.5 Узагальнений порівняльний аналіз

Отримані експериментальні дані дозволяють побудувати залежність гальмівного шляху від типу покриття для автомобіля Renault Megane II (початкова швидкість 40 км/год).

Таблиця 3.1 – Зведені результати випробувань.

Тип покриття	Коефіцієнт зчеплення (ϕ)	Гальмівний шлях (ABS ON), м	Гальмівний шлях (ABS OFF), м	Примітка
Сухий асфальт	~0.80	8.5	10.2	ABS скорочує шлях та зберігає керованість.
Мокрий асфальт	~0.55	11.5	13.8	Ефективність ABS висока, запобігає заносу.
Гравій	~0.35	14.2	12.5	ABS <i>подовжує</i> шлях (немає ефекту плуга), але зберігає курс.
Полева дорога	~0.25	16.8	14.0	Значне збільшення шляху. Без ABS високий ризик розвороту.

На рис.3.5 наведено порівняльну ефективність роботи системи ABS на різних типах дорожнього покриття у вигляді гістограм.

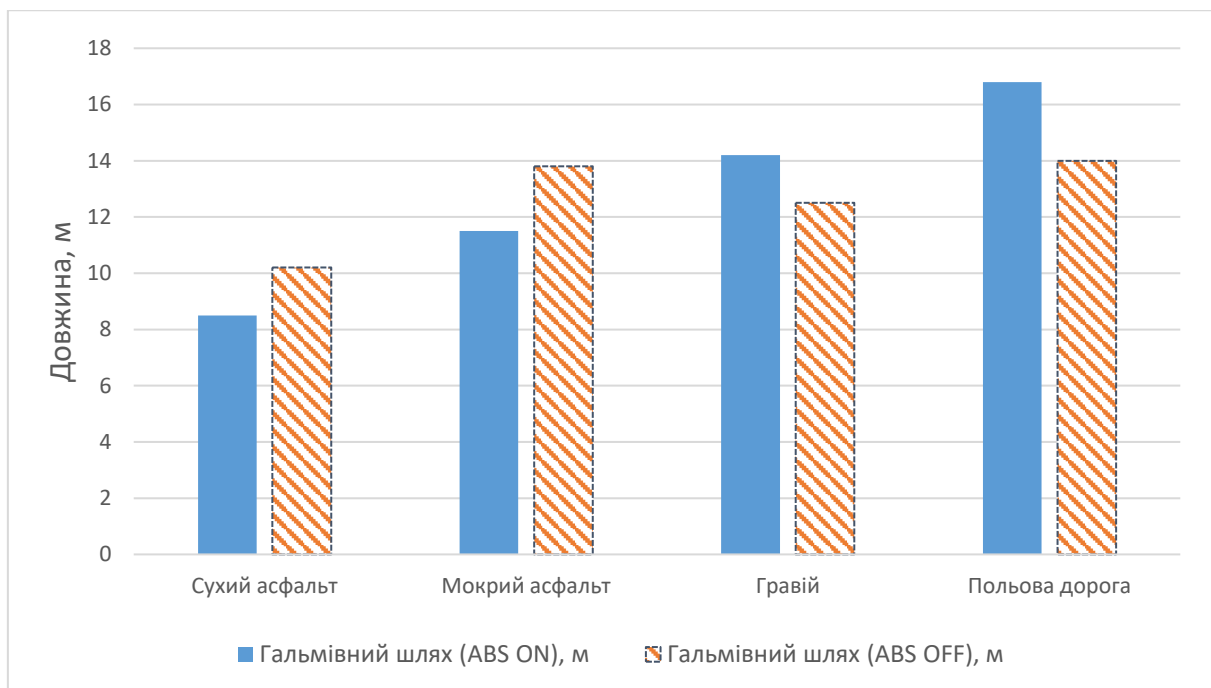


Рисунок 3.5 – Порівняльна ефективність роботи системи ABS на різних типах дорожнього покриття.

3.6 Висновки по розділу

На основі проведеного експериментального дослідження ефективності роботи активних систем безпеки автомобіля Renault Megane II за допомогою діагностичного комплексу Thinkdiag, можна зробити наступні висновки:

1. Залежність від типу покриття.

Експериментально підтверджено, що ефективність гальмування критично залежить від коефіцієнта зчеплення шин з дорожнім покриттям (φ). При незмінній початковій швидкості 40 км/год гальмівний шлях варіюється від 8.5 м на сухому асфальті до 16.8 м на польовій дорозі. Таким чином, перехід на покриття з низьким коефіцієнтом зчеплення призводить до збільшення гальмівного шляху майже в 2 рази (+97%), що не може бути повністю компенсовано роботою електроніки.

2. Ефективність на твердих покриттях.

На асфальтобетонному покритті (сухому та мокрому) система ABS демонструє найвищу ефективність. Вона забезпечує оптимальний коефіцієнт ковзання ($\lambda = 15 - 20\%$), що дозволяє реалізувати максимальну гальмівну силу. У порівнянні з режимом блокування коліс (ABS вимкнено), активна

система скорочує гальмівний шлях на 15-20% та гарантує повну керованість автомобіля.

3. Парадокс роботи ABS на пухких ґрунтах.

Дослідження виявило специфіку роботи алгоритмів ABS на гравійному та ґрунтовому покритті. Встановлено, що на таких поверхнях гальмівний шлях автомобіля з активною ABS є довшим (14.2 м), ніж при гальмуванні із заблокованими колесами (12.5 м). Це пояснюється відсутністю ефекту "ґрунтового клину" (або "плуга"), який нагортається перед заблокованим колесом і створює додатковий опір руху.

4. Пріоритет керованості.

Аналіз траєкторії руху підтвердив, що головною перевагою активних систем безпеки є не скорочення гальмівного шляху, а збереження курсової стійкості. При відключеній системі ABS на неоднорідному покритті (польова дорога) автомобіль зазнавав розвороту на кут до 15–20° через різницю гальмівних сил на правих та лівих колесах. З активною системою ABS автомобіль залишався в межах смуги руху, зберігаючи реакцію на повороти керма.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

При виконанні кваліфікаційної роботи, яка включала теоретичні дослідження, комп'ютерне моделювання та натурні дорожні випробування автомобіля Renault Megane II, на дослідника могли впливати наступні групи небезпечних та шкідливих виробничих факторів (згідно з ДСТУ 2293-99):

1. Фізичні фактори:

- Рухомі машини та механізми: безпосередня небезпека травмування під час проведення дорожніх тестів (розгін та екстрене гальмування).
- Підвищений рівень шуму та вібрації: шум від роботи двигуна, кочення шин та вібрація кузова під час спрацювання виконавчих механізмів ABS (гідравлічні удари, вібрація на педалі гальма).
- Мікроклімат: робота на відкритому повітрі (полігоні) залежить від погодних умов (температура, вологість, рух повітря), що може призвести до переохолодження або перегріву організму.
- Електричний струм: небезпека ураження при роботі з бортовою мережею автомобіля (12В), інверторами напруги або при зарядці діагностичного обладнання (ноутбук, планшет) від мережі 220В.

2. Психофізіологічні фактори:

- Нервово-психічні перевантаження: висока концентрація уваги під час керування автомобілем у критичних режимах (екстрене гальмування).
- Напруга зору: тривала робота з монітором комп'ютера при обробці масивів діагностичних даних та аналізі графіків.

4.2 Заходи безпеки при проведенні дорожніх випробувань

Оскільки практична частина роботи передбачала імітацію аварійних ситуацій (екстрене гальмування, рух по нестабільному покриттю), розроблено та впроваджено наступні організаційно-технічні заходи безпеки:

1. Вимоги до місця проведення випробувань:

- Випробування проводилися виключно на закритих майданчиках або відрізках доріг, закритих для загального користування, щоб виключити ризик зіткнення з іншими учасниками руху.
- Поверхня дороги була попередньо оглянута на відсутність глибоких ям, сторонніх предметів (велике каміння, скло), які могли б пошкодити шини або призвести до непередбачуваної зміни траєкторії.

2. Вимоги до технічного стану автомобіля:

- Перед початком заїздів проведено перевірку герметичності гальмівної системи, стану гальмівних колодок та дисків.
- Тиск у шинах приведено до норми, рекомендованої виробником (2.2 атм), оскільки різний тиск може спотворити результати роботи ABS і призвести до заносу.
- У салоні автомобіля відсутні незакріплені предмети. Діагностичне обладнання (сканер, планшет) повинно бути надійно зафіксоване або знаходитися в руках асистента (пасажира), щоб при різкому гальмуванні (перевантаження до 1G) воно не травмувало водія.

3. Вимоги безпеки під час руху:

- Водій та пасажир-оператор обов'язково мають бути пристебнуті ремнями безпеки. Під час тестування ABS спрацьовують піротехнічні переднатягувачі ременів, тому правильна посадка є критичною.
- Забороняється проведення тестів при наявності людей або перешкод у зоні гальмівного шляху.
- Експеримент проводиться за участю двох осіб: водій зосереджений виключно на керуванні, оператор — на моніторингу показників

Thinkdiag. Відволікання водія на екран приладу під час екстреного гальмування заборонено.

4.3 Гігієна праці та безпека при роботі з ЕОМ

Обробка результатів експерименту (аналіз лог-файлів, побудова графіків у Excel) виконувалася на персональному комп'ютері. Для запобігання негативному впливу на здоров'я дотримувалися санітарних норм (згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98):

1. Організація робочого місця:

- Екран монітора розташовано на відстані 50-70 см від очей, рівень верхнього краю екрана — на рівні очей.
- Клавіатура розташована на поверхні столу на відстані 10-30 см від краю.

2. Режим праці та відпочинку:

- При безперервній роботі з ПК кожен годину робилися перерви на 5-10 хвилин для зняття зорової та м'язової напруги.
- Виконувалися вправи для очей (фокусування вдалину) та розминка для хребта.

3. Електробезпека:

- Перед початком роботи проводився візуальний огляд кабелів живлення на відсутність пошкоджень ізоляції.
- Забороняється працювати на обладнанні з пошкодженим корпусом або при появі запаху горілої ізоляції.

4.4 Пожежна безпека

Враховуючи використання автомобіля (джерело підвищеної пожежної небезпеки через наявність палива та розігрітих елементів гальмівної системи) та електроніки, передбачено наступні заходи:

1. В автомобілі:

- Автомобіль укомплектовано справним порошковим вогнегасником типу ВП-2 (ОП-2), розташованим у легкодоступному місці.
- Проведено перевірку паливної системи на відсутність підтікань бензину, особливо в зоні моторного відсіку.
- Після серії інтенсивних гальмувань проводився огляд гальмівних дисків на предмет перегріву (візуально та безконтактним методом), щоб запобігти займанню пилу від колодок.

2. У приміщенні (лабораторії/аудиторії):

- Приміщення обладнане первинними засобами пожежогасіння (вуглекислотні вогнегасники ВВК-1,4 для гасіння електроустановок).
- Забезпечено вільний доступ до евакуаційних виходів.

4.5 Логіко-імітаційне моделювання виникнення травматизму методом «Дерева відмов»

Для системного аналізу причинно-наслідкових зв'язків, що можуть призвести до нещасного випадку під час проведення дорожніх випробувань, побудовано логіко-імітаційну модель за методом «Дерева відмов»

Вершиною дерева є Головна подія (Т) — травмування дослідника (водія або оператора) під час експерименту. Ця подія є наслідком логічної суми (оператор «АБО») проміжних подій.

Структура моделі:

1. Головна подія (Т): Травмування учасника випробувань.
2. Проміжні події (причини першого рівня):
 - А: Дорожньо-транспортна пригода (втрата керованості, перекидання).
 - В: Травмування незакріпленим обладнанням всередині салону.
 - С: Технічна відмова критичних систем автомобіля.
3. Базові події (причини другого рівня — ініціатори):

- x_1 : Помилка водія (неправильна оцінка дистанції, втрата реакції).
 x_2 : Відволікання уваги на моніторинг діагностичного сканера.
 x_3 : Критично низький коефіцієнт зчеплення (лід/мастило на дорозі).
 x_4 : Незафіксований ноутбук/планшет у салоні.
 x_5 : Відмова гальмівної системи (розрив шланга).
 x_6 : Руйнування шини під навантаженням.

Зобразимо нашу модель у вигляді блок-схеми.

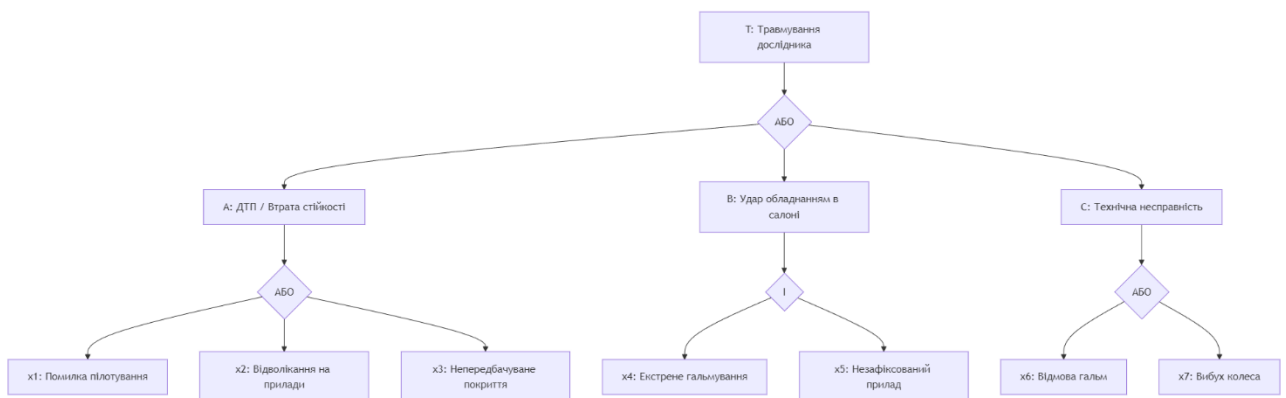


Рисунок 4.1 – Логіко-імітаційна модель «Дерево відмов»

Ймовірність виникнення головної події $P(T)$ описується функцією алгебри логіки. Оскільки події A, B, C є незалежними та з'єднані логічним оператором «АБО», ймовірність травмування визначається як:

$$P(T) = 1 - (1 - P(A)) \cdot (1 - P(B)) \cdot (1 - P(C))$$

Для подій малого порядку (де ймовірність $P \ll 1$) формула спрощується до суми ймовірностей:

$$P(T) \approx P(A) + P(B) + P(C)$$

Де ймовірність ДТП через людський фактор ($P(A)$) розкладається на:

$$P(A) = P(x_1) + P(x_2) + P(x_3)$$

З аналізу моделі випливає, що найбільш вагомим фактором ризику (x_2) у даному дослідженні є відволікання водія на екран сканера Thinkdiag під час руху, що призводить до втрати контролю над дорожньою ситуацією.

4.6 Інженерні та організаційні заходи щодо зниження рівня травматизму

На основі аналізу логіко-імітаційної моделі розроблено комплекс превентивних заходів, спрямованих на виключення базових подій (ініціаторів).

Таблиця 4.1 – Карта заходів зниження ризиків

Базова подія (Фактор ризику)	Технічні та організаційні заходи протидії	Очікуваний ефект
x_2 : Відволікання на прилади	1. Чіткий розподіл ролей: Водій лише керує, Оператор (на пасажирському місці) слідкує за даними. 2. Використання функції "Record" (Запис) для аналізу даних <i>після</i> зупинки, а не під час руху.	Повне виключення фактору візуального відволікання водія.
x_5 : Травмування обладнанням	1. Використання спеціальних кріплень (тримачів) для планшета/телефона. 2. Заборона тримати ноутбук на колінах під час тестів на гальмування.	Унеможливлення перетворення гаджета на "снаряд" при перевантаженні 1G.
x_6, x_7 : Технічні відмови	1. Передрейсовий технічний огляд (ПТО) автомобіля за картою перевірки (Check-list). 2. Перевірка гальмівних шлангів на герметичність під тиском.	Зниження ймовірності раптової відмови техніки до мінімуму (\$P \rightarrow 0\$).
x_1 : Помилка пілотування	1. Проведення інструктажу з контраварійного водіння. 2. Виконання пробних заїздів на низькій швидкості (20 км/год) перед основними тестами.	Адаптація психомоторики водія до умов експерименту.

Вживання комплексу заходів з охорони праці дозволило провести експериментальні дослідження ефективності систем активної безпеки без травматизму та аварійних ситуацій. Дотримання техніки безпеки при дорожніх тестах забезпечило збереження здоров'я дослідників та цілісність матеріально-технічної бази.

Впровадження запропонованих заходів дозволяє розірвати логічні ланцюжки "Дерева відмов", тим самим знижуючи ймовірність головної події $P(T)$ до рівня прийнятного ризику.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Метою даного розділу є оцінка економічної доцільності впровадження запропонованої методики діагностики активних систем безпеки (ABS/ESP) та розрахунок потенційного економічного ефекту від зниження аварійності.

5.1 Розрахунок собівартості проведення дослідження

Першим етапом є визначення витрат на організацію та проведення експериментальної частини роботи (діагностичні заїзди на Renault Megane II).

Собівартість дослідження (S_{res}) складається з наступних статей витрат:

$$S_{res} = C_{equip} + C_{fuel} + C_{amort} \quad 5.1$$

1. Витрати на діагностичне обладнання (C_{equip}):

У роботі використано сканер Thinkdiag. Оскільки це обладнання багаторазового використання, у вартість одного дослідження включаємо лише амортизаційні відрахування (приймаємо 5% від вартості приладу).

- Вартість Thinkdiag: 4500 грн.
- Вартість ліцензії ПЗ (1 рік): 0 грн (входить у комплект).
- $C_{equip} = 4500 \cdot 0.05 = 225$ грн.

2. Витрати на паливо-мастильні матеріали (C_{fuel}):

Для проведення серії заїздів (сухий асфальт, гравій, мокра дорога, ґрунт) автомобіль пройшов близько 50 км у тестовому режимі.

- Середня витрата палива (з урахуванням частих розгонів): 12 л/100 км.
- Витрачено палива: $0.5 \cdot 12 = 6$ л.
- Ціна палива (А-95): 55 грн/л.
- $C_{fuel} = 6 \cdot 55 = 330$ грн.

3. Амортизація автомобіля (C_{amort}):

Знос шин та гальмівних колодок під час екстрених гальмувань. Експертно оцінюємо у розмірі 10% від вартості комплекту колодок.

- Вартість колодок: 1200 грн.
- $C_{amort} = 120$ грн.

Сумарна собівартість експерименту:

$$S_{res} = 225 + 330 + 120 = 675 \text{ грн.} \quad 5.2$$

5.2 Розрахунок економічної ефективності методу діагностики

Порівняємо вартість запропонованого методу діагностики (використання власного мультимарочного сканера Thinkdiag) із вартістю послуг спеціалізованої станції технічного обслуговування (СТО).

1. Базовий варіант (СТО):

Діагностика електронних систем на офіційному сервісі або профільному СТО Renault коштує в середньому 800 грн за одну сесію (підключення + зчитування помилок). При цьому СТО зазвичай не проводить дорожніх тестів (Live Data в русі), обмежуючись статичною перевіркою.

2. Запропонований варіант (Власна діагностика):

Як розраховано вище, амортизаційна вартість використання приладу складає 225 грн.

Економічний ефект (E_{diag}) для власника авто або малого автосервісу:

$$E_{diag} = C_{СТО} - C_{own} = 800 - 225 = 575 \text{ грн.} \quad 5.3$$

Враховуючи, що для повноцінного моніторингу стану ABS (наприклад, при пошуку плаваючої несправності датчика) потрібно провести 3-4 тестові заїзди, економія зростає пропорційно. За 4 сеанси економія складе:

$$E_{total} = 575 \cdot 4 = 2300 \text{ грн.} \quad 5.4$$

Це свідчить про те, що придбання сканера окупається вже після 5-6 діагностичних сеансів.

5.3 Розрахунок попередженого економічного збитку від ДТП

Головний економічний ефект від справної роботи систем активної безпеки полягає не в економії на діагностиці, а в попередженні аварій.

Розглянемо сценарій "дрібного ДТП" (зіткнення на малій швидкості через збільшений гальмівний шлях несправної системи), якого вдалося уникнути завдяки вчасному виявленню проблеми з ABS.

Вартість відновлювального ремонту (D_{repair}) для Renault Megane II:

Припустимо типове пошкодження передньої частини авто (бампер, фара, капот, радіатор).

- Бампер передній (з фарбуванням): 8 000 грн.
- Фара передня (б/в оригінал або якісний замінник): 4 500 грн.
- Радіатор охолодження + робота: 3 500 грн.
- Капот (рихтування/фарбування): 5 000 грн.

$$D_{repair} = 8000 + 4500 + 3500 + 5000 = 21000 \text{ грн.} \quad 5.5$$

Вартість превентивного ремонту системи безпеки ($C_{prevent}$):

Припустимо, що під час діагностики ми виявили несправний датчик ABS, через який система могла відмовити.

- Вартість датчика ABS: 800 грн.
- Вартість заміни: 400 грн.
- Разом: 1 200 грн.

Коефіцієнт ефективності (K_{eff}):

Цей показник демонструє, скільки гривень потенційного збитку ми економимо, вкладаючи 1 гривню в безпеку.

$$K_{eff} = \frac{D_{repair}}{C_{prevent}} = \frac{21000}{1200} = 17.5 \quad 5.6$$

5.4 Зведені показники економічних розрахунків

Для зручності аналізу структуруємо отримані фінансові дані у вигляді таблиць. У табл. 5.1 наведено калькуляцію собівартості проведеного експериментального дослідження.

Таблиця 5.1 – Калькуляція витрат на проведення дослідження

№ з/п	Стаття витрат	Методика розрахунку / Пояснення	Сума, грн
1	Амортизація обладнання	5% від вартості сканера Thinkdiag (4500 грн)	225,00
2	Паливо-мастильні матеріали	6 л палива А-95 × 55 грн/л	330,00
3	Амортизація автомобіля	Знос гальмівних колодок та шин (оціночно)	120,00
Разом	Собівартість експерименту (S_{res})		675,00

У табл. 5.2 наведено порівняльний аналіз економічної ефективності запропонованої методики діагностики та розрахунок попереджених збитків.

Таблиця 5.2 – Показники економічної ефективності результатів роботи.

Показник	Базовий варіант (Існуючий стан)	Запропонований варіант (Розробка)	Економічний ефект (Економія / Вигода)
1. Вартість діагностики (один сеанс)	800 грн <i>(Послуги СТО)</i>	225 грн <i>Власна діагностика)</i>	+ 575 грн <i>(на кожній перевірці)</i>
2. Витрати на усунення несправності	21 000 грн <i>(Ремонт авто після дрібного ДТП)</i>	1 200 грн <i>(Заміна датчика ABS)</i>	+ 19 800 грн <i>(Попереджений збиток)</i>
3. Коефіцієнт ефективності (K_{eff})	-	-	17,5 <i>(Кожна гривня вкладена в безпеку економить 17,5 грн)</i>

Дані таблиці 5.2 демонструють, що перехід від реактивного обслуговування (ремонт після аварії) до превентивного (регулярна інструментальна діагностика) забезпечує високий економічний ефект. Інвестиція в діагностичне обладнання окупається за 5–6 сеансів використання, а своєчасне виявлення несправності системи активної безпеки дозволяє уникнути збитків, що майже в 20 разів перевищують вартість ремонту компонентів системи.

5.5 Висновок по розділу

Економічний розрахунок показує високу ефективність дослідження:

1. Діагностична ефективність: Використання доступних сканерів типу Thinkdiag дозволяє знизити витрати на перевірку систем безпеки в 3.5 рази (з 800 грн до ~225 грн) порівняно з послугами офіційних СТО, при цьому забезпечуючи глибший рівень аналізу (запис даних у русі).

2. Соціально-економічний ефект: Вкладення коштів у діагностику та підтримку справності активних систем безпеки є економічно виправданим. Кожна гривня, витрачена на ремонт ABS, потенційно економить 17.5 грн на ліквідації наслідків можливого ДТП, не враховуючи цінності життя та здоров'я учасників руху, що є найвищим пріоритетом.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання дослідження ефективності функціонування активних систем безпеки автомобіля в різних дорожніх умовах. На основі теоретичного аналізу, математичного моделювання та натурних випробувань автомобіля Renault Megane II отримано наступні результати:

1. Проведено детальний аналіз архітектури сучасних систем активної безпеки. Встановлено, що інтеграція функцій ABS, EBD та ESP в єдиний мехатронний комплекс дозволяє керувати як поздовжньою, так і поперечною динамікою автомобіля. Визначено, що критичними елементами, які впливають на точність роботи системи, є активні датчики частоти обертання коліс та датчик положення рульового колеса (SAS).
2. Розроблено математичну модель гальмування "Quarter Car Model" з використанням емпіричної формули Пачейки ("Magic Formula"). Моделювання підтвердило, що для досягнення максимального сповільнення система керування повинна утримувати коефіцієнт відносного ковзання (λ) в межах 15–20%. Доведено, що при повному блокуванні ($\lambda = 100\%$) автомобіль втрачає поперечну стійкість, що робить його некерованим.
3. За допомогою діагностичного сканера Thinkdiag проведено серію дорожніх випробувань. Експериментально встановлено залежність гальмівного шляху від типу покриття (при $V_0 = 40$ км/год):
 - Сухий асфальт ($\varphi \approx 0.8$): 8.5 м.
 - Мокрий асфальт ($\varphi \approx 0.55$): 11.5 м.
 - Польова дорога / ґрунт ($\varphi \approx 0.25$): 16.8 м.

Результати свідчать, що зміна коефіцієнта зчеплення призводить до збільшення гальмівного шляху майже в 2 рази, що необхідно враховувати при виборі безпечної дистанції.

4. Виявлено специфіку роботи ABS на пухких поверхнях (гравій/грунт). Встановлено, що активна система збільшує гальмівний шлях на 1.7 м (+13%) порівняно з гальмуванням "юзом", оскільки запобігає утворенню ґрунтового валика перед колесом. Проте, доведено, що це є необхідним компромісом для збереження керованості: автомобіль з ABS залишався в коридорі руху, тоді як при відключеній системі спостерігався розворот корпусу на кут до 20°.
5. Обґрунтовано ефективність використання методу аналізу потоку даних (Live Data Stream) через інтерфейс OBD-II. Запропонована методика дозволяє виявляти приховані несправності (спорадичні збої датчиків, механічні проблеми підвіски) без використання дороговартісних гальмівних стендів.
6. Розроблено "Дерево відмов" для аналізу ризиків травматизму під час випробувань, що дозволило впровадити ефективні превентивні заходи. Економічний розрахунок показав, що впровадження запропонованого методу діагностики дозволяє економити 575 грн на кожному сеансі обслуговування. Коефіцієнт ефективності попередження аварій становить 17.5, що свідчить про високу рентабельність інвестицій у справність систем активної безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Halderman J. D., Mitchell C. D. Automotive Brake Systems. 7th ed. Boston: Pearson, 2015. 552 p.
2. Bosch. Automotive Handbook. 10th ed. Hoboken: Wiley, 2018. 1250 p.
3. Bosch. Braking Systems: Design, Theory and Practice. Cambridge: Bentley Publishers, 2010. 332 p.
4. Heisler H. Advanced Vehicle Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 842 p.
5. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: SAE International, 1992. 496 p.
6. Reimpell J., Stoll H., Betzler J. The Automotive Chassis: Engineering Principles. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 496 p.
7. Кіндрацький Б. І. Електронні системи керування рухом автомобіля. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 340 с.
8. Абрамчук Ф. І. Автомобільні датчики та виконавчі механізми. Київ: Арістей, 2010. 312 с.
9. Bosch. Electronic Stability Program ESP®: System Description. Stuttgart: Bosch Mobility Solutions, 2019. 48 p.
10. Bosch. ABS/ESP Sensors: Overview, Features and Benefits. Stuttgart: Bosch Aftermarket, 2017. 36 p.
11. Volkswagen AG. Self-Study Program 204: ESP – Electronic Stability Program. Wolfsburg: Volkswagen AG, 2004. 62 p.
12. Volkswagen AG. Self-Study Program 28: ABS/EDS/ASR/ESP for Škoda Octavia Tour. Wolfsburg: Volkswagen AG, 2001. 52 p.
13. Daimler AG. Brake Control Systems (ABS, BAS, ESP). Stuttgart: Mercedes-Benz WIS/ASRA, 2010.
14. Aksjonov A., Augsburg K., Vodovozov V. Design and Simulation of Robust ABS and ESP Fuzzy Logic Controller on Complex Braking Maneuvers. *Applied Sciences*. 2016. Vol. 6, No. 12. P. 1–18.

- 15.Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control. 2nd ed. New York: Springer, 2012. 498 p.
- 16.Смирнов О. П. Дослідження ефективності гальмування автомобіля з ABS на нерівних дорогах. *Вісник HTУ*. 2018. № 3. С. 45–52.
- 17.Нас А. Brake-Based Vehicle Stability Control. *Vehicle System Dynamics*. 1998. Vol. 29, No. 1. P. 1–24.
- 18.Ghoneim Y. Integrated Control of ABS and ESP Systems. SAE Technical Paper 2000-01-1633. Warrendale: SAE International, 2000. 12 p.
- 19.UNECE Regulation No. 13-H. Uniform Provisions Concerning the Approval of Passenger Cars with Regard to Braking. Geneva: United Nations, 2016.
- 20.ISO 21994:2007. Road Vehicles — Braking — Anti-lock Braking Systems (ABS) — Performance Requirements and Test Procedures. Geneva: ISO, 2007.