

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Вплив жорсткості стабілізатора підвіски на кутові параметри встановлення коліс автомобіля

Рівень вищої освіти                      бакалавр  
Галузь знань                                13 «Механічна інженерія»  
Спеціальність                              132 «Матеріалознавство»  
Освітня програма «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

Шифр КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ

Виконав студент 3-го курсу  
група МТВАс 22-2  
Шифр

  
Підпис

Борис ПИЛИПЧУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник д.т.н., проф.  
Науковий ступінь, звання

  
Підпис

Павло КАПЛУН  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер

  
Підпис

Олег БАБАК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
Завідувач кафедри ТАМ  
Назва

  
Підпис

Олександр ДИХА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 9.06.2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Рівень вищої освіти – Перший бакалаврський

Освітньо-професійна програма – «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

2025 року

20-02

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Пилипчука Бориса Петровича

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Вплив жорсткості стабілізатора підвіски на кутові параметри встановлення коліс автомобіля»

керівник роботи Каплун Павло Віталійович д.т.н., професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 лютого 2025р. № 23 (Д14)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по стабілізатору підвіски, складанню і регулюванню вузла дослідження; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
1. Аналіз вихідних даних та відомих технічних рішень; 2 Розробка технологічного процесу підвищення жорсткості стабілізатора; 3. Обґрунтування конструктивного рішення і способів впливу жорсткості на кутові параметри встановлення коліс автомобіля; 4. Безпека та екологічність проектного технологічного процесу; 5. Оцінка економічної ефективності.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_----

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строки виконання	Примітки
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>20.05.2025</i>	
2	<i>Технологічний розділ</i>	<i>25.05. 2025</i>	
3	<i>Конструкторський розділ</i>	<i>30.05. 2025</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>2.06. 2025</i>	
5	<i>Оформлення презентації кваліфікаційної роботи</i>	<i>5.06. 2025</i>	
6	<i>Нормоконтроль кваліфікаційної роботи</i>	<i>9.06. 2025</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>10.06. 2025</i>	

Студент

Керівник роботи

  
Підпис

  
Підпис

Борис ПИЛИПЧУК  
Ім'я, прізвище

Павло КАПЛУН  
Ім'я, прізвище

## РЕФЕРАТ

У рамках випускної кваліфікаційної роботи бакалавра було досліджено вплив кутової жорсткості додатково введеного у підвіску типу Макферсон стабілізатора з різними довжинами його активної частини на теоретичний кут крену підресорених мас автомобіля.

Кваліфікаційна робота бакалавра (КРБ) складається із п'яти розділів.

В першому розділі виділено об'єкт дослідження, проведено аналіз наукових джерел за тематикою, методів визначення кутових параметрів установки коліс автомобіля.

У другому розділі проаналізовано технічні умови існуючих конструкції підвісок. Зроблено вибір і обґрунтування методу підвищення технічних характеристик.

Третій розділ містить розрахунок жорсткості амортизатора, приведено обґрунтування складових методики дослідження кінематичних ланок підвіски, визначено: зміну кутів розвалу та сходження в залежності від ходу підвіски; вплив геометричного параметру на характеристики жорсткості стабілізатора поперечної стійкості.

Економічний розділ підтверджує економічну доцільність впровадження розробленого стенду та можливість створення стартапу.

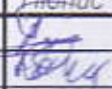
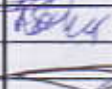

У розділі охорони праці та техніки безпеки надані рекомендації з необхідних заходів безпеки при роботах на такому обладнанні.

Випускна кваліфікаційна робота складається з 66 сторінок, і містить у собі 20 ілюстрацій, 16 джерел, 12 таблиць, 1 додаток.

Ключові слова: ПІДВІСКА, ПЛАВНІСТЬ ХОДУ, СТІЙКІСТЬ РУХУ, КЕРОВАНІСТЬ, СТАБІЛІЗАТОР, КУТ КРЕНУ ПІДРЕСОРЕНОЇ МАСИ, КУТОВА ЖОРСТКІСТЬ, КУТ РОЗВАЛУ, КУТ СХОДЖЕННЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ .....	6
1.1 Роль стабілізатора в системі підвіски автомобіля .....	6
1.2 Історія створення стабілізатора поперечної стійкості .....	7
1.3 Методи визначення кутових параметрів установки коліс авто.....	9
1.4 Вплив жорсткості стабілізатора підвіски на кути встановлення коліс автомобіля .....	12
1.5 Практичне значення стабілізаторів підвіски.....	14
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	17
2.1 Підвіска на подвійних поперечних важелях.....	17
2.2 Багатоважільна підвіска .....	21
2.3 Незалежна підвіска типу Макферсон.....	23
2.4 Характеристики підвіски.....	28
3 КОНСТРУКТОРСЬКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ.....	35
3.1 Розрахунок необхідної жорсткості стабілізатора для зменшення кутів крену підресорених мас .....	35
3.2 Дослідження поведінки кінематичних ланок підвіски .....	40
3.3 Розробка стенду та методики дослідження .....	43
3.4 Результати експериментальних досліджень.....	48
4 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	59
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ .....	61
ВИСНОВОК.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТОВУВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64
ДОДАТКИ.....	66

					<b>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</b>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат.			
Розроб.		Пилипчук			Літ.	Арк.	Акрюшів
Перевір.		Каплун				4	66
Реценз.					ХНУ група МТВАс22-2		
Н. Контр.		Бабак					
Затверд.		Диха					

*Вплив жорсткості стабілізатора  
підвіски на кутові параметри  
встановлення коліс автомобіля*

## ВСТУП

Підвіска автомобіля – це комплекс механізмів, що забезпечує зв'язок між кузовом та колесами, амортизує удари та забезпечує керованість транспортного засобу. Одним із важливих елементів підвіски є стабілізатор поперечної стійкості, який зменшує крен кузова в поворотах. Його жорсткість безпосередньо впливає на динаміку підвіски та, відповідно, на зміну кутових параметрів встановлення коліс.

Ці параметри – розвал, сходження та кастер – є критично важливими для стійкості, зчеплення з дорогою та рівномірного зносу шин. Під час руху, особливо при маневрах, підвіска зазнає значних динамічних навантажень, що призводить до тимчасових змін кутів. Жорсткість стабілізатора визначає ступінь цих змін: надто жорсткий стабілізатор погіршує комфорт, а надто м'який – стійкість автомобіля.

Розуміння впливу стабілізатора на роботу підвіски є важливим для оптимізації її налаштувань при проектуванні сучасних транспортних засобів, особливо у спортивних або позашляхових автомобілях, де параметри підвіски мають критичне значення.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1. ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1. Роль стабілізатора в системі підвіски автомобіля

Стабілізатор поперечної стійкості (або стабілізатор крену) – це пружний елемент, який об'єднує ліву та праву частини підвіски одного моста та виконує функцію обмеження поперечного крену кузова автомобіля під час поворотів або нерівномірного навантаження на колеса.

Конструкція та принцип дії.

Стабілізатор зазвичай являє собою металевий торсійний стрижень (пружний вал), кінці якого шарнірно з'єднані з елементами підвіски коліс, а середня частина – прикріплена до кузова або рами через опорні втулки.

Під час прямолінійного руху стабілізатор практично не працює – обидва колеса мають однаковий хід, тому не створюється скручуючий момент.

При повороті або наїзді на нерівності одне колесо піднімається або опускається більше за інше, що призводить до скручування стабілізатора. У відповідь він створює пружний опір, який намагається вирівняти обидва колеса, зменшуючи крен кузова.

Функції стабілізатора.

Підвищення стійкості автомобіля при поворотах:

- Зменшення бокового нахилу кузова;
- Підвищення зчеплення шин із дорожнім покриттям.

Покращення керованості та реакцій на поворот керма:

- Автомобіль швидше повертається у вихідне положення після маневру;
- Зменшення інерційних коливань кузова.
- Зниження перевантажень на одне колесо:
- Допомагає краще розподіляти навантаження між колесами при асиметричному русі.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Компромiс жорсткостi.

Жорсткий стабiлiзатор: ефективно зменшує крен, але погiршує комфорт на нерiвностях i знижує незалежнiсть роботи колiс.

М'який стабiлiзатор: забезпечує комфорт, але незначно впливає на поперечну стiйкiсть, що може призвести до надмiрного крену i втрати зчеплення.

Додаткова iнформацiя.

У сучасних авто можуть застосовуватись:

- Активнi стабiлiзатори з електронним керуванням;
- Гiдравлiчнi стабiлiзатори, якi адаптують жорсткiсть до умов руху;
- Роздiльнi стабiлiзатори на переднiй та заднiй осi з iндивiдуальними характеристиками.

## 1.2. Iсторiя створення стабiлiзатора поперечної стiйкостi

Передумови виникнення. Поява стабiлiзатора була зумовлена:

- зростанням «швидкостi руху» автомобiлiв;
- необхіднiстю «покращення стiйкостi» транспортних засобiв пiд час поворотiв;
- бажанням «зменшити крени кузова», якi негативно впливали на комфорт i керуванiсть.

Ще на початку ХХ столiття, коли автомобiлi лише починали набирати популярнiсть, конструктори стикнулися з проблемою надмiрного нахилу кузова при проходженнi поворотiв, особливо на вузьких шинах i м'яких ресорах. Це знижувало ефективнiсть зчеплення i викликало передчасний знос шин.

Першi застосування (1920–1930-тi роки).

Першi реалiзацiї стабiлiзаторiв з'явилися у 1920–30-х роках. Конструкцiя була досить простою – «металева пружна балка», з'єднана з

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Пiдпис	Дата		

елементами підвіски обох коліс. Вона працювала як «торсійна пружина», протидіючи перекосу підвіски.

Піонери у впровадженні [1].

«Ford Motor Company», «Cadillac», а також «європейські виробники» в преміальному сегменті почали експериментувати з поперечними штангами в підвісці для зменшення крену.

Широке впровадження у 1950–70-х роках.

У другій половині ХХ століття стабілізатори стали «стандартним елементом конструкції підвіски» у більшості легкових автомобілів. Їх застосовували:

- спершу «лише на передній осі»,
- згодом – «і на задній», особливо в автомобілях із незалежною підвіскою.

У цей період стабілізатори стали налаштовуваними – інженери підбирали «жорсткість стрижня» та «точки кріплення», щоб досягти балансу між стійкістю й комфортом.

Епоха спортивних та позашляхових авто (1980–2000).

З розвитком «автомобілів класу SUV», а також «спортивних легковиків», вимоги до стабілізаторів зросли. З'явилися:

- «регульовані стабілізатори» (зі змінними важелями),
- «двосторонні системи», де стабілізатор міг бути роз'єднаний (наприклад, при русі бездоріжжям).

Сучасні технології (після 2000 року).

Із розвитком електроніки стабілізатори стали «активними».

«Активні стабілізатори» змінюють жорсткість у реальному часі за допомогою електродвигунів або гідравлічних приводів (прикладі: Mercedes Active Body Control, Lexus KDSS).

Вони забезпечують «максимальну стабільність у повороті» без шкоди для «комфорту на нерівностях».

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цікаві факти.

У деяких моделях Tesla, Porsche та Range Rover активні стабілізатори керуються ШІ в реальному часі.

У Формулі-1 стабілізатори застосовуються як «регульовані елементи», що впливають на баланс боліда при налаштуванні під конкретну трасу.

### 1.3. Методи визначення кутових параметрів установки коліс авто

Кутові параметри установки коліс – це геометричні величини, що визначають орієнтацію коліс відносно вертикальної та горизонтальної площин [2]. До основних параметрів належать:

- Розвал (camber) – кут нахилу площини колеса у фронтальній площині;
- Сходження (toe-in/toe-out) – різниця відстаней між передніми й задніми краями коліс у горизонтальній площині;
- Кастер (caster) – кут нахилу осі повороту колеса у поздовжній площині.

Додатково: поздовжній та поперечний нахил шкворня, центр кочення, дорожній просвіт тощо.

#### Методи визначення кутів установки коліс.

##### 1. Геометричний (оптичний) метод

Використовується на СТО та в лабораторіях:

Основа – відбиття світлових променів від дзеркал, прикріплених до коліс. Промені формують світлову сітку на екранах або фотоелементах, за якою обчислюються кути.

Поширені системи: ОПТИМА, Beissbarth, Hofmann.

Переваги:

- Висока точність (до  $0,01^\circ$ );
- Швидкість вимірювання (2–3 хв на колесо).

##### 2. Комп'ютерно-електронний метод (3D стенди розвалу-сходження).

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Заснований на аналізі зображень міток, які кріпляться на колеса, з декількох камер. Стенди обробляють зображення в реальному часі, при цьому автоматично вираховують всі геометричні параметри підвіски.

Прилади: Hunter 3D, JohnBean Visualiner, Bosch FWA.

Переваги:

- Висока швидкість;
- Багатофункціональність (одночасне вимірювання до 12 параметрів);
- Збереження та аналіз результатів на комп'ютері.

### 3. Шаблонно-лінійковий метод

Застосовується для польових або навчальних вимірювань. Використовується шаблон зі шкалами та вимірювальна рейка. Вимірювання проводиться шляхом замірів відстаней до країв дисків.

Мінуси:

- Низька точність;
- Залежність від людського фактора.

### 4. Лазерні методи.

Лазери проєктують світлові лінії на шкалу або екран. Поширені в переносних пристроях. Принцип схожий до оптичного, але з використанням лазерних джерел світла.

Використовуються в компактних пристроях для мобільного контролю кутів установки.

### 5. Випробувальні стенди для автомобільних досліджень.

У наукових лабораторіях і полігонах можуть застосовуватися:

- Високоточні поворотні платформи;
- Датчики інклинації та переміщення;
- Вимірювальні плити з маркерними системами.

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Документи та стандарти: ДСТУ ISO 3888, ISO 4138, ГОСТ 25478 – визначають методи випробувань транспортних засобів. Вимоги автозаводів (Mercedes-Benz, Toyota, BMW) мають внутрішні специфікації [3].

6. Стенди для регулювання кутів установки коліс.



Рис. 1 – Стенд AX313S3D-1 від ANDRMAX

Цей стенд оснащений високоточними камерами та програмним забезпеченням для швидкого та точного вимірювання кутів установки коліс.



Рис. 2 – Класичний високоточний 3D стенд URS400BV від Trommelberg

Стенд забезпечує точне вимірювання та регулювання кутів установки коліс, що підвищує безпеку та комфорт під час руху.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Рис. 3 – Стенд перевірки кутів установки коліс HUNTER QuickCheckDrive

Цей стенд дозволяє швидко перевіряти кути установки коліс без необхідності зупинки автомобіля, що зручно для автосервісів з великим потоком клієнтів.

Таблиця 1.1. Таблиця нормативних значень кутів установки коліс

Марка автомобіля	Сходження (мм)	Розвал (°)	Кастер (°)
Audi A8	$3,55 \pm 0,47$	$0^{\circ}30' \pm 30'$	$4^{\circ} \pm 30'$
BMW M3	$2,0 \pm 0,6$	$-0^{\circ}17' \pm 5'$	$9^{\circ}18' \pm 30'$
DAEWOO Nexia	$0 \pm 1$	$-0^{\circ}25' \pm 45'$	$1^{\circ}45' \pm 1^{\circ}$
OPEL Vectra	$-1,5 \pm 1,0$	$-0^{\circ}40' \pm 45'$	$2^{\circ} \pm 1^{\circ}$

#### 1.4. Вплив жорсткості стабілізатора підвіски на кути встановлення коліс автомобіля

Стабілізатор поперечної стійкості – це елемент підвіски, який обмежує різницю у вертикальному переміщенні лівого і правого колеса однієї осі. Його жорсткість безпосередньо впливає не тільки на крен кузова під час

повороту, а й на «динамічні зміни кутів установки коліс», зокрема «розвалу, сходження та кастера».

Кінематика підвіски під впливом стабілізатора.

Підвіска є рухомою системою важелів, які визначають положення коліс у просторі. Коли автомобіль входить у поворот або потрапляє на нерівність:

- одне колесо підіймається, інше – опускається,
- стабілізатор чинить опір різниці ходу обох коліс, створюючи «торсійний момент».

Цей момент «впливає на геометричні положення коліс», змінюючи кути розвалу і сходження – навіть «на однаковому дорожньому профілі».

Вплив на кути розвалу (Camber).

При кренах кузова без стабілізатора розвал «стає позитивним (верх колеса нахилиється назовні)» на зовнішньому колесі, і негативним на внутрішньому. Жорсткий стабілізатор «обмежує кут крену», тим самим «зменшуючи зміну кута розвалу», що «покращує зчеплення шин з дорогою».

У спортивних авто розвал регулюється з урахуванням жорсткості стабілізатора, щоб досягти «максимального контакту шини з дорожнім полотном при маневрах».

Вплив на сходження (Toe).

Динамічне стиснення підвіски викликає зміну довжини важелів і може призвести до «зміни сходження». Жорсткий стабілізатор зменшує амплітуду ходу підвіски – отже, «сходження коліс залишається більш стабільним». У разі слабкого стабілізатора кут сходження може «плавати», що веде до нестійкого курсового руху.

Вплив на кастер (Caster).

Кастер менше піддається зміні при роботі стабілізатора, але «при перекосі підвіски через асиметричне навантаження» може змінюватися кут осі повороту, що впливає на реакції рульового керування.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Таблиця 1.2. Баланс жорсткості стабілізатора

Жорсткий стабілізатор	М'який стабілізатор
Зменшує крен кузова	Дозволяє незалежну роботу підвіски
Мінімізує зміну кутів установки коліс	Допускає більші відхилення кутів
Покращує керованість на поворотах	Кращий комфорт на нерівностях
Підвищує ризик підвищеного навантаження на одне колесо	Рівномірніші вертикальні навантаження

«Жорсткість стабілізатора впливає на стабільність геометрії підвіски» при динамічних навантаженнях. «Чим вища жорсткість», тим «менше змінюються кути розвалу та сходження» – це корисно для спортивних авто, але менш комфортно на нерівностях. «Оптимальний підбір жорсткості стабілізатора» необхідний залежно від типу авто: легковий, кросовер, позашляховик, вантажівка тощо.

### 1.5. Практичне значення стабілізаторів підвіски

Стабілізатор поперечної стійкості – один із ключових елементів сучасної автомобільної підвіски, що має значний вплив на безпеку, комфорт і довговічність транспортного засобу. Його вплив проявляється в різних аспектах практичної експлуатації автомобіля – від поведінки на поворотах до зменшення зносу шин.

#### 1. Підвищення курсової стійкості та керованості.

Під час поворотів автомобіля або екстрених маневрів стабілізатор зменшує крен кузова, утримуючи центр мас ближче до вертикальної осі. Це забезпечує:

- стабільнішу поведінку авто на високих швидкостях;
- точнішу реакцію на повороти керма;

- зменшення ефекту «перекидання» у високих авто (SUV, мікроавтобуси).

Особливо важливо для спортивних і позашляхових автомобілів, які рухаються з великими поперечними прискореннями.

## 2. Покращення зчеплення шин із дорогою

Завдяки стабілізації положення кузова стабілізатор:

- забезпечує рівномірне розподілення навантаження на колеса;
- дозволяє зменшити динамічні зміни кутів розвалу, що зберігає максимальну контактну пляму шини.

Це сприяє:

- підвищенню ефективності гальмування;
- скороченню гальмівного шляху на поворотах;
- більш стабільному проходженню траєкторії.

## 3. Зниження зносу шин

Стабілізатор зменшує коливання геометрії підвіски, які призводять до:

- неоднорідного стирання протектора;
- бокового зсуву коліс;
- переохолодження або перегріву однієї сторони шини.

Це дозволяє збільшити ресурс шин на 10–20%, залежно від режиму експлуатації.

## 4. Оптимізація ресурсів підвіски

Стабілізатори зменшують навантаження на амортизатори, важелі та опори підвіски при асиметричних збуреннях (наїзди на бордюри, ями):

- демпфують різницю в ході коліс;
- зменшують амплітуду переміщення окремих елементів;
- знижують втому металу в кріпленнях і з'єднаннях.

## 5. Підвищення комфорту пасажирів

У поєднанні з грамотною налаштуванням амортизаторів, стабілізатор:

- зменшує неприємне відчуття кренів під час поворотів;

					<b>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</b>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1. Підвіска на подвійних поперечних важелях

Підвіска на двох поперечних важелях (англ. Double Wishbone Suspension) – це незалежна підвіска, яка широко використовується в автомобілебудуванні, особливо в спортивних та високопродуктивних автомобілях.

Конструкція та принцип дії.

Система складається з двох поперечних важелів: верхнього та нижнього, які з'єднують колесо з кузовом автомобіля. Кожен важіль має два точки кріплення до кузова та одну до поворотного кулака. Між важелями розташовується амортизатор та пружина, які забезпечують вертикальний рух колеса [4].

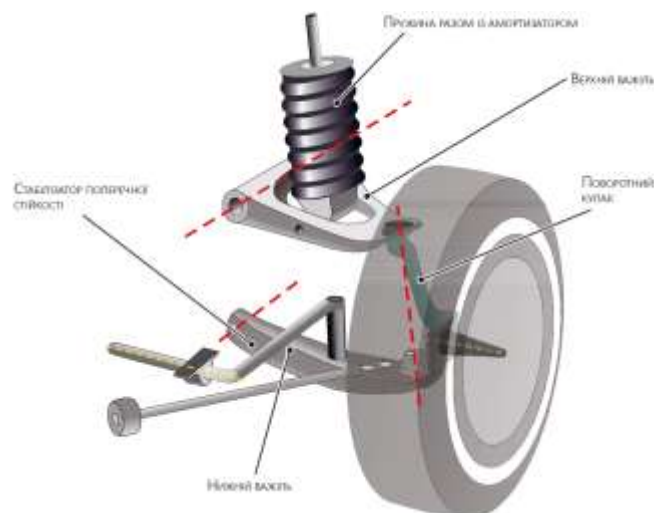


Рис. 4 – Підвіска на двох поперечних важелях

Ця конструкція дозволяє інженерам точно контролювати рух колеса під час ходу підвіски, зокрема [5]:

- Кут розвалу (camber)
- Кут кастера (caster)
- Сходження (toe)
- Висоту центру крену (roll center height)
- Радіус скрабу (scrub radius)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ

Арк.

17

Завдяки цьому забезпечується оптимальний контакт шини з дорогою, покращується керуваність та стійкість автомобіля.

Перевагами такої підвіски є:

- Точне керування геометрією колеса дозволяє зберігати оптимальний кут розвалу під час руху, що покращує зчеплення з дорогою.
- Покращена керуваність, що зменшує ефект підрулювання та забезпечує стабільність при проходженні поворотів.
- Гнучкість у налаштуванні, а саме можливість адаптації підвіски під різні умови експлуатації та стилі водіння.

Недоліками вважають:

- Складність конструкції, адже присутня більша кількість компонентів у порівнянні з іншими типами підвісок.
- Вища собівартість через складнішу конструкцію та необхідність точного налаштування.
- Обмеження простору. Така конструкція займає більше місця, що може бути критичним у компактних автомобілях.

Підвіска з двома поперечними важелями однакової довжини забезпечує незмінність положення площини обертання колеса відносно вертикалі (кут  $X = 0$ ). При цьому спостерігається значна зміна колії ( $\Delta i$ ), що може спричинити інтенсивне зношення шин і погіршення бічної стійкості автомобіля.

На відміну від неї, підвіска з важелями різної довжини дозволяє обмежити зміну кута нахилу площини обертання колеса до невеликих значень (приблизно  $5^\circ$ – $6^\circ$ ), що дає змогу гасити гіроскопічні моменти за рахунок тертя в системі. Допустима зміна колії  $\Delta i$  в цьому випадку не повинна перевищувати 4–5 мм, що забезпечується пружністю шин. Оптимальне співвідношення довжин важелів визначається як  $r_1/r_2 = 0,55 \dots 0,65$ , що забезпечує вигідне кінематичне зміщення кута розвалу в сторону негативного під час стискання підвіски.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

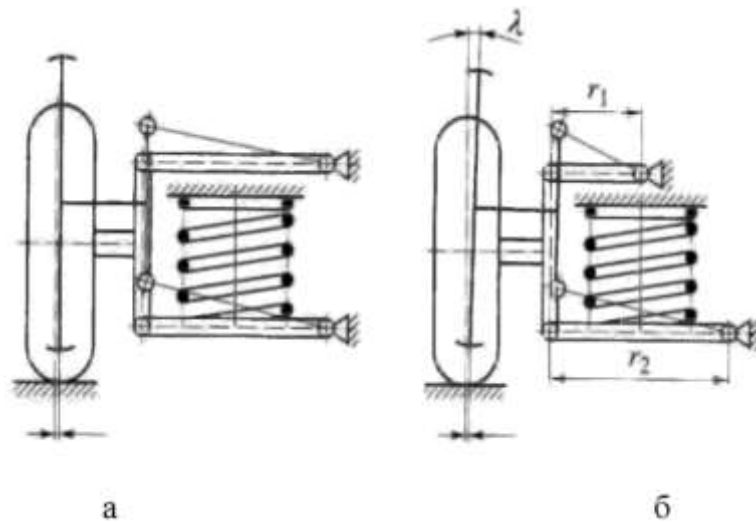


Рис. 5 – Підвіска на двох поперечних важелях

Геометрія та принцип роботи. У такій конструкції на кожному боці автомобіля встановлено по два поперечних важелі, внутрішні кінці яких кріпляться шарнірно до кузова або поперечної балки, а зовнішні приєднуються до цапфи поворотного кулака (у передній підвісці) або до неповоротної стійки (у задній підвісці). Важелі можуть бути розміщені паралельно або під кутом один до одного в подовжній чи поперечній площинах. Підвіски на подвійних важелях характеризуються точністю напрямного механізму, що забезпечує стабільні кути установки коліс і, відповідно, високу керованість.

Застосування в автомобілебудуванні. Завдяки високій точності та передбачуваній поведінці, підвіска з подвійними поперечними важелями широко використовується в конструкціях спортивних, гоночних і представницьких автомобілів. Наприклад, усі сучасні боліди Формули-1 мають саме таку конструкцію підвіски на передній та задній осі. Вона дає змогу точно налаштувати кінематику руху коліс та кути розвалу в процесі експлуатації.

Поворотний механізм і типи шарнірів. У передній підвісці така конструкція повинна забезпечувати можливість повороту коліс. Для цього або цапфи з'єднуються з важелями через кульові шарніри з двома ступенями свободи, або поворот здійснюється навколо шкворнів, які обертаються в підшипниках. У сучасному автомобілебудуванні шкворні переважно

									Арк.
									19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ				

використовуються у важких підвісках автобусів і вантажівок, тоді як у легкових автомобілях перевага надається кульовим шарнірам завдяки їх простоті й меншій потребі в обслуговуванні.

Приклад конструкції передньої шкворневої підвіски. Передня шкворнева підвіска монтується на сталевій кований балці, яка забезпечує високу жорсткість. Балка кріпиться до лонжеронів кузова болтами. У ній запресована порожниста вісь, до якої через гумометалеві шарніри приєднані внутрішні кінці нижніх важелів, а у верхній частині балки аналогічно встановлена вісь верхнього важеля. Регулювання кутів нахилу шворня і розвалу здійснюється прокладками між віссю і балкою.

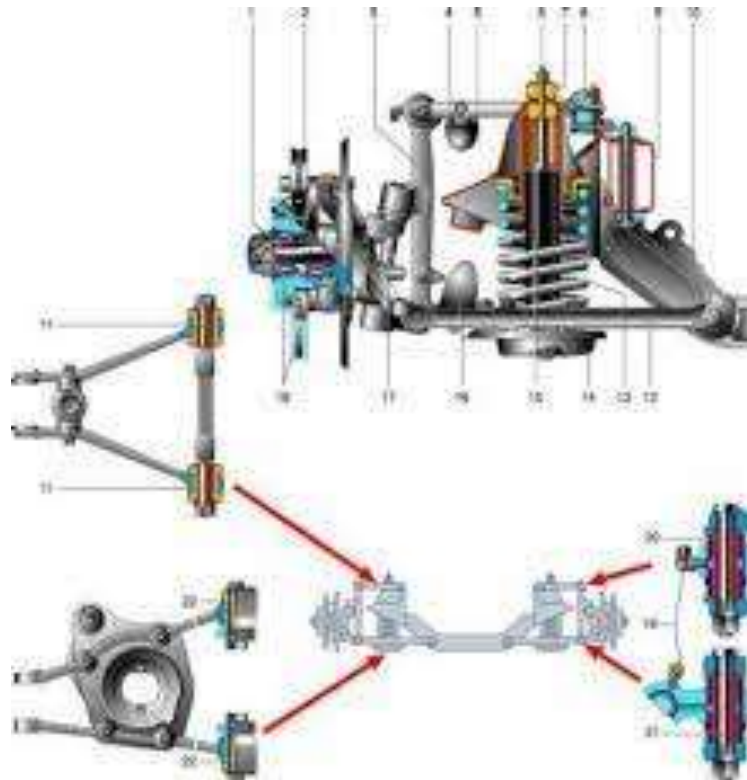


Рис. 6 – Схема передньої шкворневої підвіски:

- 1 - цапфа поворотного кулака; 2 - гальмівний диск; 3 - стійка; 4 - буфер відбою; 5 - верхній важіль; 6 - шток амортизатора; 7 - подушки верхнього кріплення амортизатора; 8 - вісь верхнього важеля; 9 - лонжерон; 10 - балка; 11 - гумометалеві шарніри верхнього важеля; 12 - нижній важіль; 13 - пружина; 14 - чашка пружини; 15 - амортизатор; 16 - буфер стиснення; 17 - шворнінь; 18 - роликові підшипники маточини колеса; 19 - прес-маслянки; 20 і 21 - різьбові втулки стійки; 22 - гумометалеві шарніри нижнього важеля

					<b>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Важелі складаються з парних сталевих елементів, з'єднаних між собою пружинною опорою та буфером відбою. Зовнішні кінці важелів з'єднуються зі стійкою підвіски за допомогою різьбових втулок і пальців. Шарніри змащуються через прес-маслянки, а нижній шарнір також обслуговує голчастий підшипник шворня.

Узагальнення. Сучасні варіації подвійних важелів у задній підвісці легкових автомобілів є результатом удосконалення цієї схеми. Розділення кожного важеля на два дає змогу реалізувати компактні, але ефективні компонування, що поєднують гнучкість налаштувань і надійність.

## 2.2. Багатоважільна підвіска

Багатоважільна підвіска (англ. Multi-link suspension) – це тип незалежної підвіски, в якій колесо з'єднане з кузовом автомобіля п'ятьма або більше важелями, кожен з яких виконує свою кінематичну функцію. Така структура забезпечує високу точність у контролі положення колеса під час роботи підвіски в різних режимах руху [7].

Багатоважільна підвіска є подальшим розвитком концепції подвійного поперечного важеля з розділенням функцій на більшу кількість напрямних елементів.

Типова п'ятиважільна система складається з таких елементів:

- Два поперечних важелі: верхній та нижній (або їх комбінація), які контролюють розвал і частково сходження.
- Два поздовжні важелі, що протидіють зсуву при гальмуванні й розгоні.
- Один діагональний або допоміжний важіль, який забезпечує стабільність геометрії при скручуванні підвіски.

Усі важелі з'єднані з несучими елементами кузова або допоміжною рамою через еластомерні або сферичні шарніри (сайлентблоки, кульові опори), що дозволяє точно визначати траєкторію руху ступиці колеса.

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

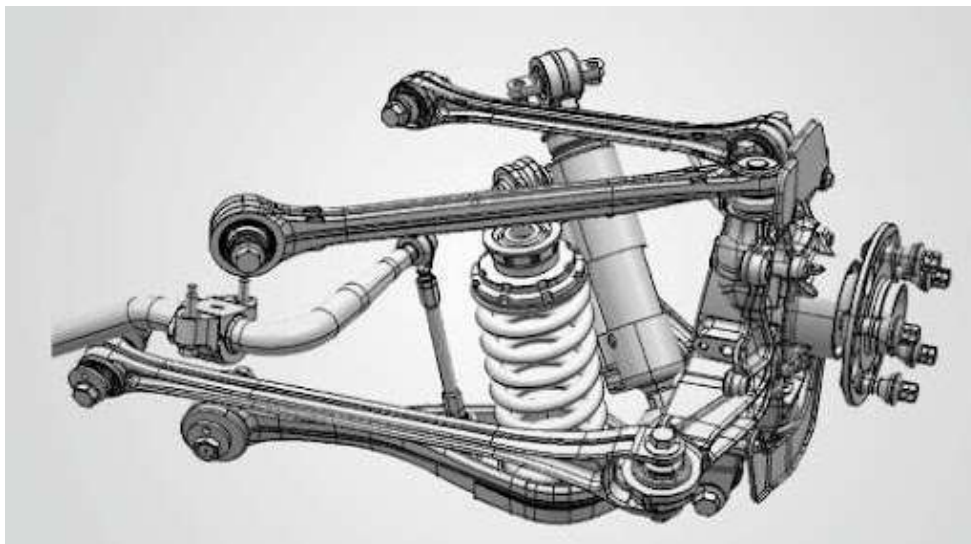


Рис. 7 – Схема багатоважільної підвіски

Принцип дії. На відміну від підвіски типу «МакФерсон» чи «двох поперечних важелів», у багатоважільній конструкції навантаження та контроль кута положення колеса розподіляються між декількома незалежними важелями. Завдяки цьому:

- забезпечується мінімальне відхилення кута розвалу в динаміці;
- зменшуються зміни сходження при стисканні/розтягуванні підвіски;
- знижується внутрішнє зусилля в кожному важелі, що покращує ресурс конструкції.

Таблиця 2.1. Переваги багатоважільної підвіски

Перевага	Пояснення
<b>Точність керування</b>	Краще збереження геометрії коліс у поворотах та при вертикальних коливаннях
<b>Підвищений комфорт</b>	Ізоляція кузова від вібрацій та жорстких ударів
<b>Менше зношення шин</b>	Завдяки стабільному положенню колеса на контакт з дорогою
<b>Гнучкість у налаштуванні</b>	Можливість регулювати кожен параметр незалежно
<b>Розділення функцій</b>	Кожен важіль виконує окрему задачу, що зменшує втому матеріалів

До недоліків відносять складність конструкції: потребує високої точності виготовлення; високу вартість виробництва та обслуговування; більшу масу та об'єм у порівнянні з простішими схемами [8].

Застосування. Багатоважільна підвіска використовується в преміум-класі (Audi A6, BMW 5-Series, Mercedes-Benz E-Class); у спортивних авто (Porsche 911, Nissan GT-R); у електромобілях (Tesla Model S); у деяких позашляховиках з незалежною задньою підвіскою.

### 2.3. Незалежна підвіска типу Макферсон

Загальна характеристика. Підвіска типу МакФерсон (MacPherson strut) є однією з найпоширеніших конструкцій незалежної підвіски, яка широко застосовується у легкових автомобілях завдяки своїй простоті, компактності та економічності. Цей тип підвіски поєднує у собі функції амортизатора та направляючої стійки, що дозволяє зменшити кількість елементів у підвісці без значної втрати керованості й комфорту.

Конструкція була розроблена інженером Ерлом МакФерсоном у 1945 році для компанії General Motors, а пізніше вдосконалена й отримала широке впровадження у моделях Ford у 1950-х роках. Відтоді вона стала стандартом у передніх підвісках багатьох сучасних авто.

Типова незалежна підвіска типу МакФерсон складається з таких основних елементів:

- Амортизаційна стійка (телескопічна або патронного типу);
- Гвинтова пружина, змонтована навколо амортизатора;
- Верхнє опорне кріплення з кульовим підшипником;
- Нижній поперечний важіль, що з'єднує колесо з кузовом через шарніри;
- Кульова опора на нижньому кінці стійки для повороту колеса;
- Стабілізатор поперечної стійкості (у разі наявності).

					<b>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23



З обох боків до підрамника встановлюються ковані поперечні важелі, кожен з яких шарнірно приєднаний у двох точках через гумові втулки. Такий спосіб кріплення забезпечує необхідну жорсткість підвіски у поздовжньому напрямку. Зі сторони колеса поперечні важелі з'єднуються з поворотними кулаками за допомогою сферичних шарнірів (кульових опор).

Поворотні кулаки здійснюють зміну напрямку обертання коліс шляхом шарнірного з'єднання з рульовими тягами (7). Верхня частина кулака фіксується до амортизаційної стійки за допомогою затискного з'єднання (3), нижня – з'єднана з поперечним важелем. У корпусі поворотного кулака розміщується маточина колеса з вмонтованим підшипником ступиці.

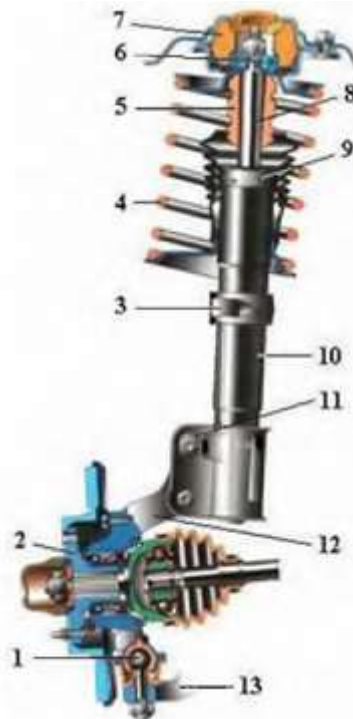


Рис. 9 – Конструкція підвіски Макферсон (фрагмент):

1 - сферичний шарнір; 2 - маточина; 3 - поворотний важіль; 4 - пружина підвіски; 5 - буфер стиснення; 6 - радіально-наполегливий кульковий підшипник верхньої опори; 7 - верхня опора (гумовий блок); 8 - шток; 9 - опора буфера стиску; 10 - амортизаторная телескопічна стійка; 11 - клеомове з'єднання (ексцентриковий болт); 12 - поворотний кулак; 13 - нижній важіль

					<b>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Амортизаційна стійка (10) (див. рис. 9) є комбінованим елементом підвіски, що поєднує в собі пружний елемент (гвинтову пружину (4) або пневматичний модуль) та телескопічний гідравлічний амортизатор. Пружина встановлюється під кутом до осі стійки, зміщена у бік колеса. Такий конструктив дозволяє знизити поперечні навантаження на шток, направляючу втулку та поршень амортизатора, що виникають внаслідок вертикальних сил, прикладених до колеса, а також формує негативне плече обкатки, що покращує стійкість керування.

Для зміни жорсткісної характеристики під час ходу стиснення у конструкцію включено буфер стиснення (5). Нижня частина стійки з'єднується з поворотним кулаком (12). Регулювання кута розвалу колеса здійснюється за допомогою верхнього ексцентрикового болта (11), яким утворюється затискне (клемове) з'єднання. Нижній болт виконує функцію осі повороту колеса.

Верхня частина стійки кріпиться до кузова (зазвичай до брызговика крила) через опорний вузол, який містить радіально-наполегливий кульковий підшипник (6), розміщений у деформівному гумовому блоці (7). Це з'єднання дозволяє обмежене коливання стійки під впливом навантажень, за що підвіска типу МакФерсон іноді умовно називається «підвіскою хиткої свічки».

Стабілізатор поперечної стійкості.

Стабілізатор виконує функцію зменшення бічного крену кузова при поворотах, діючи як торсіонний (скручувальний) елемент. Його центральна частина закріплена до підрамника за допомогою двох гумометалевих опор з еластичними подушками, що забезпечують фіксацію в поперечному напрямку.

Передача зусилля в поздовжньому напрямку здійснюється через сполучні штанги (стійки стабілізатора), які з'єднують кінці стабілізатора з нижніми поперечними важелями або безпосередньо з амортизаційними

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

стійками. У кінцях штанг встановлені шарнірні наконечники, які компенсують кутові переміщення при роботі підвіски.

Конструкція дозволяє реалізувати поворот коліс за допомогою кульової опори у нижній частині стійки та верхнього опорного підшипника, який обертається під час обертання керма.

Переваги конструкції це простота та компактність – відсутність верхнього важеля зменшує кількість елементів; низька вартість виробництва та обслуговування; мала маса у порівнянні з багатоважільними підвісками; компактне компонування – збільшує об'єм моторного відсіку або салону.

Недоліками підвіски МакФерсон є обмежені можливості геометричного налаштування (розвал, кастер); чутливість до навантаження та зміни положення кузова – кут розвалу суттєво змінюється при стисканні підвіски; менша точність контролю кінематики коліс у порівнянні з багатоважільною схемою; менший комфорт при інтенсивних маневрах або русі по поганих дорогах.

Застосування. Підвіска типу МакФерсон є стандартом для передніх підвісок у більшості сучасних легкових автомобілів компактного та середнього класу, таких як: Toyota Corolla, Ford Focus, Volkswagen Golf, Hyundai Elantra, Skoda Octavia тощо.

У задніх підвісках використовується рідше, хоча іноді зустрічається у спрощеному вигляді на передньопривідних автомобілях із напівзалежною балкою.

Незалежна підвіска типу МакФерсон поєднує у собі оптимальний баланс між вартістю, функціональністю та компактністю. Вона добре підходить для міських та універсальних автомобілів, де пріоритетом є зниження вартості виробництва, простота технічного обслуговування та економія місця. Однак для транспортних засобів, орієнтованих на високу динаміку, комфорт або спортивні характеристики, зазвичай застосовуються складніші підвіски – багатоважільні або двоважельні.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.4. Характеристики підвіски

Пружна характеристика підвіски описує залежність між вертикальним навантаженням на підвіску (позначається як  $T$ ) та її вертикальною деформацією (позначається як  $s$ ). Ця характеристика є ключовим параметром у проектуванні підвіски, оскільки вона визначає, як підвіска реагує на навантаження та впливає на комфорт, стійкість і керуваність автомобіля.

Види пружних характеристик.

Лінійна характеристика: Жорсткість підвіски залишається постійною при зміні навантаження. Така характеристика забезпечує передбачувану поведінку, але може бути менш ефективною при великих навантаженнях.

Прогресивна характеристика: Жорсткість підвіски збільшується зі зростанням навантаження. Це дозволяє підвісці бути м'якою при малих навантаженнях (покращуючи комфорт) і жорсткішою при великих навантаженнях (покращуючи керуваність).

Кусково-лінійна характеристика: Поєднує ділянки з різною жорсткістю, що дозволяє оптимізувати поведінку підвіски в різних умовах.

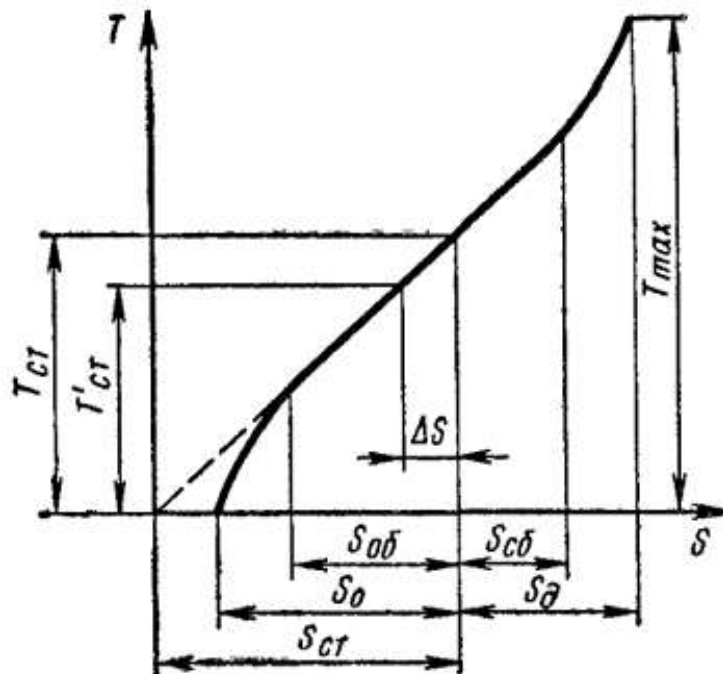


Рис. 10 – Вертикальна пружна характеристика передньої підвіски легкового автомобіля

									Арк.
									28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ				

Пружні властивості автомобільної підвіски Якість роботи підвіски автомобіля значною мірою визначається її пружною характеристикою – тобто залежністю між вертикальним навантаженням на колесо ( $G, H$ ) і вертикальним прогином підвіски ( $f, \text{мм}$ ), який вимірюється в точці розміщення осі колеса. Через наявність тертя, демпфування та інших нелінійних чинників, ця залежність є різною під час стиску (навантаження) та відбою (розвантаження). Для інженерного аналізу зазвичай використовують усереднену криву, розташовану між кривими навантаження та розвантаження.

Пружні характеристики описуються низкою ключових параметрів:

1. Статичний прогин Визначається як вертикальне переміщення осі колеса при навантаженні від власної маси автомобіля (з урахуванням типового завантаження). Статичний хід прямо пов'язаний із комфортом: оптимальне значення дозволяє важелям зайняти горизонтальне положення, що забезпечує правильну кінематику. Наприклад, для позашляховиків цей показник може досягати 85–100 мм.
2. Динамічний хід Це вертикальна деформація підвіски під дією динамічних навантажень, зокрема при наїзді на нерівності або русі по вибоїстій дорозі. Межа динамічного ходу визначається стисканням до буфера або обмежувача. Для автомобілів класу С прийнятним вважається 70–80 мм, тоді як для SUV або кросоверів бажано понад 100 мм.
3. Повний хід підвіски Це сума статичного та динамічного прогинів. Наприклад, у передньої підвіски автомобіля ГАЗ-21 "Волга" статичний прогин становив 87 мм, а динамічний хід – 101 мм, що загалом забезпечувало 188 мм ходу – дуже високий показник для забезпечення комфорту на дорогах з різною якістю покриття.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняння з підвісками світових виробників Toyota Corolla (TNGA платформа): використовує незалежну підвіску з прогресивною пружною характеристикою. Випробування показали, що динамічний хід передньої підвіски становить приблизно 65–75 мм, а задньої – до 85 мм, що забезпечує чудову плавність ходу без компромісів у керуваності.

BMW 3 Series (G20): подвійні поперечні важелі й багатоважільна конструкція забезпечують адаптивну пружність завдяки використанню змінної жорсткості амортизаторів. Ходи підвіски в адаптивному режимі підлаштовуються до швидкості та навантаження, дозволяючи зберігати баланс між комфортом і динамікою.

Ford Focus IV: задня незалежна підвіска з використанням пружин із нелінійною характеристикою дозволяє оптимізувати хід при частковому й повному завантаженні. При цьому кут встановлення коліс зберігається у допустимих межах навіть при ході понад 90 мм.

Жорсткість підвіски.

Жорсткість підвіски (також відома як жорсткість ходу підвіски) визначається як тангенс кута нахилу дотичної до середньої лінії пружної характеристики системи підвіски на ділянці її робочого ходу. У спрощеному вигляді її приймають за тангенс кута нахилу графіка пружної характеристики відносно осі абсцис. Одиницею вимірювання жорсткості є ньютон на міліметр (Н/мм).

Слід чітко розмежовувати жорсткість усієї підвіски як системи від жорсткості окремого пружного елемента (пружини, торсіона, ресори тощо), який у контексті загальної теорії автомобіля часто узагальнено називають ресорою – незалежно від типу.

Для практичного використання у розрахунках, жорсткість ресори приводиться до точки прикладання навантаження на колесо, тобто до жорсткості на осі колеса. Це здійснюється з урахуванням кінематики направляючого пристрою підвіски та геометричних співвідношень.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Методи приведення жорсткості: У двохважельних підвісках (з поперечними важелями) жорсткість на колесі визначається за формулою, що враховує співвідношення між довжиною важеля і відстанню від осі обертання до точки прикладення сили пружини.

У підвісці типу Макферсон корекція жорсткості здійснюється з урахуванням кута нахилу пружини, оскільки вона встановлена не вертикально, а під нахилом до вертикалі з метою зниження поперечних навантажень і забезпечення більшої компактності конструкції.

Узагальнено, для приведення жорсткості пружного елемента  $k_{\text{рес}}$  до жорсткості підвіски на колесі  $k_{\text{підв}}$ , використовується коефіцієнт приведення  $\lambda$ , залежний від геометрії важелів і положення пружини:

$$k_{\text{підв}} = \lambda \cdot k_{\text{рес}}, \quad (2.1)$$

де:  $\lambda \in [0.4 \dots 1]$  – коефіцієнт приведення;

$k_{\text{рес}}$  – жорсткість пружного елемента (Н/мм);

$k_{\text{підв}}$  – ефективна жорсткість підвіски (Н/мм).

Енергоємність підвіски.

Енергоємність (або динамічна ємність) підвіски визначає її здатність накопичувати та передавати потенційну енергію пружним елементом під час деформації при дії зовнішніх сил, особливо під час проходження нерівностей дорожнього покриття. Вона є критичним параметром для забезпечення захисту конструкції транспортного засобу від пробоїв та перевантажень.

Кількісно енергоємність підвіски виражається через коефіцієнт динамічності [13]:

$$\eta = G_{\text{max}} / G_{\text{ст}}, \quad (2.2)$$

де:  $G_{\text{max}}$  – вертикальне навантаження на колесо при повному динамічному прогині підвіски,

$G_{\text{ст}}$  – навантаження на колесо при статичному прогині.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для легкових автомобілів загального призначення коефіцієнт динамічності зазвичай становить 2,5...3, тоді як для позашляховиків і кросоверів – може досягати 3...4 і вище, залежно від призначення та конструкції.

Метод визначення. Енергоємність підвіски також можна визначити графічним методом як площу під кривою пружної характеристики (сила–прогин), обмежену між навантаженням при повному динамічному прогині та навантаженням при статичному прогині. Ця площа відповідає енергії, що накопичується в пружному елементі підвіски.

Практичне значення. Висока енергоємність дозволяє підвісці ефективно поглинати механічну енергію, що виникає при русі по нерівностях, знижуючи ризик «пробою» підвіски та захищаючи несучі елементи кузова і агрегати трансмісії.

Збільшення енергоємності досягається:

- збільшенням ходу підвіски (обмежено габаритами автомобіля),
- збільшенням жорсткості (що може погіршити комфорт),
- використанням пружних елементів із прогресивною характеристикою, тобто змінною жорсткістю по мірі деформації.

Приклади таких елементів. Багатолистові ресори зі змінною геометрією листів; гвинтові пружини зі змінним кроком або діаметром навивки (конічні, бочкоподібні); пружини з перемінним діаметром дроту; додаткові буферні елементи з гуми або поліуретану, які включаються в роботу при максимальних навантаженнях.

Плавність ходу автомобіля визначає комфортність поїздки, зменшуючи вплив нерівностей дороги на пасажирів. Цей параметр залежить від конструкції підвіски, її жорсткості та здатності до демпфування.

Плавність ходу характеризується здатністю підвіски ізолювати кузов від дорожніх нерівностей, забезпечуючи мінімальні вертикальні прискорення та вібрації. Основними факторами, що впливають на цей параметр, є

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

жорсткість підвіски, маса безпружинних елементів та ефективність амортизаторів.

Частота власних коливань кузова є ключовим показником плавності ходу. Для забезпечення комфортної поїздки ця частота повинна знаходитися в межах 1–1,5 Гц (60–90 коливань на хвилину), що відповідає природним ритмам людського тіла. Високочастотні коливання (500–700 коливань на хвилину), спричинені безпружинними масами, повинні бути ефективно демпфовані амортизаторами.

Розподіл маси між передньою та задньою осями впливає на налаштування жорсткості підвіски. У випадку рівномірного розподілу маси жорсткість передньої та задньої підвісок повинна бути приблизно однаковою. Якщо ж маса переважно зосереджена на одній осі, відповідна підвіска повинна бути м'якшою для забезпечення балансу та комфортності.

Використання пружних елементів зі змінною жорсткістю, таких як прогресивні пружини або багатолистові ресори, дозволяє поєднати комфорт при малих деформаціях та енергоємність при великих навантаженнях. Це забезпечує м'яку реакцію підвіски на незначні нерівності та запобігає "пробою" при значних деформаціях.

Оптимальна плавність ходу досягається шляхом балансування між жорсткістю підвіски, ефективністю демпфування та розподілом маси автомобіля. Сучасні технології, такі як адаптивні амортизатори та пружини зі змінною жорсткістю, дозволяють досягти високого рівня комфорту без компромісів у керованості.

Кінематичні та еластокінематичні властивості підвіски.

Кінематика підвіски визначає просторову траєкторію переміщення колеса під час дії ходу підвіски. Це включає не лише вертикальне переміщення, але й зміну геометричних параметрів положення колеса – зокрема, розвалу та сходження. Такі зміни значно впливають на стійкість

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автомобіля під час руху та проходження поворотів, особливо на високих швидкостях.

Еластокінематичні характеристики відображають зміну положення коліс відносно кузова транспортного засобу під впливом навантажень – зокрема, бічних і поздовжніх сил, а також моментів, що виникають під час маневрування. Такі зміни обумовлені наявністю еластичних елементів у конструкції – гумометалевих шарнірів (сайлентблоків), пружин, ресор та інших пружних елементів. Вивчення еластокінематики дозволяє прогнозувати поведінку автомобіля в динамічних режимах руху, враховуючи деформації конструктивних елементів підвіски.

Демпфуючі властивості підвіски.

Демпфуюча характеристика відображає здатність підвіски поглинати та гасити коливальні рухи, які виникають під час руху автомобіля, особливо при подоланні нерівностей дороги. Основним елементом, який реалізує цю функцію, є амортизатор, параметри якого визначають рівень демпфірування при стиску та відбою. У технічному сенсі демпфуюча характеристика відображається графічною залежністю сили демпфірування від швидкості відносного переміщення амортизатора (м/с).

У сучасних автомобілях застосовуються амортизатори з нелінійними характеристиками, що забезпечують прогресивне демпфірування залежно від умов руху. Зокрема, використовуються конструкції з багаторівневим демпфуванням або з електронним керуванням, які дозволяють адаптувати жорсткість у режимі реального часу, покращуючи керованість і комфорт.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

3.1. Розрахунок необхідної жорсткості стабілізатора для зменшення кутів крену підресорених мас

У ході проведеного дослідження було встановлено, що у наявній технічній літературі недостатньо опрацьовано питання впливу кута крену підресорених мас на керованість і поперечну стійкість автомобіля, оснащеного незалежною підвіскою типу Макферсон. Більшість джерел лише побіжно згадують про негативні наслідки поперечного крену в таких конструкціях, не надаючи достатньо обґрунтованих розрахунків або рекомендацій щодо його обмеження за рахунок зміни жорсткості стабілізатора поперечної стійкості.

З огляду на це, в межах даного розділу було виконано розрахунок оптимальної жорсткості стабілізатора поперечної стійкості з метою мінімізації величини кута поперечного крену кузова (підресорених мас) у динамічних режимах руху. Особливу увагу приділено зв'язку між кутом крену та реакцією автомобіля на кермування при проходженні поворотів. Для прикладного аналізу було використано геометричні та масово-інерційні характеристики автомобіля ЗАЗ 1103 «Славута». Початкові дані, що є основою для подальших обчислень, згруповано в таблиці 3.1 нижче.

Ці параметри дозволяють розрахувати необхідне додаткове зусилля, яке має створювати стабілізатор для зменшення кута крену до заданого рівня, а також відповідну крутильну жорсткість стабілізатора.

З метою дослідити вплив кута крену на показники керованості та стійкості автомобіля, поступово збільшували кутову жорсткість підвіски, шляхом варіації жорсткості стабілізатора поперечної стійкості.

Оскільки підвищення жорсткості стабілізатора потенційно призводить до погіршення характеристик плавності ходу – зокрема, зростання поперечно-кутових переміщень та кутових прискорень, виникає необхідність

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначити гранично допустиму жорсткість стабілізатора, яка не суперечить нормативним критеріям комфорту під час руху.

Таблиця 3.1. Вихідні дані для розрахунку жорсткості стабілізатора автомобіля ЗАЗ 1103 «Славута»

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
1	Маса автомобіля споряджена	$m$	890	кг
2	База автомобіля	$L$	2320	мм
3	Колія передніх коліс	$t$	1365	мм
4	Висота центра ваги	$h$	500	мм
5	Передня вісь: частка маси від загальної	$m_{п}$	0.56	—
6	Ширина кузова по передній осі	—	1620	мм
7	Прискорення в повороті (розрахункове, 0,4g)	$a_y$	3.92	м/с <sup>2</sup>
8	Динамічний кут крену без стабілізатора	$\phi$	4.5	град.
9	Бажане обмеження кута крену (цільовий максимум)	$\phi_{ц}$	2.5	град.
10	Довжина важеля стабілізатора (від середини до точки кріплення)	$l_{ст}$	300	мм
11	Коефіцієнт пружності передньої підвіски (на колесо)	$k_p$	28	Н/мм
12	Початкове значення жорсткості стабілізатора (для порівняння)	$k_{ст}$	1000	Н·мм/град.

Додатково передбачається виготовлення спеціалізованого стенду, призначеного для виконання ряду експериментальних вимірювань:

- визначення кінематичних переміщень характерних точок конструкції підвіски;
- експериментальне дослідження жорсткісних характеристик стабілізатора та їх зміни залежно від ходу підвіски;

									Арк.
									36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ				

- встановлення залежності між вертикальним ходом підвіски та кутом повороту коліс.

У зв'язку з цим здійснюємо інженерний розрахунок, метою якого є визначення необхідної величини кутової жорсткості стабілізатора поперечної стійкості для забезпечення оптимального балансу між стійкістю, керованістю та комфортом під час руху.

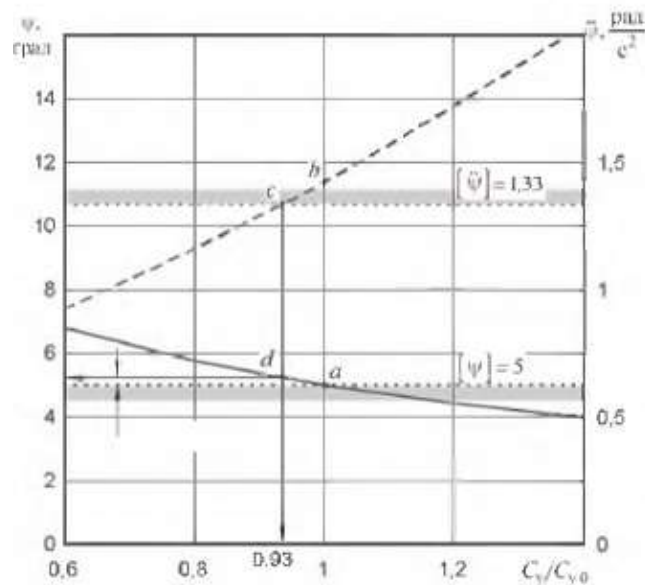


Рис. 11 – Вплив кутової жорсткості підвіски на поперечно-кутові переміщення підресорених мас (—) та їх поперечно-кутові прискорення (- - -)

Підбір стабілізатора поперечної стійкості здійснюється за допомогою розрахунку кутової жорсткості та моменту опору крену кузова. Для цього використовується залежність жорсткості торсіону від геометрії й матеріалу стабілізатора.

Основні формули:

- Кутова жорсткість:  $k = (G \times J) / L$
- Полярний момент інерції (суцільний стержень):  $J = \pi \times d^4 / 32$
- Момент стабілізатора:  $M = k \times \Delta\varphi$

Вихідні дані для автомобіля ЗАЗ-1103 «Славута»:

- Матеріал стабілізатора: Сталь 45
- Модуль зсуву  $G$ :  $8 \times 10^{10}$  Па

- Діаметр стабілізатора (d): 20 мм = 0.02 м
- Довжина плеча стабілізатора (L): 0.4 м

Результати розрахунку.

Полярний момент інерції  $J \approx 1.57e-08 \text{ м}^4$

Кутова жорсткість стабілізатора  $k \approx 3141.59 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$

Оцінка впливу кутової жорсткості стабілізатора на крен автомобіля.

Максимально допустимий рівень поперечно-кутових прискорень визначається нормативним значенням показника комфорту  $\phi = 1,33$ , що відповідає граничному кутовому переміщенню  $\psi = 5^\circ$  [16].

Для оцінки впливу стабілізатора поперечної стійкості на кінематику крену, розраховано кілька варіантів кутової жорсткості підвіски з метою визначення оптимального значення кута поперечного крену кузова. Розрахунок здійснюється за формулою:

$$\psi = (p_i \cdot k_k \cdot m \cdot g) / (m \cdot g + C_\phi), \quad (3.1)$$

де:  $p_i = 0,4$  – коефіцієнт бокового зчеплення;

$k_k = 0,7 \text{ м}$  – плече крену;

$m = 444 \text{ кг}$  – підресорена маса на передню вісь;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння;

$C_\phi$  – кутова жорсткість підвіски (Н·м/рад).

Визначення фактичного кута крену без стабілізатора:

$$\psi = (0,4 \cdot 0,7 \cdot 444 \cdot 9,8) / (444 \cdot 9,8 + 0) = 0,195 \text{ рад} = 11,17^\circ$$

Як видно з графіка на рис. 11, така величина кута крену залишає значний запас до граничного значення. Це дає підстави розглянути можливість застосування стабілізатора із підвищеною жорсткістю.

Розрахунок кута крену зі стабілізатором,  $C_\phi = 5000 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$ :

$$\psi = (0,4 \cdot 0,7 \cdot 444 \cdot 9,8) / (444 \cdot 9,8 + 5000) = 0,1083 \text{ рад} = 6,2^\circ$$

Поперечно-кутове переміщення помітно зменшується, проте межа допустимих прискорень ще не досягнута.

Розрахунок кута крену зі стабілізатором,  $C_\phi = 7000 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$ :

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\psi = (0,4 \cdot 0,7 \cdot 444 \cdot 9,8) / (444 \cdot 9,8 + 7000) = 0,09198 \text{ рад} = 5,3^\circ$$

Цей варіант забезпечує значне зменшення кута крену та відповідає нормам комфортності за допустимим рівнем поперечно-кутових прискорень.

Оцінка за критерієм плавності ходу.

Згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 5349-1:2005, комфортність руху транспортного засобу визначається середньоквадратичними значеннями вертикальних віброприскорень на сидінні водія. Для трьох типів дорожнього покриття встановлено такі граничні значення:

1. Цементобетонне шосе з висотою нерівностей до 6 мм – 1,0 м/с<sup>2</sup>;
2. Мощена бруківка без вибоїн (до 11 мм) – 1,5 м/с<sup>2</sup>;
3. Бруківка з вибоїнами до 30 мм – 2,3 м/с<sup>2</sup> [17].

Таким чином, використання стабілізатора з кутовою жорсткістю  $C_\varphi = 7000 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$  забезпечує як дотримання норм плавності ходу, так і суттєве покращення показників стійкості та керованості транспортного засобу.

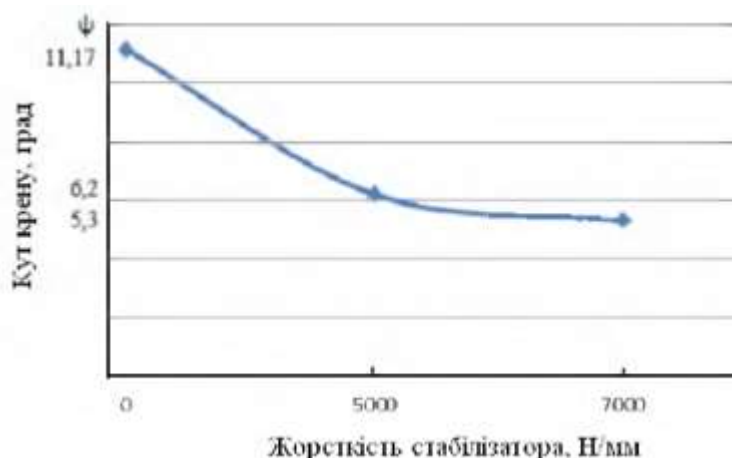


Рис. 12 – Залежність кута крену підресорених мас від жорсткості стабілізатора

Рекомендація. Доцільно встановити стабілізатор з кутовою жорсткістю на рівні  $\approx 7000 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$ .

Зменшення кута крену. Порівняно з варіантом без стабілізатора (кут крену  $\approx 11,17^\circ$ ), встановлення стабілізатора з жорсткістю  $7000 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$  дозволяє знизити кут крену до  $\approx 5,3^\circ$ .

Це значення знаходиться в межах нормативного обмеження (менше 5–6° при боковому прискоренні 0,4g), отже, сприяє покращенню керованості та стійкості автомобіля.

Збереження плавності ходу.

Навіть при підвищенні жорсткості стабілізатора до 7000 Н·м/рад, згідно з оцінками по ДСТУ EN ISO 5349-1:2005, рівень поперечно-кутових прискорень залишається в межах допустимих значень для доріг 1–2 типу.

Таким чином, комфорт пасажирів не погіршується суттєво, а баланс між комфортом і стійкістю досягається успішно.

Конструктивна реалізація.

Досягнення жорсткості 7000 Н·м/рад можливе шляхом збільшення діаметра стабілізатора, зменшення плеча важеля, або застосування сплавів з вищим модулем пружності.

Це не потребує радикального перепроектування підвіски, що робить модифікацію економічно доцільною для досягнення покращених ходових властивостей.

Висновок. Оптимізація стабілізатора поперечної стійкості до жорсткості близько 7000 Н·м/рад для ЗАЗ 1103 «Славута» забезпечує істотне покращення стійкості без помітної шкоди для плавності ходу. Цей компроміс особливо важливий для автомобілів, що експлуатуються в умовах міських маршрутів, де важливі як керованість, так і комфорт.

### 3.2. Дослідження поведінки кінематичних ланок підвіски

Необхідність встановлення залежності кутів коліс від ходів підвіски (кінематичних характеристик) обумовлена низкою критичних факторів, що визначають безпеку, комфорт та ефективність руху автомобіля.

Керованість автомобіля залежить від зміни кутів розвалу і сходження. При русі підвіска зазнає вертикальних переміщень (стиснення / відбій), що викликає зміну геометричного положення коліс (розвалу та сходження).

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Якщо ці зміни не враховані у проєкті – автомобіль втратить точність реакції на поворот керма або проявить нестабільність у повороті (наприклад, надмірну недостатню або надлишкову повертальність). Відсутність регламентованої залежності між ходом підвіски та параметрами розвалу-сходження призводить до втрати керованості. Приклад. У підвісці типу Макферсон правильне встановлення кута розвалу при стисканні (позитивна еластокінематика) дозволяє підвищити зчеплення зовнішнього колеса з дорогою під час повороту.

Знос шин прямо залежить від кінематики підвіски. Якщо при ходах підвіски кут розвалу коліс надто змінюється, це викликає нерівномірний контакт протектора з дорожнім покриттям, що пришвидшує знос. Крім того, погано налаштована кінематика веде до "плаваючого" сходження при відбої або стисканні, що викликає бічне ковзання коліс та перегрів шин. Приклад. У спорткарів Porsche 911 передбачені спеціальні важелі з геометрією, що забезпечує мінімальні зміни розвалу при повному стисканні – саме для стабільного зносу шин і точності керування.

Зчеплення з дорогою залежить від геометрії контакту колеса. Ефективність гальмування і проходження поворотів напряму залежить від поверхні контакту колеса з дорогою, яка визначається розвалом. При неправильній кінематиці цей контакт зменшується – шина працює не повністю по площі, а частково «ребром». Залежність кутів коліс від ходу підвіски забезпечує повноцінну пляму контакту – отже, підвищує зчеплення. Приклад. Автомобілі BMW серії M застосовують складну багатоважільну підвіску, де зміни кутів при роботі підвіски точно керуються, що забезпечує високу стабільність і чітку реакцію.

Адаптивна поведінка при зміні навантаження. При завантаженні авто (пасажирів, вантаж), статичний прогин збільшується, змінюється положення кузова відносно коліс. Без врахування змін кутів – положення коліс стає нефункціональним, що знижує ефективність навіть на прямій. Розрахована

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кінематика забезпечує стабільні параметри встановлення незалежно від навантаження.

Залежність кутів коліс від ходів підвіски – ключовий аспект, що забезпечує керованість, зчеплення, безпечність руху та економічність експлуатації. Без точного визначення цієї залежності неможливо створити ефективну та надійну підвіску навіть для автомобілів середнього класу, не кажучи вже про спортивні чи позашляхові моделі.

Необхідність врахування геометричних параметрів стабілізатора поперечної стійкості обґрунтовується їхнім критичним впливом на жорсткість стабілізатора, ефективність протидії крену та загальну динаміку автомобіля.

Геометрія визначає кутову жорсткість стабілізатора. Кутова жорсткість стабілізатора  $C_\phi$  безпосередньо залежить від його геометрії й навіть незначна зміна діаметра (в 1,1 раза) чи плеча важелів дає помітний ефект у зміні жорсткості через четверту степінь у формулі. Тому ігнорування геометрії призводить до неправильного розрахунку жорсткості та неадекватного вибору стабілізатора.

Плечі стабілізатора визначають момент від дії бічних сил. Чим більше плече, тим більший стабілізуючий момент можна досягнути при тій самій силі. Приклад: при подвоєнні довжини плеча стабілізуюча дія зростає вдвічі – це дозволяє компенсувати крен без надмірного збільшення жорсткості елемента, що важливо для збереження плавності ходу.

Форма стабілізатора впливає на ефективність передачі зусиль. Стабілізатори можуть мати П-подібну, U-подібну, Z-подібну форму або мати різну орієнтацію відносно осі машини. Це визначає:

- кут прикладання зусиль до важелів,
- точку максимального кручення,
- взаємодію з іншими елементами підвіски.

					<b>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Неправильна форма або розміщення стабілізатора можуть викликати небажану пружну деформацію шасі, змінити напрямок зусиль, або навіть створити перекіс. Оптимізація геометрії забезпечує баланс між комфортом і стійкістю. Правильно підібрані геометричні параметри стабілізатора дозволяють:

- знизити амплітуду крену без погіршення плавності ходу;
- зменшити передавання високочастотних коливань;
- забезпечити рівномірний розподіл навантажень між лівою та правою сторонами кузова, особливо на поворотах.

Наявність геометричних змін при навантаженні. При роботі підвіски геометрія стабілізатора може змінюватися (наприклад, через прогини важелів, зміщення кузова тощо). Якщо не враховувати механічну та геометричну взаємодію, то реальна ефективність стабілізатора в експлуатації буде нижчою за розрахункову.

Геометричні параметри стабілізатора не є другорядними – вони критично впливають на ефективність системи підвіски. Без їх точного врахування неможливо правильно розрахувати кутову жорсткість стабілізатора, узгодити його з підвіскою і забезпечити оптимальний баланс між стійкістю, керованістю та комфортом автомобіля.

### 3.3. Розробка стенду та методики дослідження

Найбільш достовірним методом дослідження кінематики підвіски транспортного засобу є проведення вимірювань безпосередньо на експериментальному зразку автомобіля або його масштабованій фізичній моделі. Так можливо врахувати вплив усіх наявних кінематичних пар, що мають власні ступені свободи та забезпечують рухливість окремих ланок конструкції. Зміни у параметрах орієнтації коліс, зокрема розвалу та сходження, зазвичай незначні та вимірюються в межах кількох градусів, що робить їх вкрай чутливими до похибок при моделюванні.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

На відміну від аналітичних або графічних методів, які не завжди дозволяють досягти необхідної точності через спрощення та ідеалізацію зв'язків у підвісці, використання фізичної моделі дає змогу не лише точно фіксувати зміну просторового положення коліс при вертикальних переміщеннях підвіски, а й оцінити вплив конкретної конструкції пружних елементів на загальну жорсткість системи. Таким чином, фізичний експеримент забезпечує комплексне врахування всіх факторів, що впливають на кінематичні властивості підвіски, і дає можливість провести глибший аналіз її динамічної поведінки.

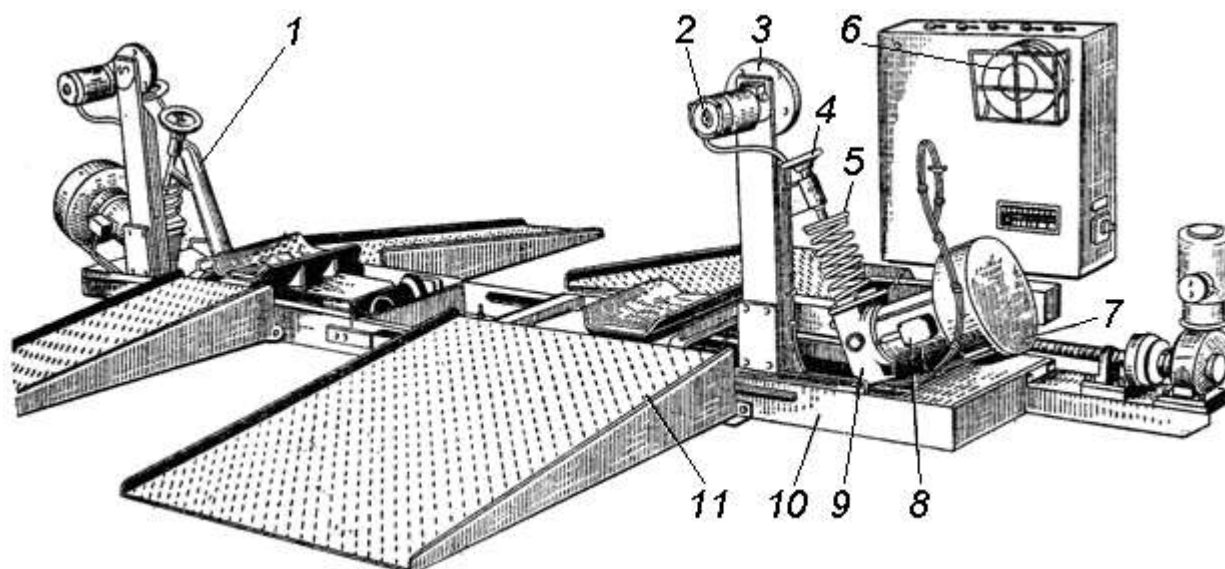


Рис. 13 – Стенд для перевірки амортизаторів:

1 – важіль; 2, 8 – електродвигуни; 3 – самопис; 4 – регулювальний гвинт; 5 – пружина; 6 – діаграмні диски; 7 – маховик; 9 – пристрій для перетворення обертового руху вала в коливальне; 10 – рама; 11 – платформа для в'їзду авто

Виготовлення фізичної моделі вузла підвіски.

Геометричні параметри фізичної моделі визначались шляхом зняття розмірів із натурального зразка автомобіля у поєднанні з даними, отриманими з технічної літератури. Насамперед ідентифікувалися базові контрольні точки, між якими були проведені точні вимірювання відстаней та кутів.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ

Арк.

44

Оснoву моделі становить зварна конструкція з профільної сталев0ї труби перерізом 40×40 мм, до якої жорстко закріплений кронштейн для встановлення сайлентблока важеля. На цю ж трубу змонтовано кронштейн реактивної штанги. Просторове розташування верхньої опори визначалося відносно точок кріплення нижнього важеля та реактивної тяги. Для її фіксації виготовлено додаткову раму з труби 20×20 мм, що обв'язує вузол верхньої опори та закріплюється до несучої конструкції трубою 40×40 мм із забезпеченням точного просторового положення.

Після зварювання несучої конструкції, що моделює частину кузова, починається монтаж елементів підвіски. У першу чергу встановлюються нижній поперечний важіль та реактивна тяга, які з'єднуються між собою за допомогою шарової опори. Далі в зборі монтується поворотний кулак із амортизаційною стійкою, причому опора амортизатора фіксується до верхнього вузла кріплення.

На завершальному етапі виготовлення конструкції проводиться встановлення кронштейнів для фіксації стенду до підлоги та стіни. Для підвищення жорсткості додаються косинки, які забезпечують стійкість конструкції під час проведення вимірювань.

У результаті було створено фізичну модель підвіски, яка дає змогу проводити експериментальні дослідження зміни розвалу та сходження коліс, а також оцінювати вплив конфігурації стабілізатора поперечної стійкості на жорсткість системи. Отримані дані дозволяють зробити висновки щодо впливу переміщення кінематичних ланок на керованість і стійкість транспортного засобу, а також оцінити ефективність геометричних рішень у конструкції стабілізатора.

Для отримання залежності зміни кута розвалу колеса від вертикальних переміщень елементів підвіски доцільно дотримуватися наступної експериментальної процедури.

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Установити початкове («нульове») положення підвіски, що відповідає навантаженому статичному стану автомобіля. Це досягається шляхом підкладання опорного елемента (наприклад, дерев'яного бруска) під колесо. Колесо орієнтується у положенні, що відповідає прямолінійному руху автомобіля, на основі вимірювання відстаней між точками на елементах підвіски та колесом. Рульовий наконечник фіксується в цьому положенні для стабілізації умов вимірювання. Зазначені дії забезпечують правильне визначення нульової координати.

До площини колеса закріплюється пристрій для вимірювання кутів розвалу/сходження, оснащений лазерним покажчиком. Промінь лазера проектує площину колеса на вертикальний стенд для фіксації просторового положення колеса.

Перед колесом розташовується екран або вертикальна площина стенду, на якій буде реєструватися зміна кута під час переміщень підвіски.

Проводиться фіксація контрольної точки лазерного променя в початковому положенні, після чого відмічаються ще дві точки зверху та знизу, що дозволяє побудувати пряму — проекцію площини колеса. Промінь повертається до контрольної точки і знову фіксується.

Колесо піднімається на 20 мм за допомогою зміни висоти підставки, після чого процедура фіксації точок повторюється. Такі вимірювання проводяться для всього робочого ходу підвіски. В результаті формується масив координатних даних, що характеризують зміну кута розвалу відносно переміщень підвіски.

Описана методика дозволяє отримати точні чисельні значення зміни кута розвалу колеса при різних ходах підвіски, що дає змогу аналізувати її кінематичну поведінку та формувати висновки щодо впливу геометрії підвіски на керованість автомобіля.

Процедура визначення кута сходження виконується в такій послідовності.

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Проводиться горизонтальна лінія довжиною близько 1,6 м, розміщена паралельно площині колеса, з центром лінії, що збігається з віссю обертання колеса. На обох кінцях лінії встановлюються перпендикуляри, які слугуватимуть шкалами для фіксації зміни кута сходження.

До колеса закріплюється вимірювальний пристрій для визначення кута розвалу і сходження. Колесо виставляється в нейтральне («нульове») положення.

Промінь лазера вирівнюється з лінією перпендикуляра та фіксується початкова контрольна точка.

Підняття колеса на 20 мм здійснюється шляхом зміни висоти опори. Відповідно фіксується нова точка на шкалі перпендикуляра, що відображає зміну кута сходження.

Дії повторюються в межах усього діапазону робочого ходу підвіски.

У підсумку отримуються дані щодо змін кута сходження в залежності від ходу підвіски. Ця інформація є ключовою для дослідження кінематичних властивостей підвіски та визначення її впливу на стійкість і керованість транспортного засобу.

Методика дослідження жорсткісних характеристик стабілізатора поперечної стійкості.

Випробування характеристик стабілізатора рекомендується проводити у такій послідовності:

Встановити підвіску у її нижнє крайнє положення та зафіксувати важіль стабілізатора за допомогою відповідного фіксуючого пристрою (затискача). Це необхідно для того, щоб отримати повноцінну характеристику кутової жорсткості, оскільки частина робочого ходу важелів може бути скомпенсована за рахунок пружності та люфтів у еластомерних з'єднаннях, таких як сайлентблоки.

Закріпити тросовий елемент між поворотним кулаком і динамометричним пристроєм. Обидва елементи під'єднуються до

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

попередньо встановленого гідравлічного домкрата, що слугуватиме приводом для переміщення підвіски.

Виконати підйом вузла підвіски на величину 10 мм за допомогою гідравлічного пристрою та зафіксувати відповідні свідчення динамометра. Це дозволяє визначити реакцію стабілізатора на прикладене зусилля в конкретному положенні підвіски.

Повторювати підйом на наступні кроки по 10 мм із фіксацією показів динамометра до досягнення верхнього крайнього положення робочого ходу підвіски.

Після завершення серії вимірювань провести зміну конфігурації стабілізатора (наприклад, змінити довжину плеча, жорсткість торсіона або спосіб кріплення) і повторити процедуру, починаючи з першого пункту.

У результаті виконаних дій формується емпірична залежність між жорсткісними характеристиками стабілізатора поперечної стійкості та його геометричними параметрами. Ці дані дозволяють встановити оптимальну конфігурацію стабілізатора для досягнення необхідного рівня керованості та стійкості транспортного засобу.

### 3.4. Результати експериментальних досліджень

Вплив вертикальних переміщень підвіски на кути встановлення колеса.

Дослідження проводилось відповідно до експериментальної методики, описаної у підрозділі 3.3. На початковому етапі колесо було приведено до нульового положення, яке відповідає положенню підвіски у навантаженому стані автомобіля.

Для забезпечення точного відтворення геометрії, було виконано вимірювання відстані між опорною тарілкою амортизатора і верхньою опорою на натурному зразку автомобіля-прототипу. Отримане значення відтворено на фізичній моделі шляхом відповідного налаштування елементів конструкції.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Далі визначалась відстань від точки кріплення реактивної тяги до зовнішньої площини обода колеса по напрямній, паралельній до площини опори. Це дозволило забезпечити узгодження геометрії підвіски моделі з реальною конструкцією.



Рис. 14 – Пристрій для визначення кутів розвалу та сходження колеса:  
 1 - пристрій для регулювання кутів розвалу та сходження; 2 - колесо;  
 3 - бруски для регулювання ходу підвіски; 4 – лазер

Після фіксації вхідних параметрів на колесо було встановлено вимірювальний пристрій, призначений для визначення кута розвалу та кута сходження. Дане обладнання дозволяє зафіксувати зміну положення площини колеса відносно контрольної площини під час переміщень підвіски, що і є основною метою проведеного експерименту.

Наступним етапом експерименту є проектування лазерного променя на вертикальну площину вимірювального стенда, розташованого на відстані 2 м від осі обертання досліджуваного колеса (рисунок 15).

Промінь лазера формує проекційну точку на поверхні стенда, яка фіксується як нульова точка – вона відображає початкове положення площини колеса у статичному (номінальному) стані. Для забезпечення

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

точності побудови площини на стенді додатково наносяться ще дві точки – верхня та нижня, що дозволяє провести умовну лінію положення колеса в даному положенні підвіски. Після цього лазерний промінь знову повертається в початкову (нульову) позицію для контролю.

Подальші вимірювання проводяться шляхом послідовного підйому колеса на 20 мм відносно попереднього положення, для чого під підкатний елемент підставляється відповідний калібрований брусок. На кожному рівні переміщення повторюється процедура нанесення трьох контрольних точок. Дослідження виконується на всьому діапазоні вертикальних переміщень підвіски з кроком 20 мм.



Рис. 15 – Обладнання для фіксації змін кута розвалу колеса в залежності від ходу підвіски: 1 – вимірювальний стенд; 2 – нульова точка; 3 – лінія, що відповідає площині положення колеса

У результаті експерименту було зафіксовано 21 контрольну точку, які формують 7 ліній відповідно до семи дискретних положень ходу підвіски. Ці дані використовуються для побудови графіків залежності кута розвалу від ходу підвіски, що дозволяє проаналізувати кінематичні властивості підвіски на всьому діапазоні її роботи.

В результаті вимірювань побудовано лінії, що відображають положення площини колеса при різних ходах підвіски. Зміни кута розвалу зафіксовано у вигляді таблиці.

Таблиця 3.2. Зведені дані результатів вимірів

№	Хід підвіски, мм	Кут розвалу, град
1	-20	-0,5
2	0	0
3	20	1,1
4	40	2
5	60	3,2
6	80	4,2
7	100	5,2

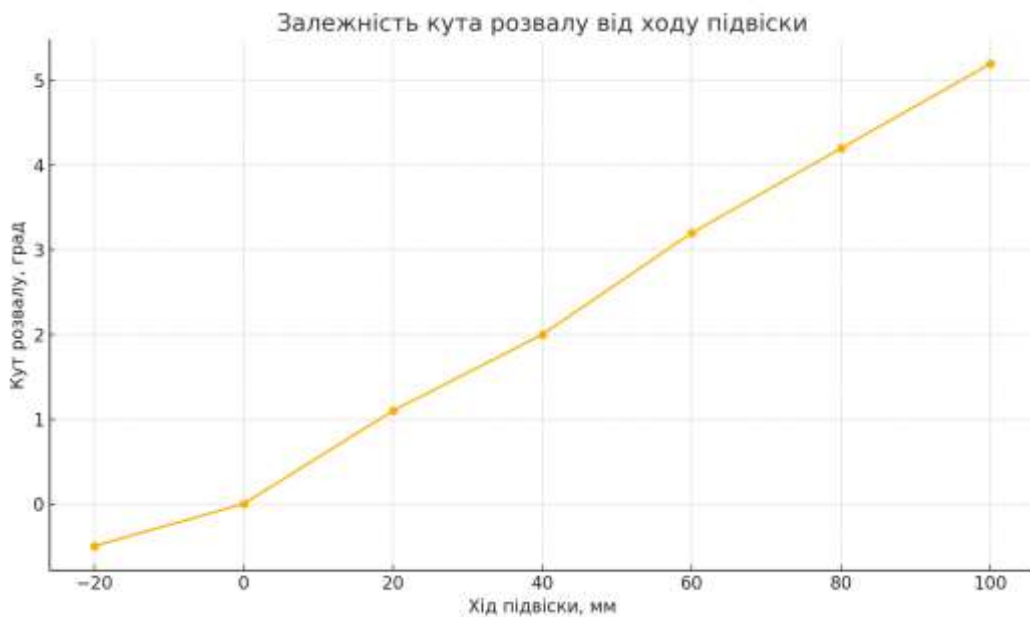


Рис. 16 – Графік залежності кута розвалу від ходу підвіски

Отже, на основі отриманих даних чітко простежується залежність кута розвалу колеса від величини ходу підвіски. На наступному етапі дослідження було здійснено аналогічну послідовність дій, однак із фокусом на визначення змін кута сходження коліс в процесі переміщення підвіски.

Для забезпечення точності вимірювання зміни кута сходження на площині опори попередньо наноситься базова лінія, що проходить паралельно до площини обертання колеса. Від цієї лінії, довжина якої становить 1,6 метра, під прямим кутом проводяться перпендикуляри. Саме на цих перпендикулярах фіксуються координати точок перетину з лазерним променем, що проектує площину колеса у відповідному положенні ходу підвіски.



Рис. 17 – Процес фіксації зміни кута сходження колеса в залежності від ходу підвіски: 1 - пристрій для регулювання кутів розвалу та сходження; 2 - лінія паралельна площині обертання колеса; 3 - перпендикуляр; 4 - точка перетину промінню перпендикуляру

За аналогією з процедурою вимірювання кута розвалу, здійснюється фіксація зміни кута сходження колеса. Для цього визначаються координати точок перетину лазерного променя з перпендикулярними лініями, розташованими перед та позаду колеса. Подальше регулювання ходу підвіски виконується шляхом підкладання під колесо каліброваних брусків завтовшки 20 мм. Після кожного такого підйому проводиться новий замір кута сходження.

					<b>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Наступним кроком є визначення відстані між проекцією площини обертання колеса та новоствореними точками перетину на перпендикулярах. Ця відстань позначається як А (рисунок 18) і дозволяє чисельно оцінити зміну кута сходження залежно від вертикального переміщення колеса. Отримані результати систематизуються та заносяться до відповідної таблиці для подальшого аналізу та побудови графіків функціональної залежності.

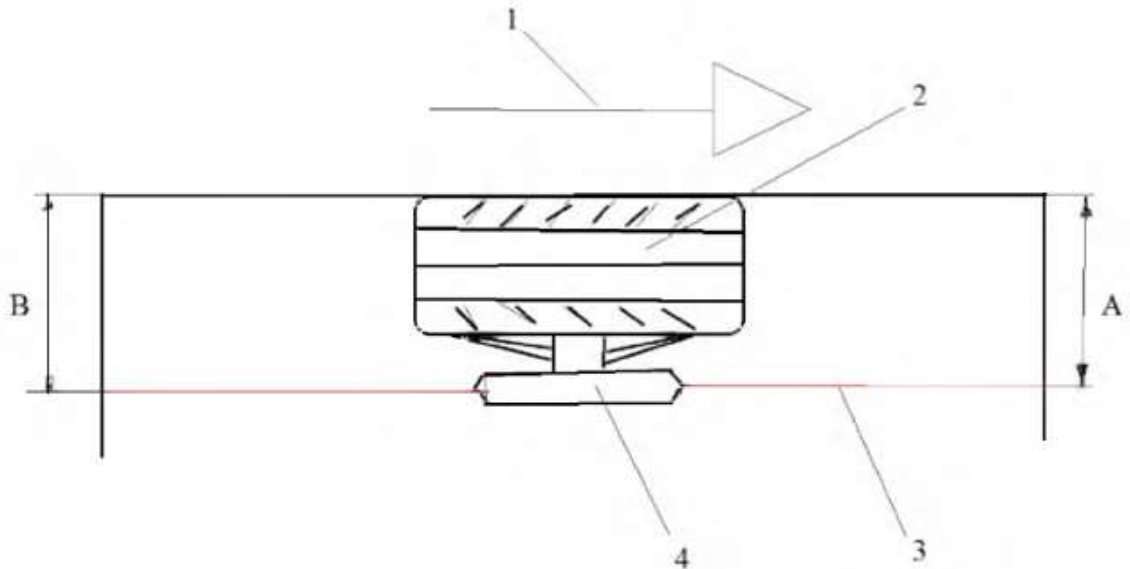


Рис. 18 – Схематичне зображення процесу визначення кута сходження колеса: 1 - напрямок руху колеса; 2 - колесо; 3 - лазерний промінь; 4 - пристрій для регулювання кутів розвалу та сходження

На підставі отриманих експериментальних результатів можна зробити висновок, що в процесі роботи підвіски кут сходження змінюється таким чином, що частково компенсує бічне відведення колеса, зумовлене варіацією кута розвалу при зміні вертикального положення колеса.

Таблиця 3.3. Зведені дані результатів вимірів

Параметр	Значення						
	-20	0	+20	+40	+60	+80	+100
Хід підвіски h, мм	238	254	264	274	280	286	290
Хід підвіски А, мм	250	254	261	265	270	274	276

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

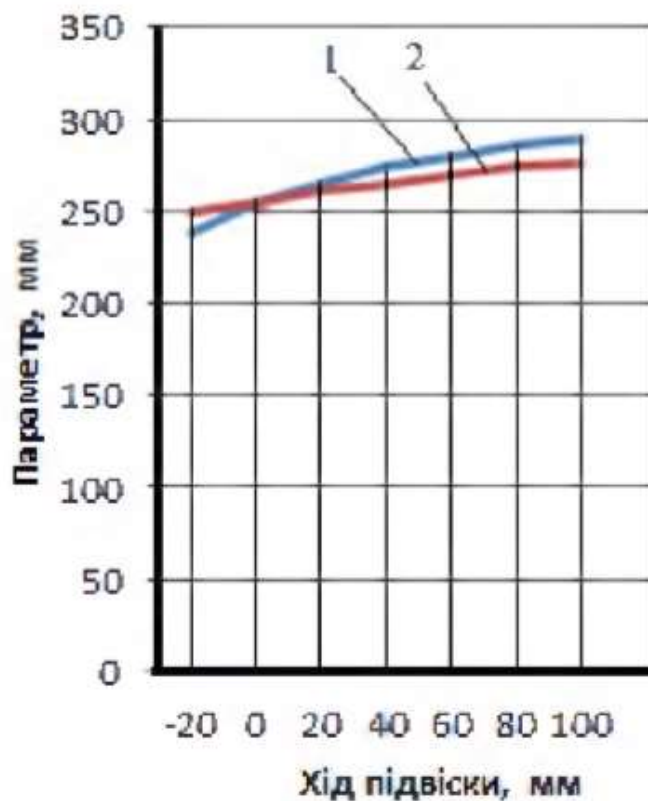


Рис. 19 – Графіки залежності параметрів А та В від ходу підвіски h:  
1 – параметр А; 2 – параметр В

Визначення жорсткості стабілізатора зі зміненими геометричними параметрами активної частини.

У конструкції штатної підвіски автомобіля ЗАЗ 1102 та його модифікацій стабілізатор поперечної стійкості не передбачений. У зв'язку з цим для проведення досліджень було використано стабілізатор від іншого транспортного засобу зі схожими масово-габаритними та кінематичними характеристиками. Обраний стабілізатор був інтегрований у фізичну модель підвіски, адаптовану під особливості шасі автомобіля ЗАЗ 1102.

Кріплення стабілізатора здійснювалося до жорстко змонтованої на стенді рами, яка імітує кузовну частину автомобіля. Установлення проводилося в двох точках через штатні гумові втулки. Кінці стабілізатора з'єднувалися з важелями підвіски через сайлентблоки, що відтворюють зусилля, які виникають внаслідок асиметричного ходу підвіски.

У зоні кріплення до важелів стабілізатор фіксувався у центральній частині важеля. Для цього було використано з'єднання через пару сполучених між собою сайлентблоків, які забезпечують необхідну жорсткість і деформаційні властивості з урахуванням реальних умов експлуатації. Така конструктивна реалізація дозволила здійснити точну імітацію роботи стабілізатора в умовах реальної кінематики та навантаження підвіски, що є необхідним для подальшого визначення його кутової жорсткості та впливу на стійкість і керованість автомобіля.



Рис. 20 – Система вимірювання жорсткості стабілізатора:

1 - трос; 2 - динамометр; 3 - гідравлічний кран

З метою визначення величини зусилля, необхідного для забезпечення робочого ходу підвіски зі встановленим стабілізатором поперечної стійкості, було використано пружинний динамометр із максимальним діапазоном вимірювання до 100 кгс та ціною поділки шкали 1 кгс. Такий тип обладнання забезпечує достатню точність фіксації навантажень у діапазоні, що характерний для експлуатаційних умов легкових автомобілів.

Передача зусилля на вузол підвіски здійснювалася за допомогою спеціально змонтованої системи, яка включає в себе комплект сталевих

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

тросів, з'єднувальні карабіни, зазначений динамометр, а також гідравлічний домкрат (кран), що забезпечує контрольований і поступовий підйом елементів підвіски. Така комбінація дозволила відтворити реальні умови навантаження та забезпечити точне вимірювання реакції стабілізатора на зміну положення важелів у межах робочого ходу.

Зібрана вимірювальна система забезпечує можливість послідовного реєстрування значень зусилля на кожному етапі підйому підвіски з кроком переміщення до 10 мм, що є достатнім для побудови графічної залежності сили від переміщення та наступного визначення жорсткісних характеристик стабілізатора з урахуванням його геометричних параметрів. Після цього був проведений замір зміни навантаження на динамометр при ході підвіски з кроком 10мм. Отримані показники занесені в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4. Зведені дані результатів вимірів

Показник	Значення							
	0	10	20	30	40	50	60	70
Хід підвіски $h$ , мм	80	90	100	110	120	130	140	
	0	9	16	24	30	37	40	49
Покази динамометра $P$ , кгс	54	59	60	68	72	76	86	

Після завершення первинної серії вимірювань було виконано модифікацію стабілізатора поперечної стійкості шляхом зменшення довжини його активної (торсіонної) частини на 100 мм. Нове положення точки кріплення було жорстко зафіксоване відповідно до оновленої конфігурації системи.

Після зміни геометричних параметрів стабілізатора були проведені повторні експериментальні дослідження, метою яких стало встановлення змін у жорсткісній характеристиці стабілізатора під час вертикального переміщення колеса в межах ходу підвіски. Навантаження моделювалося за допомогою зв'язків елементів підвіски, змонтованих у фізичній моделі, у вертикальній площині.

На основі серії дослідів була сформована таблиця 3.5, у якій наведено усереднені значення сили та переміщення. Кожен експеримент повторювався тричі для забезпечення достовірності результатів. Відхилення вимірювань залишались у межах допустимого розсіювання:  $\pm 2$  кгс для показів динамометра та  $\pm 1,5$  мм для переміщення елементів підвіски.

Таблиця 3.5. Зведені дані результатів вимірів

Показник	Значення							
	Хід підвіски $h$ , мм	0	10	20	30	40	50	60
80		90	100	110	120	130	140	
Покази динамометра $P$ , кгс	0	12	19	24	32	37	43	48
	55	60	63	68	69	75	87	

На підставі отриманих даних визначені жорсткості стабілізаторів:  $C_{п1} = 0,9$  кгс/мм;  $C_{п2} = 1,2$  кгс/мм.

Порівняльний аналіз отриманих результатів свідчить про такі особливості:

- у діапазоні вертикальних переміщень елементів підвіски від 0 до 30 мм початкова жорсткість стабілізатора становить приблизно 0,9 кгс/мм;
- після модифікації конструкції, у тому ж діапазоні переміщень, спостерігається зростання жорсткості до рівня 1,2 кгс/мм.

Отже, скорочення довжини активної (торсіонної) частини стабілізатора на 100 мм забезпечує підвищення нормальної (ефективної) жорсткості елемента в робочому діапазоні ходу підвіски до 30 мм, що є доцільним для поліпшення керованості автомобіля без суттєвого погіршення плавності ходу.

На основі проведених експериментальних досліджень та вимірювань можна зробити такі висновки.

									Арк.
									57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ				

Встановлено, що зміна кута розвалу коліс у процесі ходу підвіски істотно впливає на величину кута крену підресорених мас. Це, в свою чергу, має прямий вплив на стійкість і керованість транспортного засобу в умовах динамічного навантаження.

Спостерігається також залежність зміни кута сходження від величини крену, що додатково впливає на поведінку автомобіля під час маневрування. Зростання кута крену призводить до зміни напрямку руху коліс, що потребує корекції рульового керування.

Конструктивна кінематика досліджуваної підвіски спроектована з урахуванням часткової компенсації змін кутів розвалу та сходження під час деформаційних процесів. Однак, ступінь цієї компенсації не є повністю визначеною, оскільки вплив кута розвалу на зміну напрямку руху колеса має непряму природу. Це потребує додаткового експериментального підтвердження або моделювання в динамічних умовах.

Вивчені характеристики жорсткості стабілізатора поперечної стійкості показали, що зміна геометричних розмірів його активної частини (зокрема, скорочення довжини) не забезпечує очікуваного підвищення жорсткісних властивостей у діапазоні малих робочих переміщень. Аналіз поведінки стабілізатора свідчить, що ефективна жорсткість досягається лише на великих амплітудах ходу підвіски, що є неприйнятним з точки зору забезпечення зниження крену кузова у початковій фазі повороту. Найімовірнішою причиною такої поведінки є конструктивні втрати жорсткості через еластичні деформації гумових сайлентблоків, які збільшують вільний хід системи до моменту реакції стабілізатора.

Отже, результати досліджень вказують на необхідність удосконалення конструкції стабілізатора, зокрема жорсткіших елементів кріплення, а також доцільність подальших досліджень еластокінематики підвіски в умовах складного навантаження.

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58



Ключові переваги. Низькі стартові витрати (при наявності бази – ~150 000 грн для першого прототипу). Можливість співпраці з технічними ЗВО. Залучення грантів на наукові дослідження та розробку (Horizon Europe, Український фонд стартапів, DEDF, ERDF тощо).

Основні етапи запуску стартапу:

- Розробка ТЗ на базі макетів, як описано вище;
- Пошук виробника – локальний металообробний цех + закупівля електроніки;
- Прототипування, тестування з одним ЗВО/СТО;
- Створення демонстраційного відео та вебсайту;
- Подача на інноваційний конкурс або стартап-грант.

Таблиця 4.1. Потенційна вартість і окупність

Стаття витрат	Орієнтовна сума (грн)
Розробка ТЗ та 3D-моделі	20 000
Металеві конструкції	30 000
Кріплення, механізми, кронштейни	20 000
Датчики, електроніка	40 000
Програмне забезпечення	10 000
<b>Разом</b>	<b>≈ 120 000</b>

Ціна реалізації 1 комплекту: 70 000 – 130 000 грн залежно від комплектації. Термін окупності: 6–12 місяців при реалізації 5 комплектів.

Висновок Такі стенди мають не лише наукову й інженерну, а й комерційну цінність. В умовах зростаючого попиту на вітчизняні інженерні рішення в автомобілебудуванні, діагностиці та освіті – відкриття стартапу цілком доцільне.

## 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Загальні положення. З метою забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації стенда для дослідження кінематики та жорсткісних характеристик автомобільної підвіски, усі роботи повинні виконуватись у суворій відповідності до Законів України «Про охорону праці», «Про наукову і науково-технічну діяльність», ДСТУ EN ISO 12100:2020 та ДНАОП 0.00-1.28-10.

Перед початком використання стенда користувач має бути ознайомлений з інструкцією з експлуатації, пройти інструктаж з техніки безпеки, а також мати відповідну кваліфікацію.

Виробничі ризики при експлуатації стенда. Під час роботи з експериментальним стендом передбачені наступні небезпечні та шкідливі фактори.

Таблиця 5.1. Небезпечні та шкідливі фактори

Небезпечний фактор	Характер впливу	Засоби запобігання
Механічні травми (рухомі вузли)	Здавлення, удари важелями, обрив тросів	Захисні кожухи, обмежувачі ходу
Перевищення тиску в гідросистемі	Викид рідини, гідроудари	Манометри, обмеження тиску, зливний клапан
Електротравми (якщо використовується)	Ураження струмом	Захисне заземлення, УЗО
Робота з інструментом	Порізи, проколи, вибивання осколків	Використання ЗІЗ, окулярів, рукавиць
Підняття масивних деталей підвіски	Надмірне навантаження на опорно-руховий апарат	Підйомники, кран-балки, треноги

Вимоги до приміщення та обладнання. Стенд повинен встановлюватися на рівній металевій або бетонній основі з кріпленням до підлоги.

Мінімальні габарити зони безпечного обслуговування – 1,2 м по периметру стенда.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Освітлення робочої зони – не менше 300 лк (ДБН В.2.5-28:2006).

У приміщенні має бути передбачена вентиляція (механічна або природна), з урахуванням допустимої температури +15...+30 °С.

Рівень шуму не повинен перевищувати 80 дБ (ГОСТ 12.1.003-83).

Таблиця 5.2. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

<b>Види робіт</b>	<b>Необхідні ЗІЗ</b>
Робота зі стендом	Комбінезон, захисні окуляри, рукавиці
Монтаж/демонтаж елементів	Боти з металевим носком, жилет сигнальний
Робота з гідравлікою	Непроникні рукавички, фартух
Вимірювання	Захисні окуляри (лазерне устаткування)

Протипожежні заходи. Стенд не містить джерел займання, але при використанні електроприводів або гідравлічної рідини необхідно мати на робочому місці:

- Вогнегасник ВП-5 або ВВК-5;
- Аптечку першої допомоги;
- План евакуації на видному місці.

Організаційні заходи безпеки. Проведення інструктажу перед початком роботи, фіксація в журналі. Здійснення щотижневої перевірки справності вузлів стенда, особливо кріплень стабілізатора, елементів підвіски та системи підйому. Заборонено працювати одному; присутність напарника обов'язкова при експериментах із навантаженням.

Доступ до стенда – лише персоналу, який пройшов навчання.

Висновки Забезпечення відповідного рівня охорони праці та дотримання вимог техніки безпеки при роботі з лабораторним або дослідним стендом для вивчення підвісок гарантує безперебійну експлуатацію установки, мінімізацію виробничих ризиків і можливість серійного використання у навчальних, наукових та сервісних цілях.

					<b>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

## ВИСНОВОК

У рамках випускної кваліфікаційної роботи бакалавра було досліджено вплив кутової жорсткості додатково введеного у підвіску типу Макферсон стабілізатора з різними довжинами його активної частини на теоретичний кут крену підресорених мас автомобіля.

Кваліфікаційна робота бакалавра (КРБ) складається із п'яти розділів.

В першому розділі виділено об'єкт дослідження, проведено аналіз наукових джерел за тематикою, методів визначення кутових параметрів установки коліс автомобіля.

У другому розділі проаналізовано технічні умови існуючих конструкції підвісок. Зроблено вибір і обґрунтування методу підвищення технічних характеристик.

Третій розділ містить розрахунок жорсткості амортизатора, приведено обґрунтування складових методики дослідження кінематичних ланок підвіски, визначено: зміну кутів розвалу та сходження в залежності від ходу підвіски; вплив геометричного параметру на характеристики жорсткості стабілізатора поперечної стійкості.

Економічний розділ підтверджує економічну доцільність впровадження розробленого стенду та можливість створення стартапу.

У розділі охорони праці та техніки безпеки надані рекомендації з необхідних заходів безпеки при роботах на такому обладнанні.

Випускна кваліфікаційна робота складається з 66 сторінок, і містить у собі 20 ілюстрацій, 16 джерел, 12 таблиць, 1 додаток.

Ключові слова: ПІДВІСКА, ПЛАВНІСТЬ ХОДУ, СТІЙКІСТЬ РУХУ, КЕРОВАНІСТЬ, СТАБІЛІЗАТОР, КУТ КРЕНУ ПІДРЕСОРЕНОЇ МАСИ, КУТОВА ЖОРСТКІСТЬ, КУТ РОЗВАЛУ, КУТ СХОДЖЕННЯ.

					<i>КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

## СПИСОК ВИКОРИСТОВУВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пивоваров П. І., Гріненко О. І. Основи конструкції автомобілів: навч. посіб. – Харків: ХНАДУ, 2021. – 312 с.
2. SAE Technical Paper 2019-01-0704. Influence of Anti-Roll Bar Stiffness on Vehicle Dynamics and Ride Comfort. – SAE International, USA, 2019.
3. ДСТУ ISO 3888-1:2005. Засоби дорожнього транспорту. Випробування на маневреність.
4. Kumar R., Patel V., Chauhan R. Design and Analysis of Double Wishbone Suspension System // Academia.edu. – [Електронний ресурс]. – [https://www.academia.edu/44465198/Design\\_and\\_Analysis\\_of\\_Double\\_Wishbone\\_Suspension\\_System](https://www.academia.edu/44465198/Design_and_Analysis_of_Double_Wishbone_Suspension_System)
5. Shekhovtsov Y., Grinko S., Ivanov I. Design and calculation of double arm suspension of a car // Journal of Vibroengineering. – 2020. – Vol. 22, Issue 8. <https://www.extrica.com/article/21436>
6. Double wishbone suspension // Wikipedia – The Free Encyclopedia. – [https://en.wikipedia.org/wiki/Double\\_wishbone\\_suspension](https://en.wikipedia.org/wiki/Double_wishbone_suspension)
7. Reimpell J., Stoll H. The Automotive Chassis: Engineering Principles. SAE International, 2001.
8. Мельничук В. П. Конструкції ходової частини автомобіля: Підручник. – Львів: Видавництво ЛНТУ, 2020. – 244 с.
9. Біліченко В.І. Проектування підвіски автомобіля. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 78 с.
10. Toyota Pressroom. "The Sporty Toyota Corolla Hatchback Shifts into 2025." Toyota USA Newsroom, 2023.
11. BMW USA. "BMW 3 Series Sedan: Model overview, features, and specs." BMW USA, 2023.
12. Ford Media Center. "Ford Focus 2021 - Technical Specifications." Ford Europe, 2021.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

13. Енергоємність підвіски: визначення, методика оцінки та вплив на комфорт руху / Аналітичний огляд на основі конструкцій сучасних автомобілів. – [Електронний ресурс].

14. Гайдук, В. В., Серий, В. М. Сучасні підходи до розрахунку і аналізу характеристик автомобільних підвісок. // Вісник машинобудування та транспорту. – 2021. – №3. – С. 29–35.

15. Bosch Automotive Handbook. 10th Edition. Robert Bosch GmbH. – Wiley, 2018. – 1520 p. ISBN: 9781119032944.

16. Солодкий І. І., Матвієнко В. О. Теорія автомобіля: навчальний посібник. – Київ: АртЕк, 2021. – 320 с.

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					КРБМТВА 2522158. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66