

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГІЖИЦЬКОГО
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «Дослідження параметрів підвіски спортивного автомобіля типу
"Formula Student"»

Виконав: студент групи Ат-62
Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)
Богдан Хипта
(ім'я та прізвище)

Керівник: д.ф., ст. викладач Георгій Худавердян
(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

АНОТАЦІЯ

«Дослідження параметрів підвіски спортивного автомобіля типу "Formula Student"». – Хипта Б. М. – Кваліфікаційна робота. Кафедра автомобілів і тракторів. - Дубляни, -Львівський НУВМБ ім.С.Гжицького, 2025. 57 с. текст. 5 част. 20 рис., 1 табл., бібл. 54.

У роботі проведено аналітичний огляд конструкцій підвісок сучасних болідів *Formula Student* та обґрунтовано вибір схеми *Push-rod* (штовхаюча штанга) для проєктованого автомобіля. За допомогою імітаційного моделювання у середовищі *MSC Adams Car* визначено навантаження на елементи підвіски у критичних режимах (удар, поворот, гальмування). Встановлено, що максимальне зусилля у штанзі становить 6783 Н. Розроблено 3D-модель коромисла та проведено аналіз напружено-деформованого стану методом скінченних елементів (*ANSYS Workbench*). В результаті топологічної оптимізації створено конструкцію з алюмінієвого сплаву EN AW 7075 T6 масою 370 г, яка забезпечує коефіцієнт запасу міцності 3.0. Розроблено заходи з охорони праці при виготовленні деталей та проведено економічний розрахунок, який підтвердив доцільність власного виробництва вузла в умовах лабораторії кафедри.

Ключові слова: Formula Student, підвіска, коромисло, PUSH-ROD, метод скінченних елементів, оптимізація, Adams Car, ANSYS.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ПІДВІСОК АВТОМОБІЛІВ КЛАСУ FORMULA STUDENT	5
1.1. Загальна характеристика міжнародних інженерних змагань Formula Student.....	5
1.1.2. Технічні обмеження та вимоги до шасі.....	7
1.2. Аналіз регламенту змагань Formula Student (SAE).....	8
1.3. Класифікація та аналіз кінематичних схем підвісок.....	8
1.4. Конструкція та роль коромисла (рокера).....	13
1.5. Обґрунтування вибору конструкції.....	14
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ.....	14
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПІДВІСКИ.....	16
2.1. Математична модель кінематики підвіски типу Push-rod.....	16
2.2. Розрахунок навантажень на елементи підвіски	17
2.3. Методика визначення навантажень у середовищі MSC Adams Car	19
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ.....	22
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК КОРОМИСЛА (РОКЕРА) ПІДВІСКИ.....	24
3.1. Розробка геометричної моделі у середовищі CAD	24
3.2. Вибір матеріалу та обґрунтування властивостей	26
3.3. Створення розрахункової моделі (FEA).....	27
3.4. Аналіз напружено-деформованого стану (НДС).....	28
3.5. Оптимізація конструкції.....	30
3.6. Фінальний вигляд деталі	31
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ.....	32
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА НАСЕЛЕННЯ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	34
4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при виготовленні вузлів спортивного автомобіля	34

4.2. Вимоги техніки безпеки перед початком робіт.....	35
4.3. Техніка безпеки під час виконання основних технологічних операцій.....	36
4.3.1. Безпека при механічній обробці (фрезерування, токарні роботи).....	36
4.3.2. Безпека при слюсарно-складальних роботах та роботі з підвіскою.....	37
4.3.3. Специфічні вимоги при роботі з композитними матеріалами (Carbon Fiber)	37
4.4. Пожежна безпека	38
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ.....	39
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	41
5.1. Методика розрахунку витрат на матеріали	41
5.2. Розрахунок технологічної собівартості	42
5.3. Калькуляція собівартості виготовлення коромисла.....	43
5.4. Економічна доцільність проекту	44
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ.....	44
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

ВСТУП

Актуальність теми. Створення власного боліда для змагань Formula Student є амбітним інженерним викликом, що вимагає комплексного підходу до проектування всіх систем автомобіля. Для новостворених студентських команд, які починають проектування "з нуля", критично важливим є вибір оптимальної кінематичної схеми підвіски, яка б забезпечувала баланс між продуктивністю, технологічністю виготовлення та надійністю.

Підвіска є ключовою системою, що визначає механічне зчеплення шин з дорогою, керованість та безпеку пілота. Помилки на етапі початкового проектування геометрії підвіски та її вузлів (зокрема коромисла) можуть призвести до неможливості налаштування автомобіля або його некоректної поведінки на трасі. Тому наукове обґрунтування параметрів підвіски та розрахунок її елементів на етапі проектування першого прототипу є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота виконується в рамках ініціативи гуртка кафедри автомобілів і тракторів щодо створення першого прототипу спортивного автомобіля класу Formula Student для представлення університету на міжнародних змаганнях.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є проектування передньої підвіски спортивного автомобіля класу Formula Student шляхом обґрунтування її кінематичної схеми та розрахунку параметрів коромисла (рокера) для забезпечення необхідних динамічних характеристик боліда.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- Проаналізувати технічний регламент Formula SAE та існуючі конструкції підвісок (Push-rod, Pull-rod) для вибору оптимальної концепції першого автомобіля.
- Розробити кінематичну модель підвіски та визначити навантаження на її елементи в розрахункових випадках (удар, гальмування, поворот).

- Спроекувати конструкцію коромисла (рокера) та супутніх вузлів у середовищі CAD.
- Провести перевірочні розрахунки на міцність та жорсткість методом скінченних елементів (МКЕ) та оптимізувати конструкцію для зниження маси.
- Виконати економічний розрахунок собівартості виготовлення вузла та розробити заходи безпеки при виробництві.

Об'єкт дослідження – кінематика та напружено-деформований стан елементів підвіски гоночного автомобіля.

Предмет дослідження – геометричні параметри та конструкція коромисла передньої підвіски проєктованого автомобіля.

Методи дослідження. Теоретичний аналіз (вибір схеми), імітаційне моделювання (визначення сил), CAD-проектування (геометрія), CAE-аналіз (міцність).

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні параметрів підвіски для новоствореного шасі, що враховує технологічні обмеження університетської майстерні при забезпеченні вимог регламенту.

Практичне значення. Розроблена технічна документація та 3D-моделі є основою для виготовлення реального вузла підвіски першого боліда гуртка кафедри.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ПІДВІСОК АВТОМОБІЛІВ КЛАСУ FORMULA STUDENT

1.1. Загальна характеристика міжнародних інженерних змагань Formula Student

Formula Student (в США відома як *Formula SAE*) — це наймасштабніші міжнародні інженерні змагання для студентів, організовані спілкою автомобільних інженерів (SAE International). Концепція змагань полягає в тому, що студентська команда розглядається як інженерна група фіктивної автомобільної компанії. Їхнє завдання — розробити, виготовити та випробувати прототип гоночного автомобіля класу «формула» для ринку непрофесійних гонщиків-аматорів.



Рисунок 1.1 – Formula Student Germany (FSG) 2019

Автомобіль повинен демонструвати високі динамічні характеристики, відмінну керованість та гальмівні властивості, і при цьому бути достатньо надійним, ергономічним, економічно ефективним та простим в обслуговуванні.

Унікальність Formula Student полягає в тому, що перемога визначається не лише тим, хто першим перетне фінішну лінію. Загальний результат команди формується сумою балів за статичні та динамічні дисципліни. Максимально можлива кількість балів — 1000.

Статичні дисципліни перевіряють інженерну грамотність та економічну доцільність проекту:

- Engineering Design (150 балів): Судді (професійні інженери з автопрому) оцінюють конструкторські рішення, обґрунтування вибору компонентів та розуміння студентами теорії автомобіля. Саме в цій дисципліні захищається конструкція підвіски, розрахунки міцності (FEA) та кінематики.
- Cost and Manufacturing (100 балів): Команда повинна надати детальний звіт про вартість автомобіля, включаючи кожну гайку та хвилину роботи верстата. Це вимагає від інженерів пошуку компромісу між продуктивністю та ціною (що детально розглянуто у Розділі 5 даної роботи).
- Business Plan Presentation (75 балів): Презентація бізнес-моделі серійного виробництва прототипу.

Динамічні дисципліни демонструють реальні можливості автомобіля на трасі:

- Acceleration (100 балів): Розгін на дистанції 75 метрів.
- Skidpad (75 балів): Їзда по "вісімці", що оцінює сталу поворотність автомобіля та здатність підвіски утримувати зчеплення при постійному бічному прискоренні.
- Autocross (125 балів): Проходження звивистої траси на час (одне коло), що оцінює маневреність.
- Endurance (275 балів): Гонка на витривалість (22 км) зі зміною пілота. Це найскладніший етап, де перевіряється надійність усіх вузлів, зокрема підвіски.
- Efficiency (100 балів): Оцінка паливної економічності під час гонки на витривалість.

Розподіл балів наочно демонструє, що надійність (Endurance) та інженерне проектування (Design) є пріоритетними, що підтверджує актуальність теми дипломної роботи.

1.1.2. Технічні обмеження та вимоги до шасі

Регламент змагань (FSAE Rules) накладає суворі обмеження на конструкцію, які є вихідними даними для проектування. Автомобіль повинен мати відкриті колеса та відкритий кокпіт.

Ключові вимоги, що впливають на проектування підвіски:

1. Колісна база: Повинна бути не менше 1525 мм.
2. Хід підвіски: Регламент вимагає, щоб підвіска мала хід не менше 50 мм (по 25 мм на стиснення та відбій) з участю амортизаторів. Це зроблено для запобігання використанню картівської (жорсткої) підвіски.
3. Стійкість до перекидання: Автомобіль повинен витримувати нахил платформи на 60 градусів без перекидання та витоку рідин.
4. Колеса та шини: Дозволяється використання дисків діаметром від 8 дюймів.

Сучасні тенденції зміщуються до використання 10- та 13-дюймових коліс.

Особливістю трас Formula Student є велика кількість вузьких поворотів (шпильок) та слаломних ділянок, оскільки змагання часто проводяться на картодромах або паркувальних майданчиках (конусна розмітка). Середня швидкість на трасі рідко перевищує 50-60 км/год, але бічні перевантаження можуть досягати 1.6–1.8 g.

Це визначає філософію проектування підвіски: пріоритетом є не максимальна швидкість на прямій, а керованість, мінімізація кренів та зниження невіднесених мас для швидкої реакції автомобіля на дії пілота. Саме тому вибір кінематичної схеми та оптимізація маси важелів (рокерів) є критично важливим завданням.

1.2. Аналіз регламенту змагань Formula Student (SAE)

Проектування підвіски автомобіля *Formula Student* суворо регламентується міжнародними правилами (FSAE Rules), які ставлять на перше місце безпеку пілота та технічну відповідність автомобіля. Основні вимоги до ходової частини, які впливають на проектування, наступні:

- Хід підвіски: Система повинна забезпечувати хід колеса не менше 50 мм (мінімум 25 мм на стиснення та 25 мм на відбій).
- Кліренс: Мінімальна статична висота автомобіля з водієм повинна бути не менше 30 мм, що накладає обмеження на компоновання важелів та положення нижніх точок кріплення.
- Колісна база: Має становити мінімум 1525 мм.
- Кріплення: Усі критичні з'єднання в системі підвіски (болти, гайки) повинні мати клас міцності не нижче 8.8 і бути обов'язково законтреними (шплінти, дротяна в'язка, самоконтруючі гайки).

1.3. Класифікація та аналіз кінематичних схем підвісок

Найпоширенішим типом підвіски для відкритих колісних болідів є незалежна підвіска на подвійних поперечних важелях (Double Wishbone). Вона складається з двох важелів (верхнього та нижнього), які з'єднують раму автомобіля з поворотною цапфою (těhlice).

За способом передачі зусилля від колеса до пружного елемента (амортизатора) розрізняють три основні схеми:

Класична схема прямої дії (Direct Acting). У цій схемі амортизатор з пружиною кріпиться безпосередньо до нижнього важеля підвіски.

- Переваги: простота конструкції, менша кількість деталей.

- Недоліки: амортизатор знаходиться в потоці повітря, що погіршує аеродинаміку. Неможливість гнучкої зміни передавального відношення (motion ratio) без зміни точок кріплення.

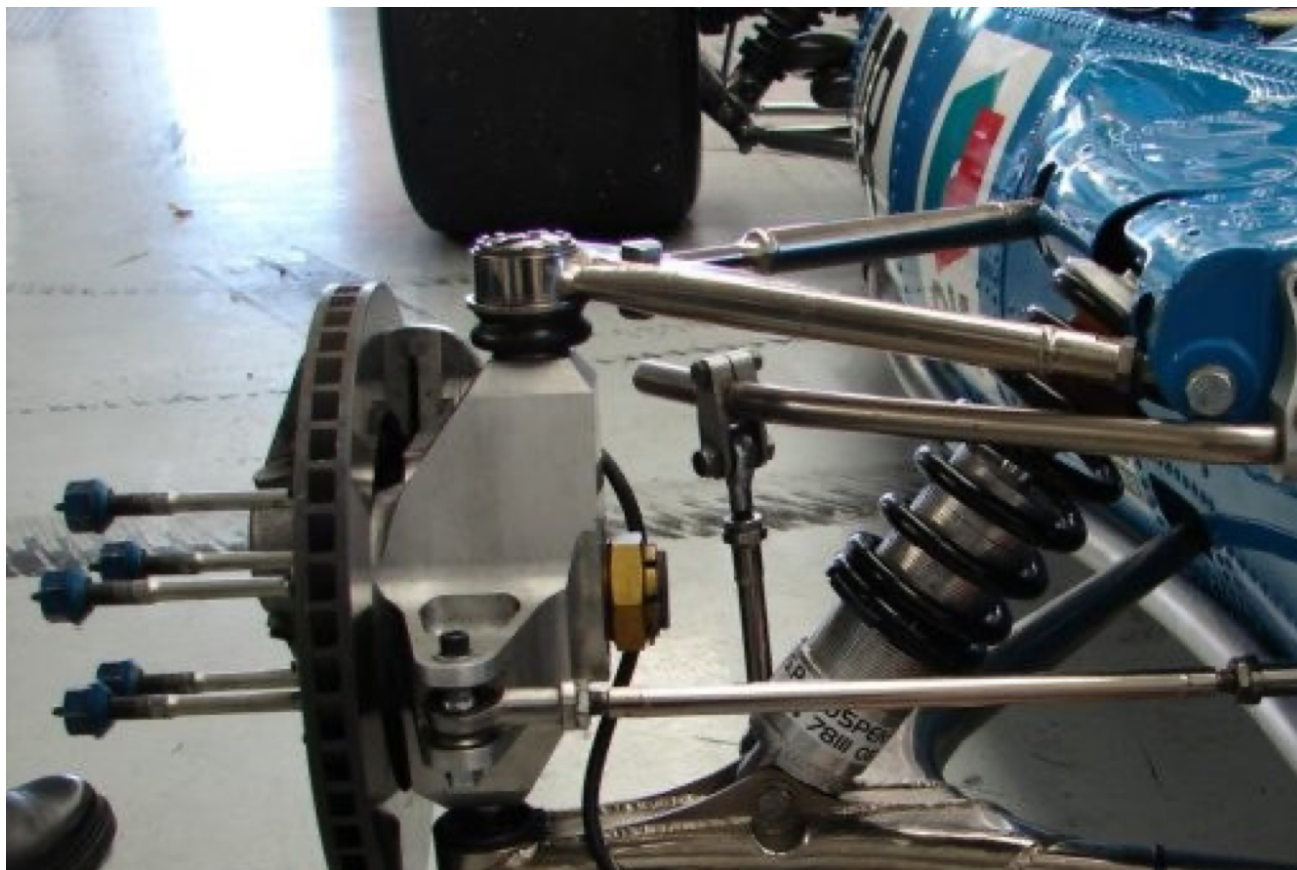


Рисунок 1.1 – Схема підвіски з безпосереднім кріпленням амортизатора

Схема Push-rod (Штовхаюча штанга). У цій схемі зусилля від колеса передається через діагональну тягу (push-rod), яка йде від нижньої частини цапфи вгору до кузова. Тяга діє на коромисло (рокер), яке обертається і стискає амортизатор.

- Переваги: амортизатори сховані всередині корпусу (краща аеродинаміка), зручність налаштування кліренсу, можливість зміни прогресивності підвіски через форму рокера.

- Недоліки: вищий центр ваги, оскільки компоненти розміщені у верхній частині рами.

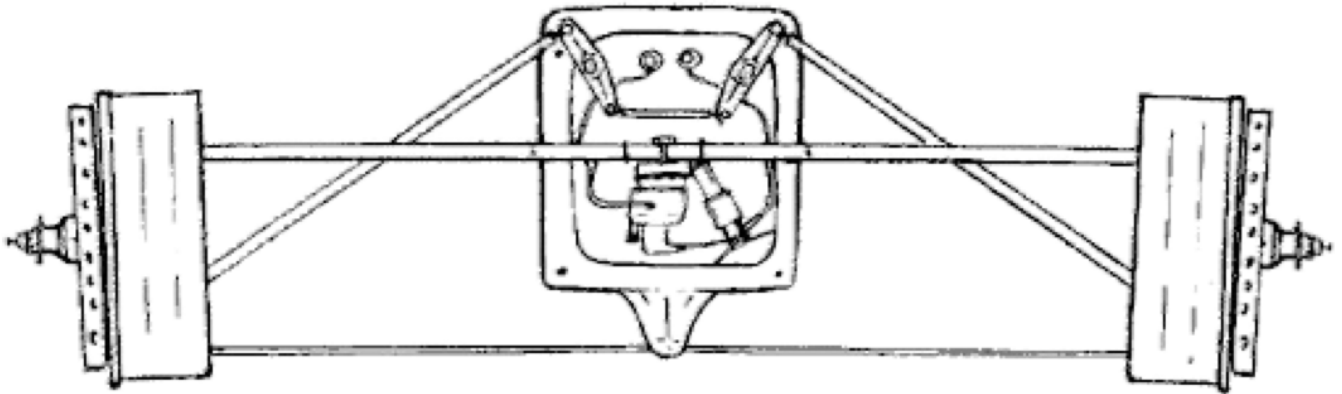


Рисунок 1.2 – Кінематична схема підвіски типу Push-rod

Схема Pull-rod (Тягнуча штанга). Тяга (pull-rod) кріпиться до верхньої точки цапфи і йде вниз до рокера, розташованого на дні шасі. При наїзді на нерівність тяга працює на розтяг.

- Переваги: екстремально низький центр ваги.
- Недоліки: складніший доступ для обслуговування (елементи на дні кокпіту), менша стійкість тяги до ударних навантажень.

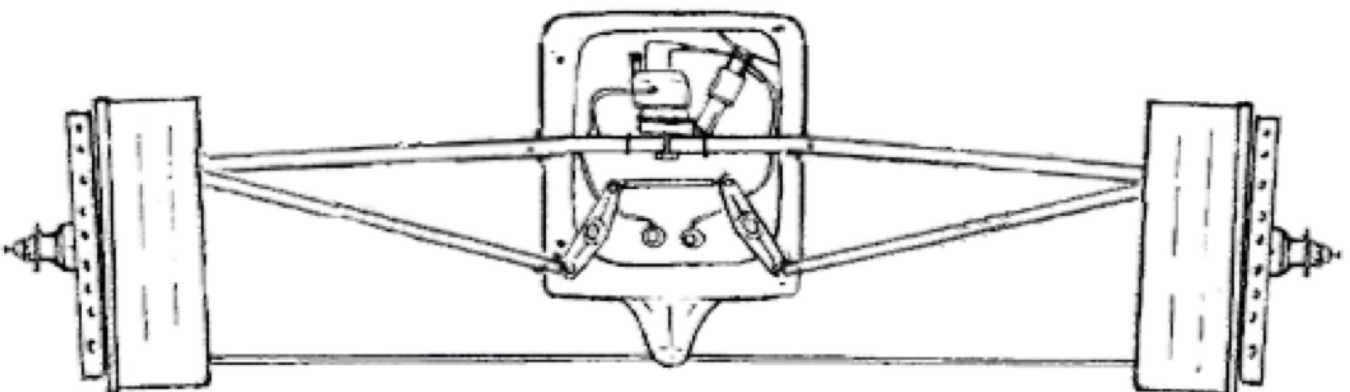


Рисунок 1.3 – Кінематична схема підвіски типу Pull-rod

Триамортизаторна система підвіски на автомобілі доповнює системи штовхальної та тягової. Як згадувалося, системи штовхальної та тягової тяг дозволяють підтримувати постійний дорожній просвіт автомобіля під час поворотів, але не вирішують цю ситуацію під час гальмування та розгону автомобіля (автомобіль крениться поздовжньо). Рішенням є включення третього амортизатора до системи. До вузла підвіски додаються ще дві тяги, коромисло та один амортизатор з пружиною (для кожної осі).

Ще однією перевагою є можливість використання м'якшого налаштування пружини на стандартному амортизаторі. Це ще більше збільшує механічне зчеплення без впливу самої притискної сили, яка в іншому випадку притискала б автомобіль до землі, впливаючи на дорожній просвіт.

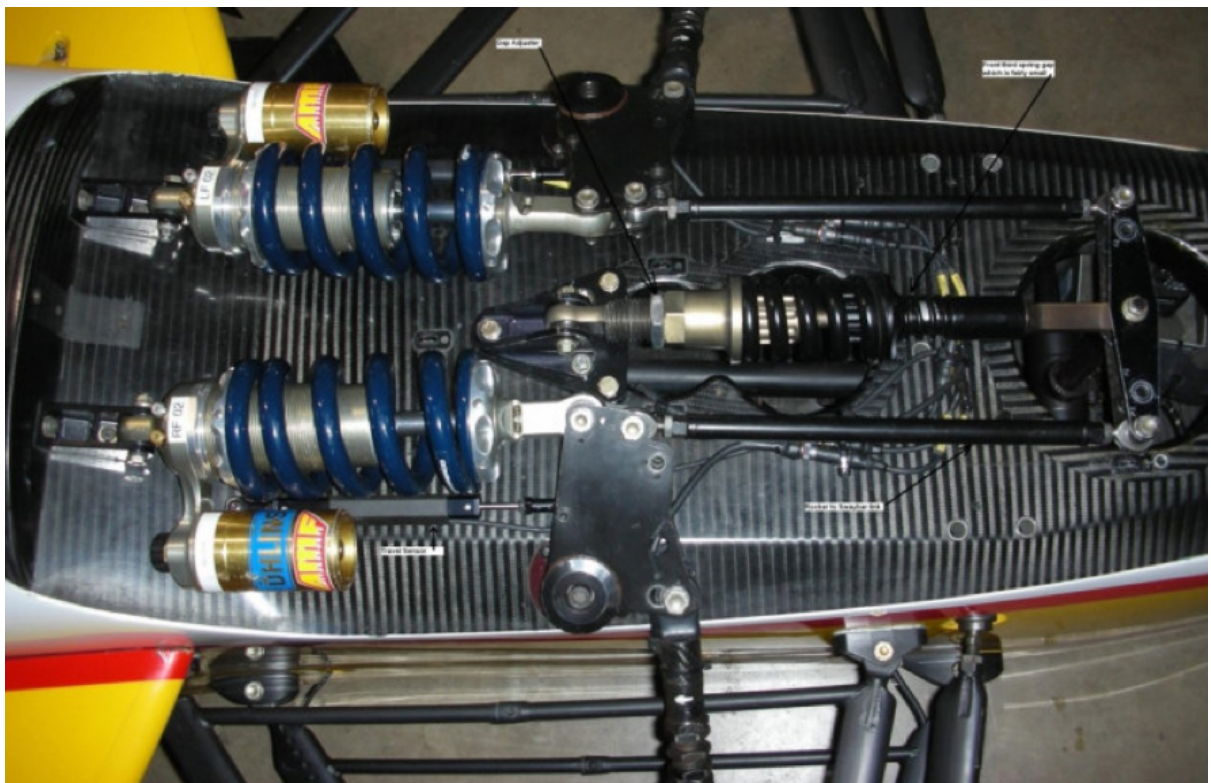


Рисунок 1.4 – Триамортизаторна система підвіски на автомобілі Formula Student

Мета системи FRIC (Front-and-Rear Interconnected Suspension (Підвіска з переднім та заднім взаємозв'язком)) така ж, як і при використанні третього

амортизатора – забезпечити максимально можливу стійкість та постійну висоту дорожнього просвіту в будь-якій ситуації (повороти, гальмування та розгін). На відміну від системи з третім амортизатором, де кожен міст працює, не впливаючи на інший, система FRIC створює зв'язок між переднім та заднім мостами (найчастіше за допомогою шлангів з гідравлічною рідиною).

Принцип полягає в роботі шляхом перекачування гідравлічної рідини між мостами та компенсації поздовжнього крену. Система з комп'ютерним керуванням використовувалася у Формулі-1 ще в 1990-х роках, але була заборонена FIA. Ідею відродили конструктори боліда Mercedes W02 F1 у 2011 році.

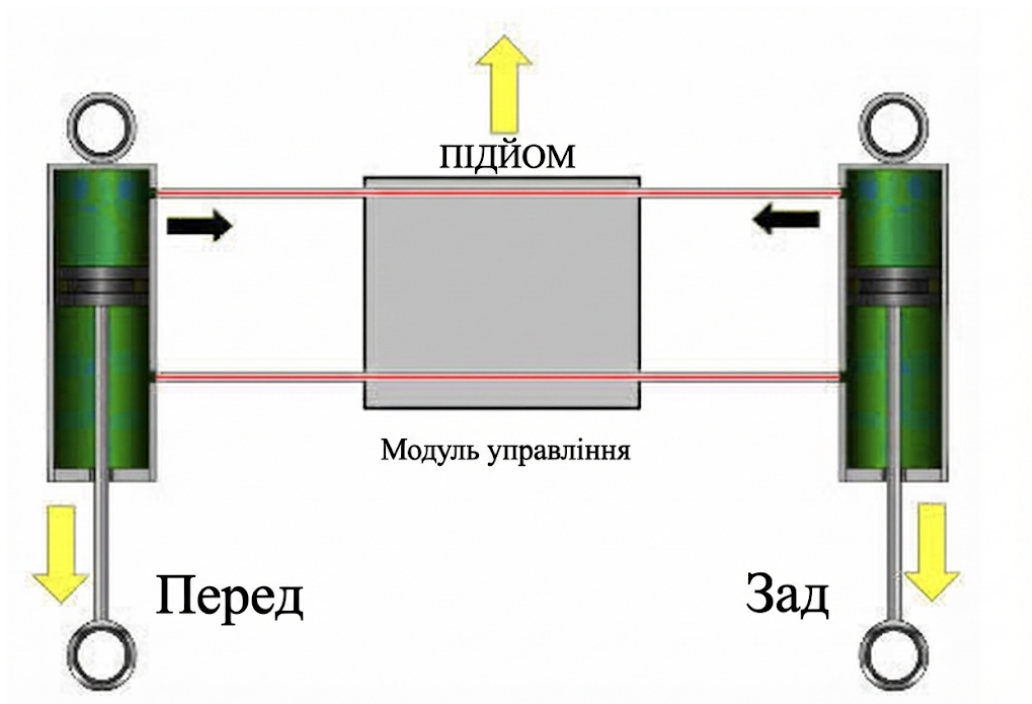


Рисунок 1.5 – Гідравлічна схема системи FRIC

Вони використовували не активно керовану систему, а пасивну, але регламент FIA на сезон 2015 року також заборонив цю систему.

1.4. Конструкція та роль коромисла (рокера)

Коромисло (рокер) є ключовим вузлом у схемах Push-rod та Pull-rod. Воно виконує функцію мультиплікатора переміщень, перетворюючи вертикальний хід колеса у хід штока амортизатора. Зазвичай рокер виготовляється з алюмінієвих сплавів (наприклад, 7075-T6) для забезпечення високої питомої міцності. Конструктивно він являє собою важіль складної форми, який обертається на підшипниках навколо осі, закріпленої на рамі або монококу. До рокера приєднуються тяга від колеса, амортизатор та часто — стабілізатор поперечної стійкості.



Рисунок 1.6 – Приклад конструкції коромисла (рокера) у зборі з тягами

1.5. Обґрунтування вибору конструкції

Оскільки гурток кафедри проектує автомобіль з нуля, необхідно обрати оптимальний баланс між продуктивністю та складністю виготовлення. Для передньої підвіски проектованого автомобіля обрано схему Push-rod.

Основні причини вибору:

- 1) Аеродинаміка: Можливість прибрати амортизатори з повітряного потоку, що є критичним для відкритоколісних болідів.
- 2) Доступність налаштувань: На відміну від схеми *Pull-rod*, де амортизатори сховані глибоко внизу, схема *Push-rod* забезпечує кращий доступ механіків до пружин та регулювань гідравліки, що важливо для студентської команди в умовах перегонів.
- 3) Кінематична гнучкість: Використання рокера дозволяє задати необхідне передавальне відношення (Motion Ratio) та прогресивну характеристику жорсткості без зміни точок кріплення важелів на рамі.

Таким чином, головним завданням роботи є проектування саме коромисла (рокера), яке забезпечить надійну роботу обраної схеми Push-rod.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

У першому розділі магістерської дисертації проведено аналітичний огляд конструкцій підвісок болідів класу Formula Student та визначено напрямок проектування для першого прототипу автомобіля гуртка кафедри.

Аналіз регламенту FSAE показав, що проектування підвіски обмежене суворими вимогами безпеки та геометрії. Ключовими граничними умовами для розробки є забезпечення ходу колеса не менше 50 мм, кліренсу понад 30 мм та

використання у відповідальних вузлах кріплення класу міцності не нижче 8.8 із обов'язковим контруванням.

Порівняльний аналіз кінематичних схем (Direct Acting, Push-rod, Pull-rod) дозволив встановити, що для сучасних болідів з розвиненою аеродинамікою використання схем з проміжним елементом (рокером) є необхідністю. Це дозволяє прибрати пружні елементи з повітряного потоку та знизити аеродинамічний опір.

Обґрунтовано вибір концепції: Для проєктованого автомобіля обрано схему передньої підвіски типу Push-rod (штовхаюча штанга). Такий вибір є оптимальним компромісом для новоствореної команди, оскільки забезпечує високу аеродинамічну ефективність при збереженні зручного доступу до амортизаторів для їх налаштування та обслуговування, на відміну від компоновання Pull-rod.

Постановка задачі: Визначено, що коромисло (рокер) є критично важливим вузлом обраної схеми, який відповідає за передачу зусиль та кінематичне співвідношення (Motion Ratio). Тому подальша робота буде зосереджена на визначенні діючих навантажень, математичному моделюванні та конструкторській розробці саме цього елемента з метою забезпечення його міцності при мінімальній масі.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПІДВІСКИ

2.1. Математична модель кінематики підвіски типу Push-rod

Для проектуваного автомобіля обрано схему з штовхаючою штангою (Push-rod). На відміну від класичної схеми, де амортизатор кріпиться напряду до нижнього важеля, тут додається проміжна ланка — коромисло (рокер). Це дозволяє розмістити пружні елементи всередині шасі, покращуючи аеродинаміку, але вимагає точного кінематичного розрахунку.

Ключовим кінематичним параметром, що визначає роботу підвіски, є передавальне відношення (MR). Воно зв'язує переміщення колеса з переміщенням штока амортизатора.

Аналітично передавальне відношення визначається як відношення вертикального переміщення штока амортизатора (dS) до вертикального переміщення колеса (dW):

$$MR = \frac{dS}{dW} \quad (2.1)$$

Для схеми з коромислом MR також можна наближено виразити через геометричні розміри плечей коромисла, за умови, що кути установки тяг близькі до 90 градусів:

$$MR \approx \frac{L_{shock}}{L_{push}} \cdot \sin(\alpha) \quad (2.2)$$

де:

- L_{shock} — довжина плеча коромисла, до якого кріпиться амортизатор;
- L_{push} — довжина плеча коромисла, до якого кріпиться штовхаюча штанга (push-rod);

- α — кут між штангою та важелем рокера.

Жорсткість пружини (K_{spring}), встановленої на амортизаторі, не дорівнює реальній жорсткості, яку "відчуває" колесо (K_{wheel}). Залежність між ними є квадратичною відносно передавального відношення:

$$K_{wheel} = K_{spring} \cdot MR^2 \quad (2.3)$$

Ця формула (2.3) є базовою для вибору пружин. Вона показує, що навіть незначна зміна геометрії коромисла (зміна MR) суттєво впливає на загальну жорсткість підвіски автомобіля.

2.2. Розрахунок навантажень на елементи підвіски

Для проектування коромисла на міцність необхідно визначити максимальні зусилля, що передаються через тягу *push-rod*. Ці зусилля виникають внаслідок динамічного перерозподілу ваги при маневрах.

Сили, що діють на підвіску, залежать від прискорень автомобіля. Вертикальна реакція на найбільш навантаженому колесі (F_{wheel}) при гальмуванні або повороті визначається як сума статичної ваги та динамічної добавки.

Для випадку гальмування ("клівок") динамічне довантаження передньої осі (ΔF_{z_long}) розраховується за формулою:

$$\Delta F_{z_long} = \frac{m \cdot a_x \cdot h_{CG}}{L} \quad (2.4)$$

де:

- m — повна маса автомобіля з пілотом;
- a_x — поздовжнє прискорення (для розрахунку приймається $2.5g$);
- h_{CG} — висота центру мас;
- L — колісна база.

Для випадку повороту (крен) довантаження зовнішнього колеса (ΔF_{z_lat}) становить:

$$\Delta F_{z_lat} = \frac{m \cdot a_y \cdot h_{CG}}{T} \quad (2.5)$$

де:

- a_y — поперечне прискорення (приймається $2.5g$);
- T — колія (track width).

Тоді максимальна вертикальна сила на колесі (F_{wheel}):

$$F_{wheel} = \frac{m \cdot g}{4} + \Delta F_{z_long} + \Delta F_{z_lat} + F_{aero} \quad (2.6)$$

де F_{aero} — аеродинамічна притискна сила, що діє на одне колесо.

Знаючи вертикальну силу на колесі (F_{wheel}), можна аналітично знайти зусилля, що стискає штангу ($F_{pushrod}$). Розглянувши рівновагу нижнього важеля, отримуємо:

$$F_{pushrod} = \frac{F_{wheel}}{\cos(\beta)} \cdot \frac{L_{arm}}{L_{mount}} \quad (2.7)$$

де:

- β — кут нахилу штанги *push-rod* до вертикалі (у фронтальній проекції);
- L_{arm} — довжина нижнього важеля;
- L_{mount} — відстань від корпусу до точки кріплення *push-rod* на важелі.

Саме сила $F_{pushrod}$ (2.7) є тим розрахунковим навантаженням, на яке буде перевірятися коромисло.

2.3. Методика визначення навантажень у середовищі MSC Adams Car

Оскільки реальна підвіска є просторовим механізмом зі змінними кутами (α , β), ручний розрахунок за формулами (2.1–2.7) дає лише наближені значення. Для отримання точних даних використовується метод багаотитілової динаміки (Multibody Dynamics) у комплексі MSC Adams Car.

Програма розв'язує систему диференціальних рівнянь руху для кожного тіла системи, враховуючи нелінійні характеристики амортизаторів та кінематику зміни кутів під час ходу підвіски. У середовищі Adams Car створено повну кінематичну модель підвіски.

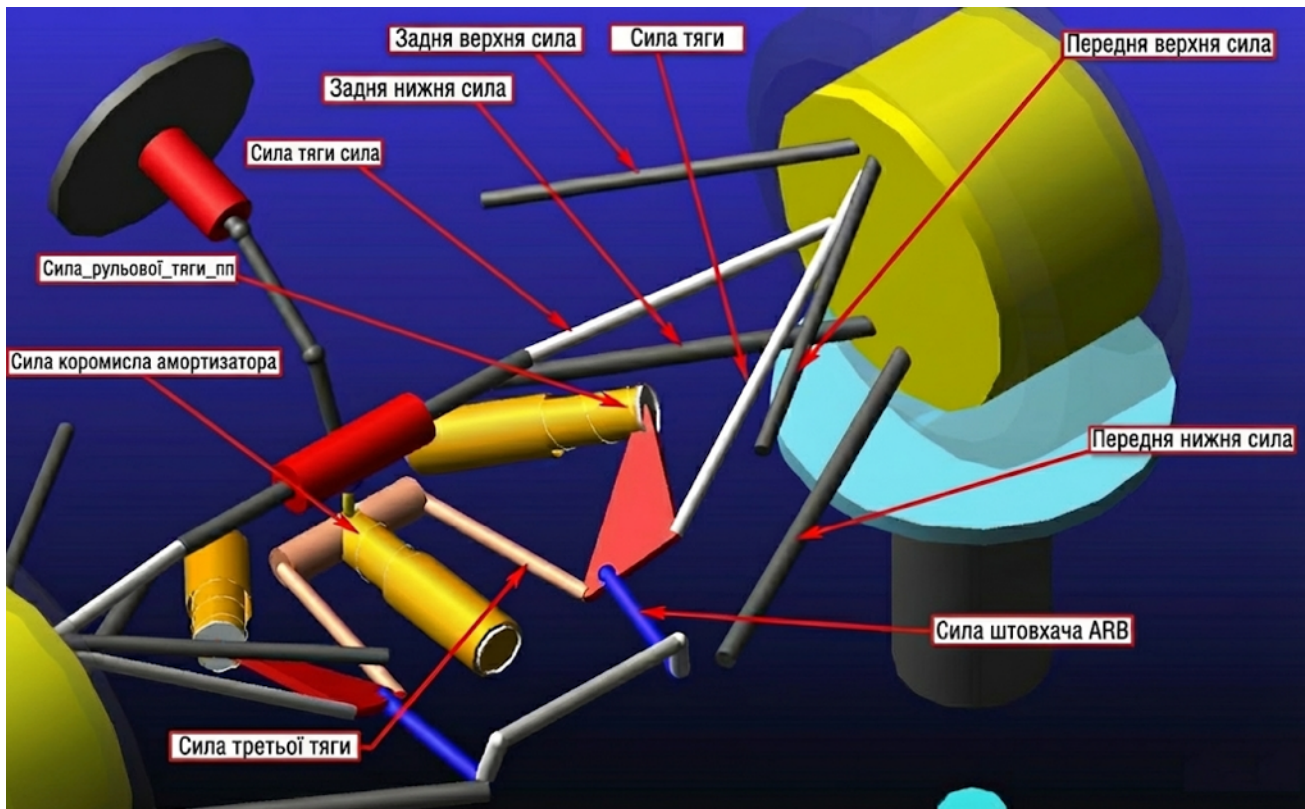


Рисунок 2.1 – Кінематична модель передньої підвіски у середовищі MSC Adams Car

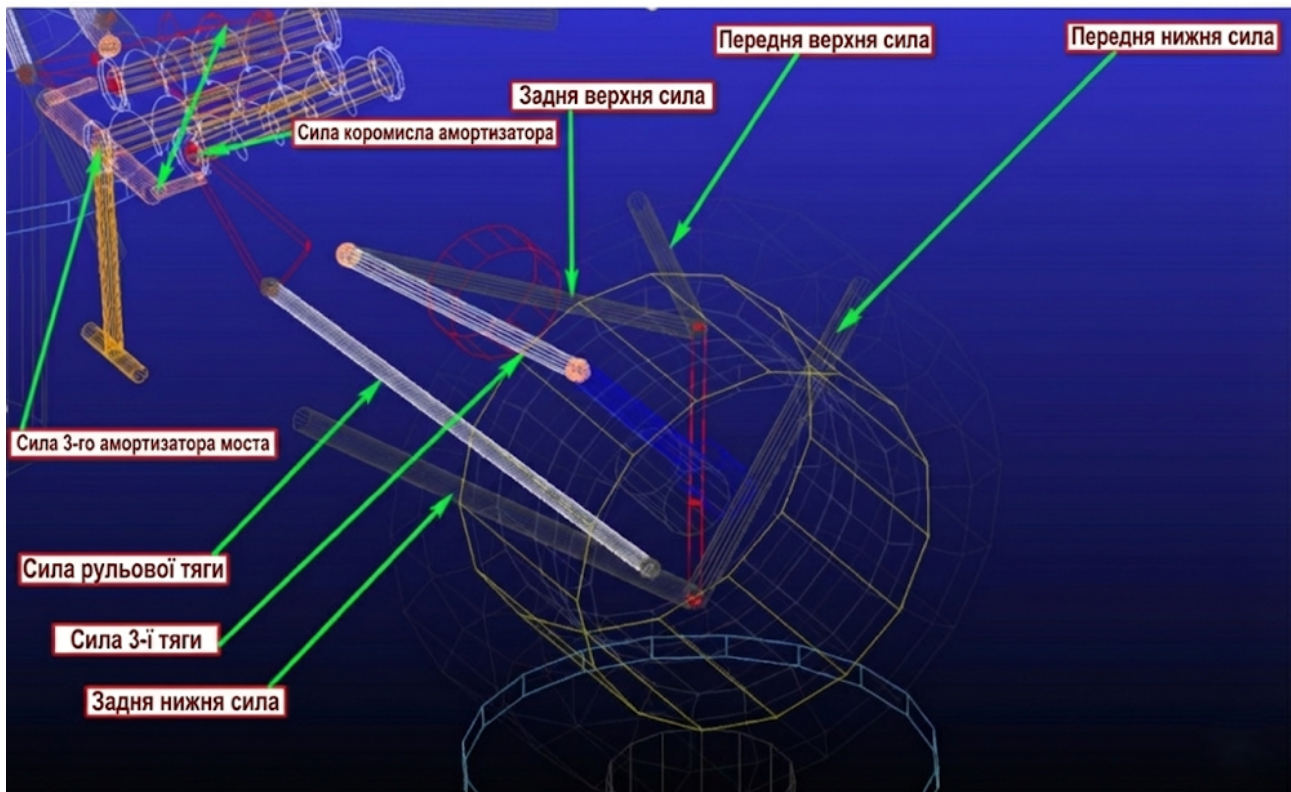


Рисунок 2.2 – Кінематична модель задньої підвіски у середовищі MSC Adams Car

Результати симуляції для трьох критичних режимів наведені нижче.

Симуляція передбачає наїзд автомобіля на перешкоду, що викликає швидке одночасне стиснення підвіски обох коліс. Це режим максимального вертикального навантаження.

Результати симуляції:

- Сила у штовхаючій штанзі (Rod force): 6783 Н^1
- Реакція амортизатора: -1632 Н^2

Симулюється проходження повороту з бічним перевантаженням $2.5G$.

Розглядаються сили на зовнішньому (завантаженому) колесі.

Результати симуляції:

- Сила у штовхаючій штанзі: 5030 Н^3
- Реакція амортизатора: -1270 Н^4

Симулюється гальмування з перевантаженням 2.5G з урахуванням аеродинамічного притиску.

Результати симуляції:

- Сила у штовхаючій штанзі: 4580 Н ⁵
- Реакція амортизатора: -1030 Н ⁶

Зведені результати розрахунків сил для різних режимів представлені на гістограмі.

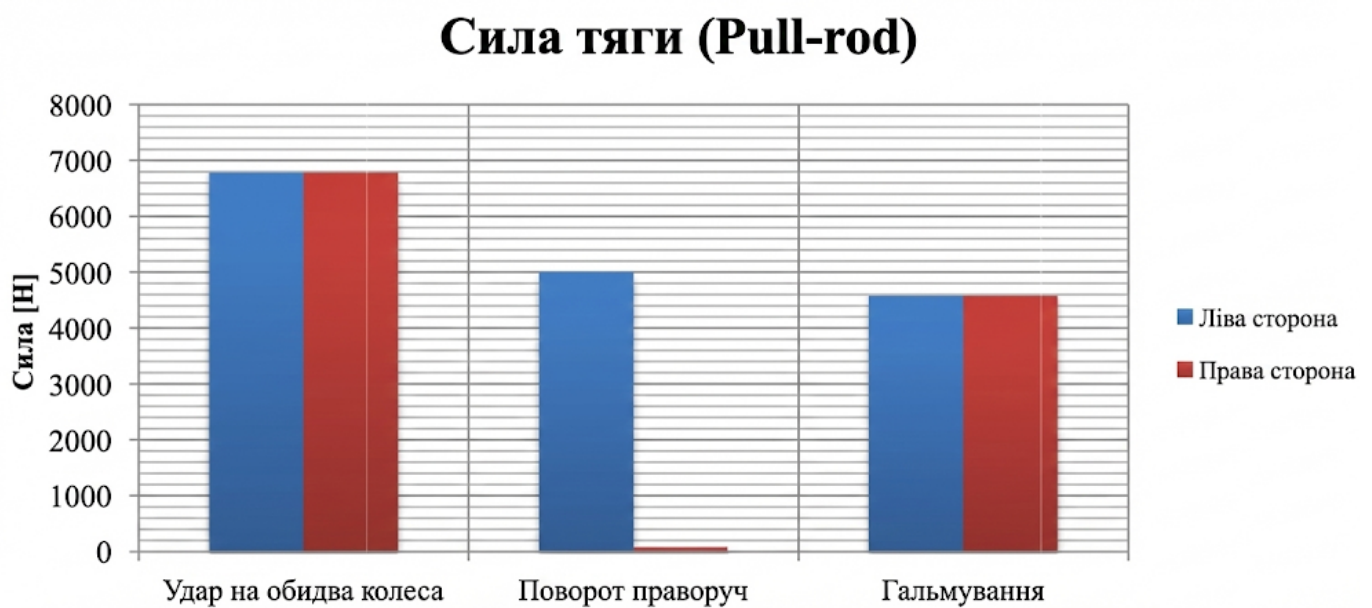


Рисунок 2.3 – Порівняння сил у штанзі підвіски для різних режимів навантаження

Також наведено графік сил реакції амортизатора, які коромисло має передати на раму.

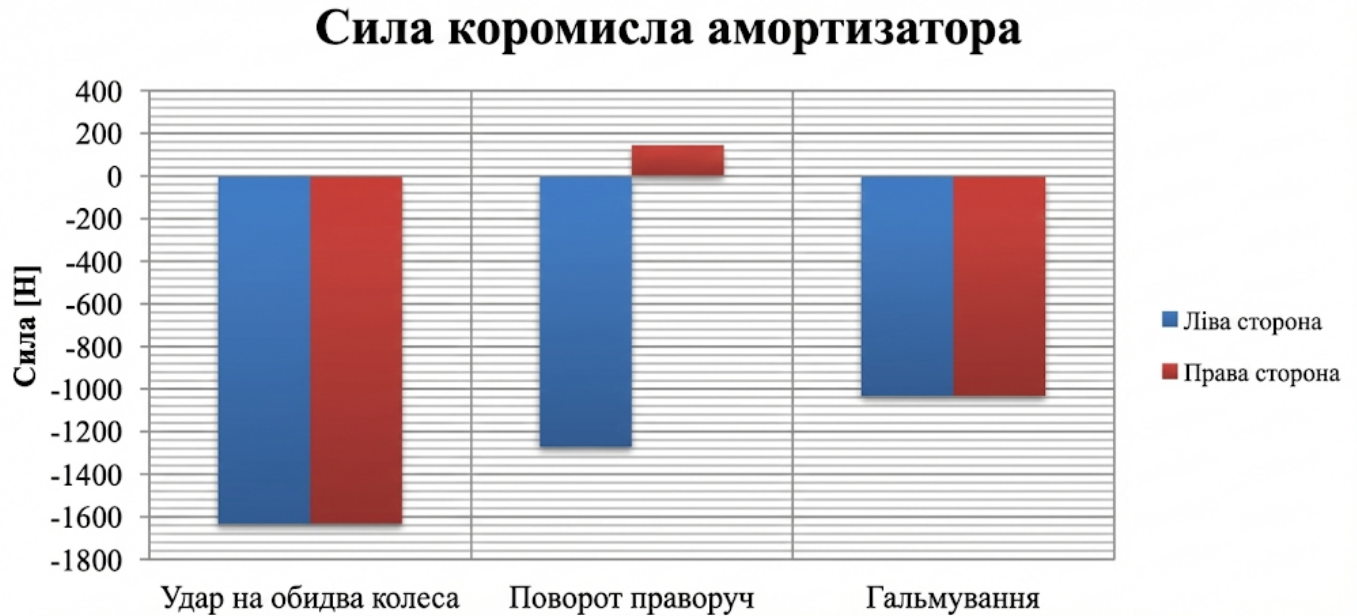


Рисунок 2.4 – Сили реакції амортизатора

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

У ході виконання другого розділу магістерської дисертації було проведено комплексне теоретичне дослідження кінематики та динаміки підвіски спортивного автомобіля класу *Formula Student*. На основі аналізу математичних моделей, що описують роботу підвіски типу *Push-rod*, було встановлено ключові аналітичні залежності між переміщенням колеса, передавальним відношенням коромисла та результуючою жорсткістю підвіски. Це дозволило сформувати теоретичне підґрунтя для подальшого проектування вузла.

Для отримання достовірних даних щодо навантажень, які діють на елементи підвіски в реальних умовах експлуатації, було застосовано метод імітаційного моделювання багаотілових систем (Multibody Simulation). Використання спеціалізованого програмного комплексу MSC Adams Car дозволило змодельовати поведінку автомобіля у найбільш критичних динамічних режимах, таких як ударне навантаження при наїзді на перешкоду, проходження повороту з максимальним бічним прискоренням та інтенсивне гальмування.

Аналіз отриманих результатів симуляції показав, що навантаження на елементи підвіски суттєво варіюються залежно від режиму руху. Зокрема, було виявлено, що визначальним розрахунковим випадком для проектування коромисла є режим симетричного удару ("Bump"). У цьому режимі осьове зусилля, що передається через штовхаючу штангу (*push-rod*), досягає свого пікового значення — 6783 Н. Це значно перевищує навантаження, що виникають при маневруванні (5030 Н) або гальмуванні (4580 Н).

Таким чином, саме значення сили у 6783 Н було прийнято як базова розрахункова величина (гранична умова) для наступного етапу роботи. Це забезпечить необхідний запас міцності проекрованої деталі та гарантує надійність функціонування всієї системи підвіски навіть в екстремальних ситуаціях на гоночній трасі. Отримані дані є вихідною інформацією для проведення конструкторської розробки 3D-моделі коромисла та перевірочних розрахунків методом скінченних елементів, що буде детально розглянуто у третьому розділі.

РОЗДІЛ 3. КОНСТРУЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК КОРОМИСЛА (РОКЕРА) ПІДВІСКИ

3.1. Розробка геометричної моделі у середовищі CAD

Процес конструювання коромисла розпочався зі створення параметричної 3D-моделі у середовищі автоматизованого проектування (CAD). Враховуючи складну геометрію та необхідність подальшої САМ-обробки (Computer Aided Manufacturing), було обрано програмний комплекс **PTC Creo Parametric 3.0**.

Проектування виконувалось методом "згори-вниз" (Top-Down Design). Спочатку було розроблено керуючий каркас (скелетон) підвіски, який містить лише базові точки (hardpoints) та осі, що відповідають кінематичній схемі, визначеній у Розділі 2. Це забезпечує геометричну узгодженість усіх елементів підвіски.

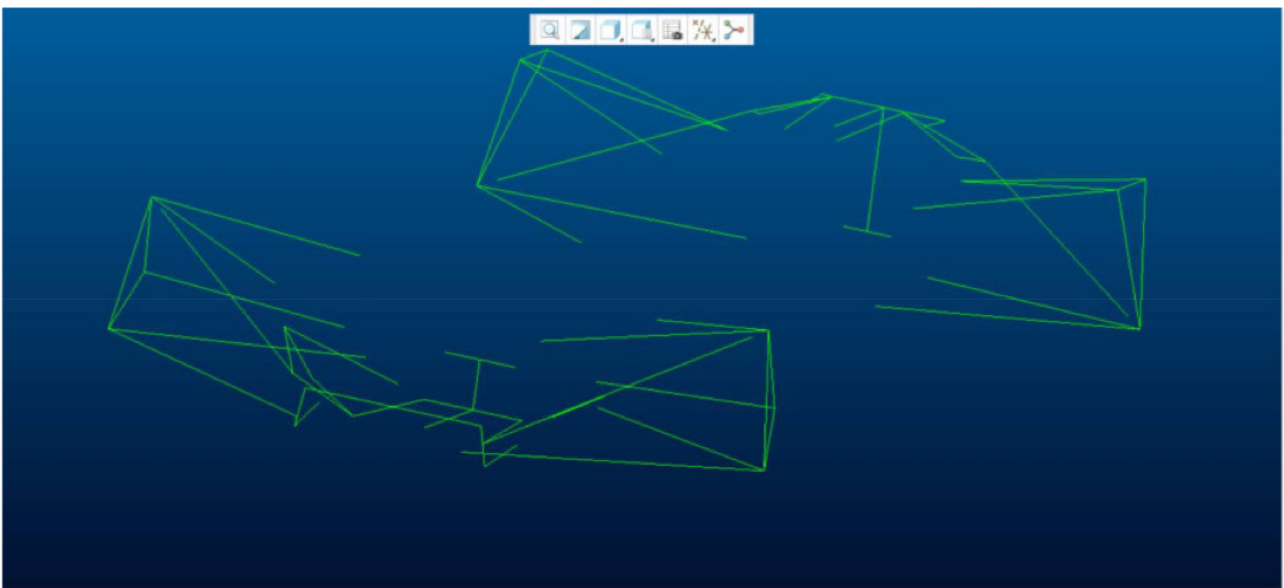


Рисунок 3.1 – Каркасна модель (скелетон) підвіски

На основі координат точок скелетону було побудовано ескіз базового тіла коромисла. Геометрія деталі є плоскою трикутною призмою з вирізами для

полегшення. Такий профіль обрано з огляду на технологічність виготовлення на 3-осьовому фрезерному верстаті з ЧПК.

У моделі передбачено центральний отвір для осі гойдання, до якої кріпиться підшипниковий вузол, та отвори на периферії для кріплення штовхаючої штанги (push-rod), амортизатора та стабілізатора.

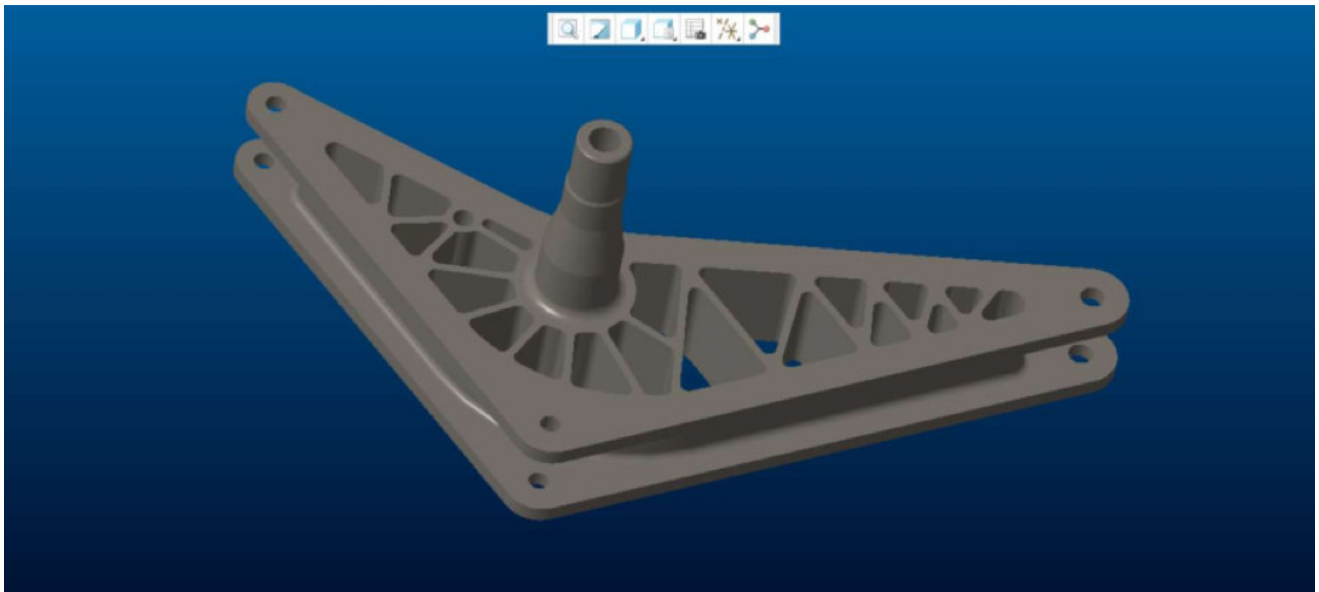


Рисунок 3.2 – Базова геометрична модель коромисла

Для перевірки збираємості було створено повну збірку вузла, що включає коромисло, підшипники, дистанційні втулки та елементи кріплення.

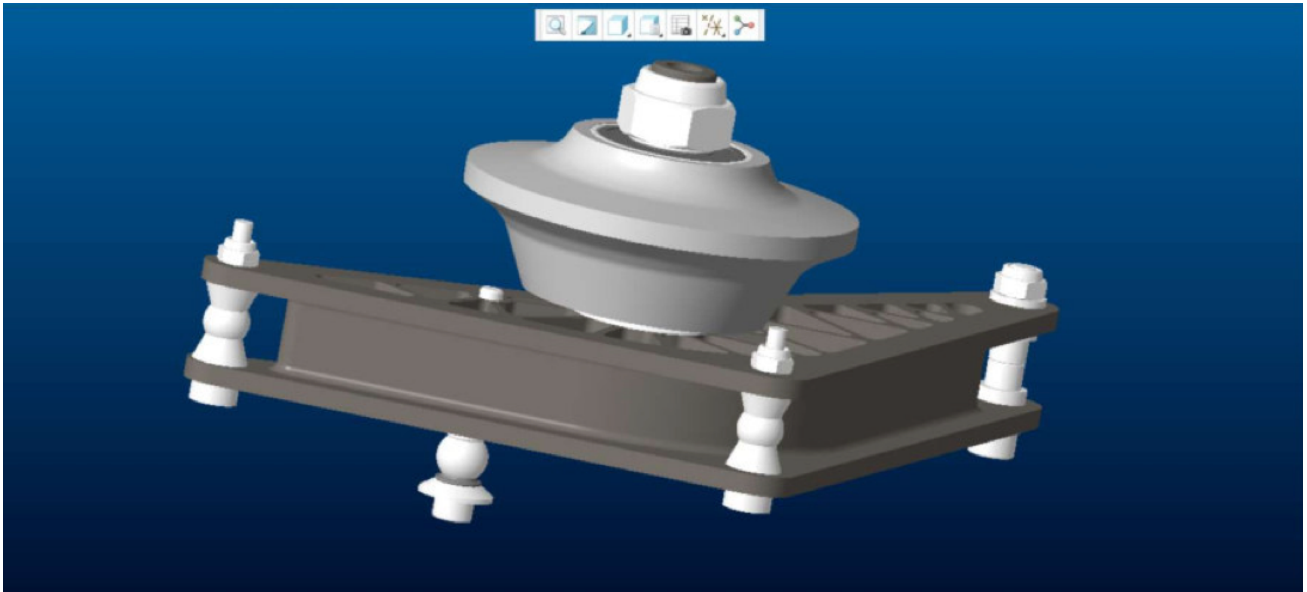


Рисунок 3.3 – Збірка вузла коромисла в CAD-системі

3.2. Вибір матеріалу та обґрунтування властивостей

Оскільки коромисло є непідресореною масою (частково) і передає значні навантаження, матеріал повинен мати високе відношення границі плинності до густини.

Для виготовлення деталі обрано високоміцний алюмінієвий сплав EN AW 7075 T6 (авіаційний алюміній).

Механічні властивості сплаву, що були задані у розрахунковій моделі²:

- Модуль пружності (E): $71.7 \cdot 10^3$ МПа.
- Коефіцієнт Пуассона (ν): 0.33.
- Границя плинності ($\sigma_{0.2}$): ≈ 500 МПа.
- Густина (ρ): 2810 кг/м³.

Вибір цього матеріалу дозволяє отримати легку конструкцію, яка здатна витримувати знакозмінні навантаження без пластичних деформацій.

3.3. Створення розрахункової моделі (FEA)

Перевірочний розрахунок та оптимізація конструкції проводились методом скінченних елементів (МКЕ) у програмному середовищі ANSYS Workbench 14.5.

Геометрія була імпортована з CAD-системи у форматі STEP. Для дискретизації моделі використано сітку на основі квадратичних тетраедрів (Tet10), які добре описують складну криволінійну геометрію.

- Global mesh: Середній розмір елемента на тілі коромисла — 3 мм.
- Refinement: У зонах концентрації напружень (навколо отворів та радіусів спряження) застосовано локальне згущення сітки для підвищення точності розрахунку.

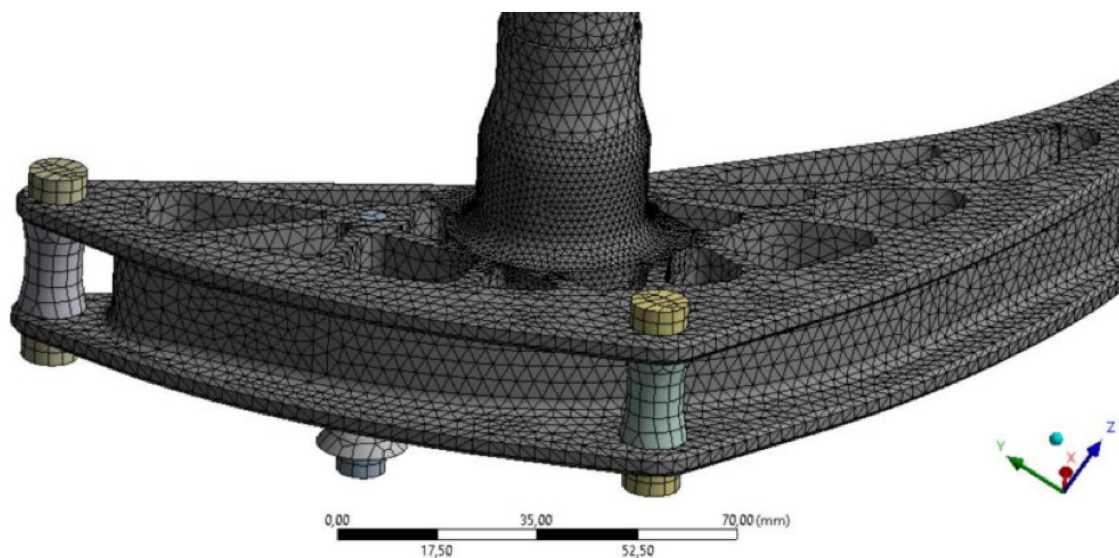


Рисунок 3.4 – Скінченно-елементна сітка моделі

Для коректної симуляції було налаштовано контактну взаємодію між деталями збірки (Contacts) та накладено кінематичні в'язки (Supports):

1. Центральна вісь (Pivot): Накладено в'язку *Remote Displacement* або циліндричну підтримку, що дозволяє обертання навколо осі Y, але забороняє радіальні та осьові переміщення.

2. Амортизатор: В точці кріплення амортизатора задано реактивну силу або обмеження переміщення, що імітує опір пружини.
3. Зовнішнє навантаження: Прикладено у точці кріплення штовхаючої штанги (Push-rod).

Розрахунок проводився для найбільш критичного випадку "Bump" (Удар), визначеного у Розділі 2.

Величина прикладеної сили $F = 6783 \text{ Н}$ (стиск).

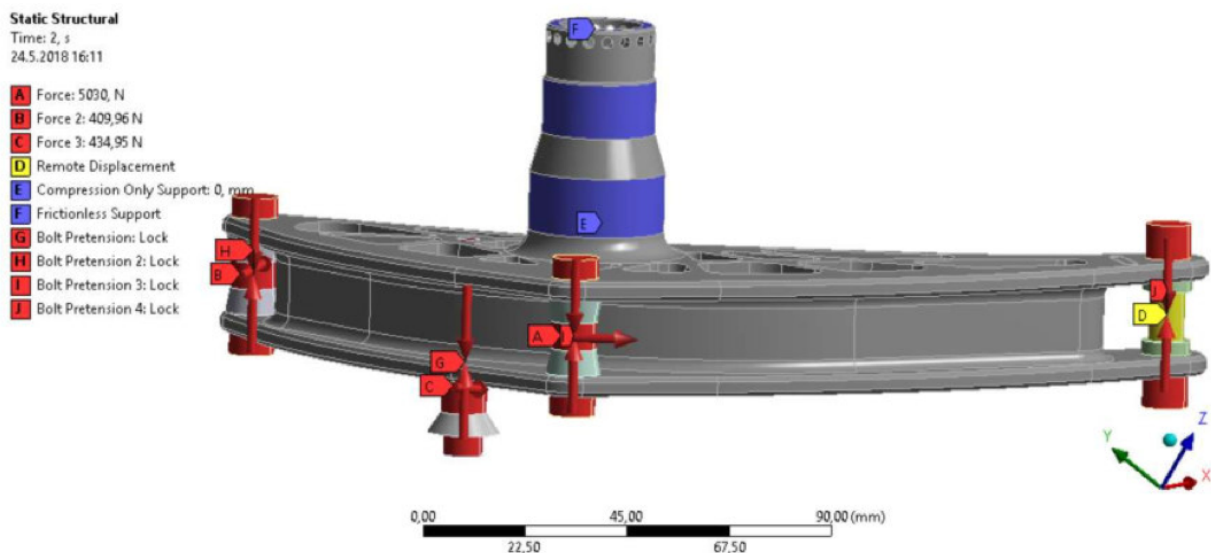


Рисунок 3.5 – Схема прикладання навантажень та закріплень

3.4. Аналіз напружено-деформованого стану (НДС)

Результати статичного структурного аналізу (Static Structural) для базового варіанту конструкції показали наступне. Максимальні еквівалентні напруження за мізесом (σ_{VM}) виникають у зоні переходу від вушок кріплення до основного тіла важеля.

- Максимальне напруження: 207 МПа.

- Це значення є значно меншим за границю плинності матеріалу (500 МПа), що свідчить про надмірний запас міцності ($n \approx 2.4$) і можливість подальшого полегшення деталі.

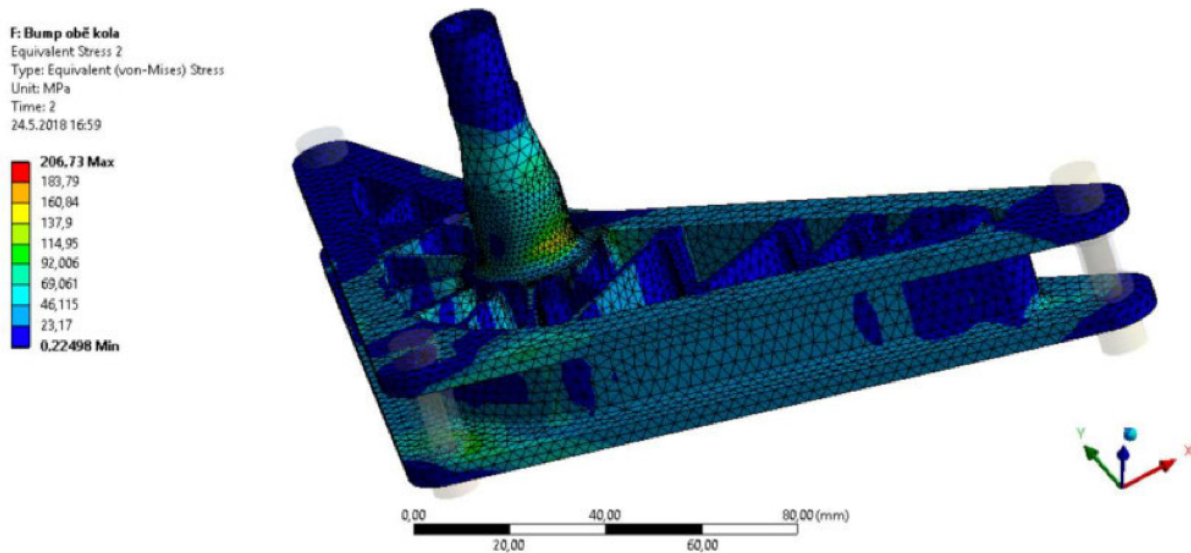


Рисунок 3.6 – Розподіл еквівалентних напружень (початковий варіант)

Максимальне переміщення спостерігається у точці прикладання сили (вушко push-rod).

- Максимальна деформація: 0.249 мм.

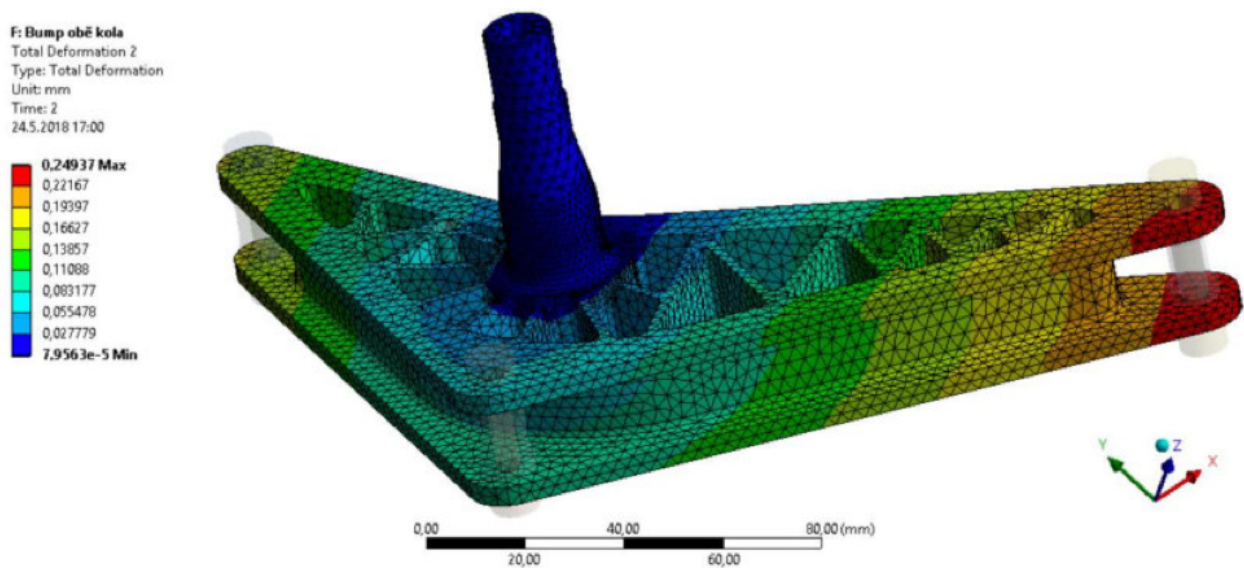


Рисунок 3.7 – Розподіл повних деформацій (початковий варіант)

3.5. Оптимізація конструкції

На основі отриманих результатів було проведено ітераційну оптимізацію конструкції. Метою було зниження маси при збереженні допустимого рівня деформацій.

Шляхом топологічного аналізу було вилучено "зайвий" матеріал у ненавантажених зонах (центральна частина трикутника) та оптимізовано товщину ребер жорсткості. Було проведено 15 ітерацій зміни геометрії⁷.

Результати фінальної симуляції:

Після оптимізації конструкція стала легшою, при цьому напруження перерозподілилися більш рівномірно.

- Максимальне напруження знизилось до 164 МПа.
- Максимальна деформація зменшилась до 0.185 мм.
- Фінальна маса деталі склала 370 г.

Зниження напружень при зменшенні маси пояснюється більш раціональною формою силових ребер, які ефективніше сприймають згинальні моменти.

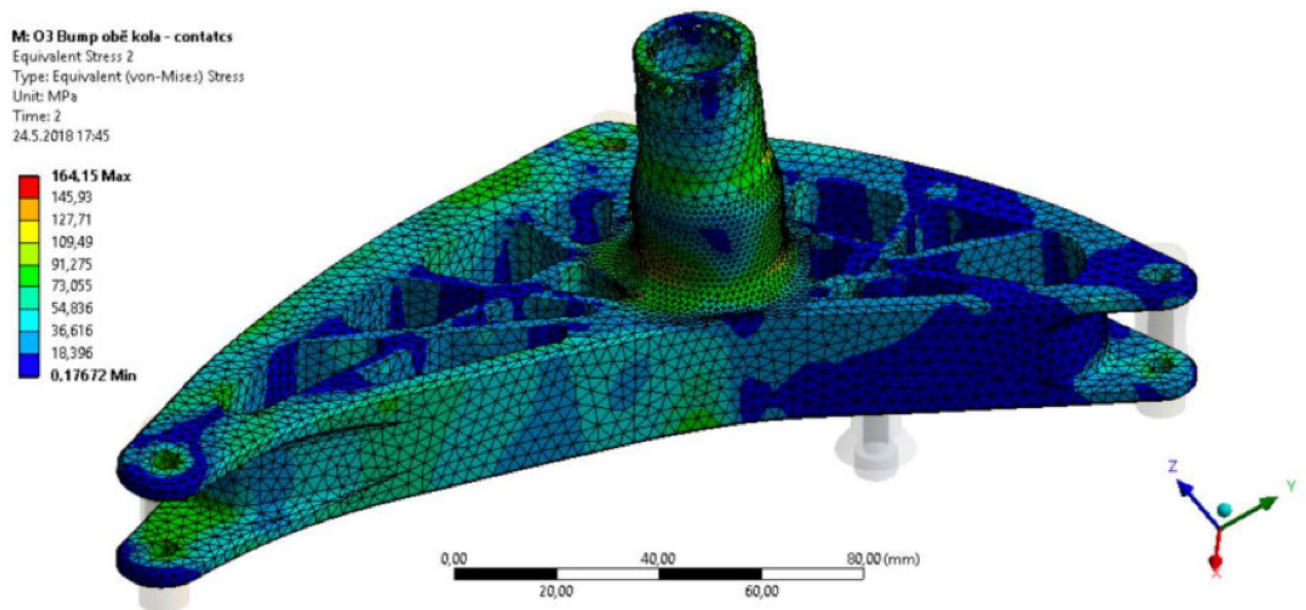


Рисунок 3.8 – Розподіл напружень у фінальній оптимізованій конструкції

3.6. Фінальний вигляд деталі

Остаточна геометрія коромисла являє собою ажурну конструкцію з розвиненою системою ребер жорсткості. У конструкцію закладено технологічні фаски та радіуси заокруглення для уникнення концентраторів напружень при фрезеруванні. Також передбачено місця під встановлення різьбових вставок (HeliCoil) для підвищення надійності різьбових з'єднань в алюмінії.



Рисунок 3.9 – 3D-модель розробленого коромисла (фінальний варіант)

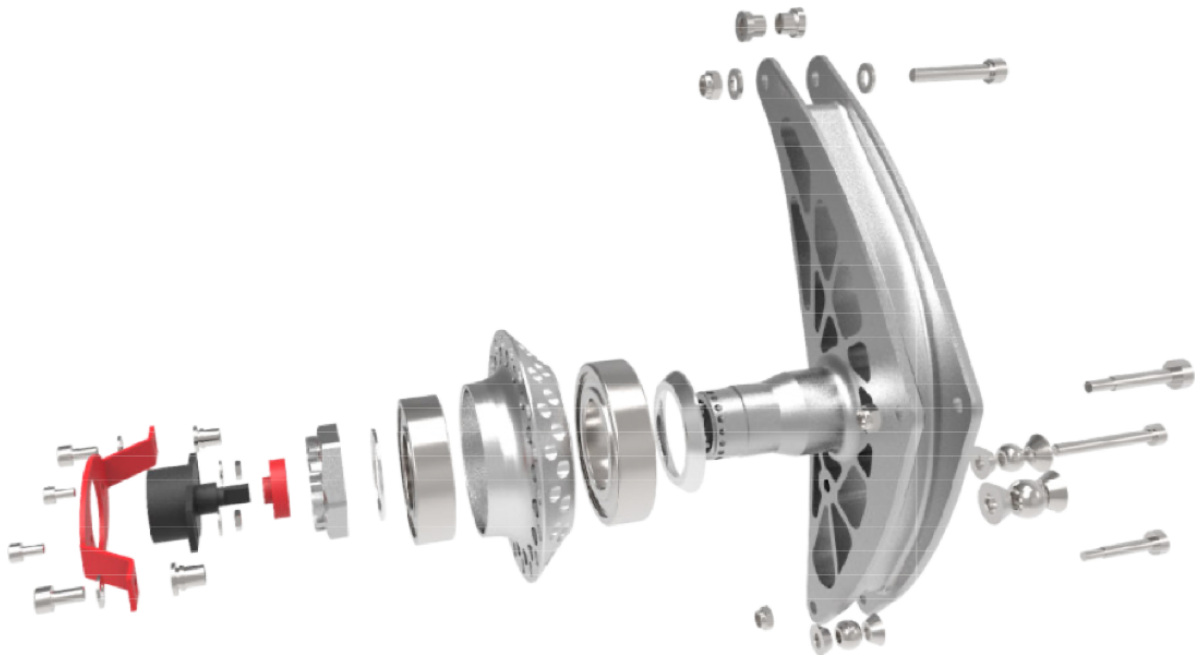


Рисунок 3.10 – 3D-модель розробленого коромисла в зборі

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

У третьому розділі було виконано повний цикл конструкторської розробки коромисла передньої підвіски: від створення геометричної концепції до фінальної верифікації та оптимізації.

У середовищі PTC Creo Parametric спроектовано параметричну 3D-модель коромисла, геометрія якої повністю відповідає кінематичним вимогам схеми *Push-rod*. Використання скелетону підвіски дозволило забезпечити точне позиціонування точок кріплення (*hardpoints*), що гарантує коректну кінематику руху підвіски без виникнення паразитних навантажень.

Обґрунтування вибору матеріалу – алюмінієвого сплаву EN AW 7075 T6 як конструкційного матеріалу підтвердив свою доцільність. Завдяки високій границі плинності (≈ 500 МПа) та низькій густині, вдалося створити деталь, яка поєднує малу масу з високою жорсткістю, що є критичним для зниження невідпружених мас спортивного автомобіля.

Проведений аналіз напружено-деформованого стану у програмному середовищі ANSYS Workbench підтвердив працездатність конструкції в

екстремальних умовах. Розрахунок для найбільш критичного режиму навантаження ("Bump", сила 6783 Н) показав, що максимальні еквівалентні напруження у фінальній версії деталі не перевищують 164 МПа. Це забезпечує коефіцієнт запасу міцності $n \approx 3.0$, що є оптимальним показником для елементів підвіски, враховуючи втомну міцність та можливі динамічні перевантаження.

Проведена ітераційна топологічна оптимізація (порівняння першого та фінального варіантів) дозволила суттєво покращити характеристики виробу. Зокрема, вдалося знизити максимальні напруження на 21% (з 207 до 164 МПа) та зменшити деформації на 26% (з 0.249 до 0.185 мм)². Це свідчить про раціональний перерозподіл матеріалу в тілі деталі, де силові ребра ефективно сприймають згинальні моменти, а ненавантажені зони були полегшені.

Фінальна конструкція коромисла масою 370 г повністю адаптована до виготовлення на 3-осьових фрезерних верстатах з ЧПК. Передбачені технологічні бази, радіуси заокруглення інструменту та місця під встановлення різьбових вставок (HeliCoil) гарантують технологічність виробництва та експлуатаційну довговічність вузла.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА НАСЕЛЕННЯ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при виготовленні вузлів спортивного автомобіля

Охорона праці при проектуванні та виготовленні підвіски автомобіля класу Formula Student базується на Законі України «Про охорону праці» та відповідних нормативно-правових актах. Роботи виконуються на базі спеціалізованої лабораторії (майстерні) кафедри університету.

До роботи з металообробним обладнанням, електроінструментом та композитними матеріалами допускаються студенти та співробітники, які пройшли вступний інструктаж, первинний інструктаж на робочому місці та мають відповідні навички поводження з обладнанням.

У процесі виготовлення деталей підвіски (зокрема фрезерування коромисла, токарна обробка втулок, робота з карбоновими інсертми) на працюючих можуть впливати такі небезпечні та шкідливі фактори:

1. Фізичні фактори:

- Рухомі частини виробничого обладнання: обертові елементи верстатів з ЧПК (шпинделі, фрези), патрони токарних верстатів, абразивні круги.
- Гострі кромки та задирки: на поверхнях заготовок, деталей та інструментів, що можуть призвести до порізів.
- Підвищений рівень шуму: під час роботи фрезерних верстатів, кутових шліфувальних машин («болгарок») та пневмоінструменту.

- Пил та аерозолі: алюмінієвий пил при обробці металів та, що особливо небезпечно, вуглепластиковий пил при різанні та шліфуванні карбонових елементів.
- Електричний струм: небезпека ураження при роботі з електроінструментом або несправності заземлення верстатів.

2. Хімічні фактори:

- Токсичні випари: при роботі з епоксидними смолами, затверджувачами та розчинниками під час виготовлення композитних деталей або їх склеювання.
- Мастильно-охолоджувальні рідини (МОР): тривалий контакт зі шкірою може викликати дерматити та алергічні реакції.

3. Психофізіологічні фактори:

- Напруження зору при виконанні точних робіт та роботи з кресленнями.
- Фізичні перевантаження при ручному складанні вузлів.

4.2. Вимоги техніки безпеки перед початком робіт

Перед початком роботи в майстерні кожен учасник проекту зобов'язаний:

1. Одягнути спецодяг та ЗІЗ: Застібнути манжети рукавів, прибрати звисаючі кінці одягу, сховати волосся під головний убір. Використання захисних окулярів є обов'язковим при будь-яких видах механічної обробки.
2. Перевірити робоче місце: Прибрати зайві предмети, що заважають роботі. Переконалися у достатньому освітленні робочої зони (згідно з ДБН В.2.5-28-2006).
3. Перевірити обладнання:

- Переконалися у справності верстатів, наявності захисних екранів та кожухів.
- Перевірити надійність заземлення електрообладнання.
- Перевірити справність ручного інструменту (молотки повинні бути насаджені на ручки та розклинені, гайкові ключі — відповідати розмірам гайок).

4. Вентиляція: При плануванні робіт з композитами або зварюванні — увімкнути місцеву витяжну вентиляцію.

4.3. Техніка безпеки під час виконання основних технологічних операцій

4.3.1. Безпека при механічній обробці (фрезерування, токарні роботи)

Виготовлення коромисла з алюмінію 7075 T6 вимагає дотримання суворих правил:

- Фіксація заготовки: Заготовка повинна бути надійно закріплена у лещатах або прижимах. Забороняється обробляти деталі, що утримуються в руках.
- Видалення стружки: Забороняється прибирати стружку руками або стисненим повітрям (щоб уникнути травмування очей). Слід використовувати спеціальні щітки-зміталки та гачки.
- Робота з ЧПК: Забороняється відкривати захисні дверцята верстата до повної зупинки шпинделя. Під час зміни інструменту слід бути обережним з гострими ріжучими кромками фрез.
- Охолодження: При використанні МОР слідкувати за тим, щоб рідина не розливалася на підлогу (небезпека посковзнутися).

4.3.2. Безпека при слюсарно-складальних роботах та роботі з підвіскою

При складанні вузлів підвіски та монтажі їх на раму автомобіля:

- Підйомно-транспортні роботи: При необхідності підняття автомобіля або його частини (рами) використовувати лише справні домкрати. Категорично заборонено працювати під автомобілем/рамою, якщо він утримується лише домкратом — обов'язкове встановлення страхувальних підставок (козелків).
- Пружини: При монтажі амортизаторів з пружинами слід використовувати спеціальні стяжки. Забороняється розбирати навантажені амортизатори без попередньої фіксації пружини, щоб уникнути травмування від "вистрілювання" деталей.
- Інструмент: При затягуванні різьбових з'єднань ключем рух руки має бути спрямований "на себе", щоб уникнути травми при зісковзуванні ключа.

4.3.3. Специфічні вимоги при роботі з композитними матеріалами (Carbon Fiber)

У проекті використовуються вуглепластикові труби та інsertи. Обробка карбону має специфічні ризики:

- Захист органів дихання: Вуглепластиковий пил є дуже дрібним і не виводиться з легень. Роботи з різання та шліфування карбону дозволяються виключно в респіраторах класу захисту не нижче FFP2/FFP3 та при працюючій витяжці.
- Захист шкіри: Епоксидні смоли є сильними алергенами. Роботу слід проводити в нітрилових рукавичках. При потраплянні смоли на шкіру — негайно змити її спеціальним очисником або мильною водою, не використовувати розчинники (ацетон), оскільки вони прискорюють всмоктування токсинів у кров.

- Електробезпека: Вуглецевий пил є струмопровідним. Необхідно захищати електроінструмент та комп'ютерну техніку від потрапляння пилу всередину корпусу, щоб уникнути короткого замикання.

4.4. Пожежна безпека

У разі виникнення пожежі або появи ознак горіння кожен працівник (студент) зобов'язаний негайно повідомити про подію оперативно-рятувальну службу за телефоном «101» або «112», зазначивши точну адресу об'єкта, кількість поверхів будівлі, місце виникнення пожежі, інформацію про можливу наявність людей у приміщенні, а також повідомити своє прізвище. Про факт пожежі необхідно також одразу поінформувати керівництво або відповідальну особу.

Після цього слід організувати евакуацію людей та, за можливості, матеріальних цінностей, дотримуючись встановлених шляхів евакуації. У разі потреби необхідно відключити електроживлення струмоприймачів і припинити роботу вентиляційних систем з метою запобігання поширенню вогню та диму. За відсутності безпосередньої загрози життю допускається розпочати гасіння пожежі із застосуванням наявних первинних засобів пожежогасіння.

Важливим обов'язком є організація зустрічі підрозділів оперативно-рятувальної служби та надання їм сприяння під час ліквідації пожежі. Необхідно завчасно попередити керівника гасіння пожежі про наявність у приміщенні вибухонебезпечних, отруйних або хімічно активних речовин та в подальшому безумовно виконувати всі його вказівки.

У разі наявності потерпілих слід негайно надати першу долікарську допомогу при опіках. Насамперед необхідно вжити заходів для припинення дії високої температури на потерпілого. Далі слід обережно зняти з поверхні тіла тліючий або сильно нагрітий одяг, уникаючи різких рухів, щоб не пошкодити

шкірні покриви. Одяг, що прилип до шкіри, забороняється відривати — його необхідно акуратно обрізати навколо ділянки опіку.

Для запобігання інфікуванню опікової поверхні необхідно якомога швидше накласти суху асептичну пов'язку. У разі відсутності стерильного перев'язувального матеріалу допускається накривати уражену ділянку чистою бавовняною тканиною, попередньо пропрасованою гарячою праскою або змоченою етиловим спиртом.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

У четвертому розділі дипломної роботи проведено комплексний аналіз питань охорони праці та безпеки життєдіяльності при проектуванні та виготовленні елементів підвіски спортивного автомобіля Formula Student. В ході дослідження було ідентифіковано основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що виникають в умовах навчально-виробничої лабораторії. До найбільш критичних віднесено механічні травми при роботі з металообробним обладнанням, потенційне ураження органів дихання дрібнодисперсним вуглепластиковим та алюмінієвим пилом, а також хімічний вплив компонентів епоксидних смол та мастильно-охолоджувальних рідин.

Для мінімізації виробничих ризиків розроблено та систематизовано технічні вимоги безпеки для специфічних технологічних процесів проекту. Зокрема, детально регламентовано правила роботи з фрезерними верстатами з ЧПК, що включають надійну фіксацію заготовок та захист від стружки, а також специфіку роботи з композитними матеріалами, де обов'язковим є використання респіраторів високого класу захисту та місцевої витяжної вентиляції.

Окрему увагу приділено організаційним заходам, які встановлюють чіткий порядок допуску студентів до роботи, вимоги до засобів індивідуального захисту та належного утримання робочих місць. Враховуючи наявність у майстерні

горючих матеріалів та складного електрообладнання, було розроблено заходи з електробезпеки та пожежної безпеки, а також сформульовано чіткий алгоритм дій персоналу у разі виникнення надзвичайних ситуацій. Реалізація запропонованих заходів дозволить забезпечити відповідність процесу виготовлення боліда чинному законодавству України про охорону праці та зберегти здоров'я учасників проекту.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1. Методика розрахунку витрат на матеріали

Економічна ефективність інженерних рішень є однією з ключових дисциплін змагань Formula Student (Cost and Manufacturing Event). Визначення вартості матеріалів базується на конструкторській документації, розробленій у третьому розділі.

Основним матеріалом для виготовлення коромисла обрано алюмінієвий сплав високої міцності EN AW 7075 T6. Для розрахунку вартості заготовки необхідно враховувати не лише "чисту" вагу готової деталі (370 г), а й габаритні розміри вихідної плити (заготовки), з якої буде фрезеруватися виріб.

Маса заготовки ($m_{\text{заг}}$) визначається об'ємом описаного паралелепіпеда з урахуванням припусків на обробку та затискання:

$$m_{\text{заг}} = L \cdot B \cdot H \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad (5.1)$$

де:

- L, B, H — довжина, ширина та висота заготовки відповідно (приймаємо $200 \times 120 \times 40$ мм);
- ρ — густина матеріалу (для алюмінію 7075 T6 $\rho = 2810$ кг/м³).

Вартість основного матеріалу ($C_{\text{мат}}$) розраховується за формулою:

$$C_{\text{мат}} = m_{\text{заг}} \cdot C_{\text{кг}} \cdot K_{\text{тр}} \quad (5.2)$$

де:

- $C_{\text{кг}}$ — ринкова вартість 1 кг матеріалу;
- $K_{\text{тр}}$ — коефіцієнт транспортно-заготівельних витрат (приймається 1.05).

Окрім конструкційного матеріалу, до статті витрат входять покупні комплектуючі вироби. Згідно зі специфікацією проекту, до них належать

підшипники кочення фірми SKF (моделі 6006 2RS1 та 6005 2RSN¹), які забезпечують обертання коромисла. Особливістю конструкції є використання різьбових вставок HeliCoil, які необхідні для створення зносостійкої різьби в алюмінієвому сплаві. Також враховуються витрати на кріпильні елементи високого класу міцності (болти ISO 7379, DIN 912, гайки DIN 985), що відповідають вимогам регламенту безпеки.

5.2. Розрахунок технологічної собівартості

Основну частку в собівартості займають витрати на механічну обробку на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК). Розрахунок вартості базується на часі (T), необхідному для написання керуючої програми (CAM), налаштування верстата та безпосередньо процесу різання.

Вартість технологічних операцій ($C_{\text{тех}}$) визначається як:

$$C_{\text{тех}} = (T_{\text{пз}} + T_{\text{маш}}) \cdot C_{\text{год}} \quad (5.3)$$

де:

- $T_{\text{пз}}$ — підготовчо-заклучний час (встановлення пристроїв, прив'язка інструменту);
- $T_{\text{маш}}$ — основний машинний час (безпосереднє фрезерування);
- $C_{\text{год}}$ — вартість однієї години роботи обладнання.

Додатковою статтею витрат є фінішна обробка. Для захисту від корозії та підвищення поверхневої твердості передбачено процес твердого анодування. Також сюди можуть бути віднесені витрати на адитивне виробництво (3D-друк) допоміжних елементів, таких як кріплення для датчиків ходу підвіски (потенціометрів), що виготовляються з пластику ABS.

Повна (загальна) собівартість виготовлення одного комплекту ($C_{\text{заг}}$) визначається як сума всіх складових:

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{тех}} + C_{\text{куп}} + C_{\text{анод}} \quad (5.4)$$

де:

- $C_{\text{куп}}$ — вартість покупних виробів (підшипники, кріплення, вставки);
- $C_{\text{анод}}$ — вартість послуг з анодування (покриття).

5.3. Калькуляція собівартості виготовлення коромисла

Розрахунок виконано для виготовлення комплекту з двох коромисел (ліве та праве) в умовах лабораторії кафедри.

Таблиця 5.1 – Калькуляція витрат на виготовлення комплекту передніх коромисел (2 шт.)

№	Найменування статті витрат	Параметри / Тип	К-сть	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	Матеріали ($C_{\text{мат}}$)				1215
2	Алюміній EN AW 7075 T6	Плита 200x120x40	2.7 кг	450	1215
3	Покупні вироби ($C_{\text{куп}}$)				1840
4	Підшипник кочення	SKF 6006 2RS1	2 шт.	280	560
5	Підшипник кочення	SKF 6005 2RSH	2 шт.	240	480
6	Різьбова вставка	HeliCoil M6/M8	4 шт.	50	200
7	Комплект кріплення	Болти ISO 7379, DIN 912	1 к-т	400	400
8	Гайка стопорна	DIN 985 / Спец. гайка	2 шт.	100	200

9	Технологічні операції ($C_{\text{тех}} + C_{\text{анод}}$)				2200
10	Робота верстата з ЧПК	Фрезерування ($T_{\text{маш}} = 3.5$ год)	3.5 год	500	1750
11	Анодування	Послуга підрядника	2.5 дм ²		450
	ВСЬОГО ($C_{\text{заг}}$)				5255

5.4. Економічна доцільність проекту

Аналіз показує, що собівартість одного готового вузла становить 2627.50 грн. Порівняння цієї суми з ринковою вартістю виготовлення аналогічної деталі на замовлення (аутсорсинг), яка складає близько 4000–5000 грн за штуку, підтверджує економічну ефективність власного виробництва.

Виготовлення деталі силами студентського гуртка дозволяє зекономити бюджет команди, виключивши комерційну націнку виробника, та спрямувати кошти на закупівлю якісніших комплектуючих (наприклад, підшипників SKF замість дешевших аналогів).

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

У п'ятому розділі дипломної роботи проведено комплексний техніко-економічний розрахунок виготовлення коромисла передньої підвіски автомобіля Formula Student. Детальна калькуляція собівартості показала, що основну частку витрат (близько 42%) складають технологічні операції, зокрема механічна обробка на верстатах з ЧПК. Це пояснюється складністю геометричної форми деталі, яка вимагає значного машинного часу для фрезерування та перевстановлення заготовки. Витрати на основні матеріали (високоміцний

алюміній 7075 T6) та спеціалізовані покупні вироби (підшипники SKF, вставки HeliCoil) становлять близько 35% та 23% відповідно.

Розрахунки переконливо підтвердили доцільність виготовлення вузла силами студентського гуртка на базі університетської лабораторії. Собівартість комплекту з двох коромисел склала 5255 грн, що майже вдвічі дешевше за ринкову вартість виготовлення аналогічних деталей на замовлення (аутсорсинг). Економія досягається завдяки відсутності комерційної націнки на машино-години та самостійній підготовці керуючих програм (CAM) студентами. Заощаджені кошти дозволяють оптимізувати бюджет проекту, перенаправивши фінанси на закупівлю більш якісних та надійних комплектуючих, що безпосередньо впливає на надійність та конкурентоспроможність боліда. Обрана стратегія виробництва повністю відповідає регламенту змагань та філософії інженерної освіти, поєднуючи економічну вигоду з набуттям практичних навичок проектування та виготовлення.

У ході виконання другого розділу магістерської дисертації було проведено комплексне теоретичне дослідження кінематики та динаміки підвіски спортивного автомобіля класу Formula Student. На основі аналізу математичних моделей, що описують роботу підвіски типу *Push-rod*, було встановлено ключові аналітичні залежності між переміщенням колеса, передавальним відношенням коромисла та результуючою жорсткістю підвіски. Це дозволило сформулювати теоретичне підґрунтя для подальшого проектування вузла.

Для отримання достовірних даних щодо навантажень, які діють на елементи підвіски в реальних умовах експлуатації, було застосовано метод імітаційного моделювання багаотілових систем (Multibody Simulation). Використання спеціалізованого програмного комплексу MSC Adams Car дозволило змодельовати поведінку автомобіля у найбільш критичних динамічних режимах, таких як ударне навантаження при наїзді на перешкоду, проходження повороту з максимальним бічним прискоренням та інтенсивне гальмування.

Аналіз отриманих результатів симуляції показав, що навантаження на елементи підвіски суттєво варіюються залежно від режиму руху. Зокрема, було виявлено, що визначальним розрахунковим випадком для проектування коромисла є режим симетричного удару ("Bump"). У цьому режимі осьове зусилля, що передається через штовхаючу штангу (*push-rod*), досягає свого пікового значення — 6783 Н. Це значно перевищує навантаження, що виникають при маневруванні (5030 Н) або гальмуванні (4580 Н).

Таким чином, саме значення сили у 6783 Н було прийнято як базова розрахункова величина (гранична умова) для наступного етапу роботи. Це забезпечить необхідний запас міцності проекрованої деталі та гарантує надійність функціонування всієї системи підвіски навіть в екстремальних ситуаціях на гоночній трасі. Отримані дані є вихідною інформацією для проведення конструкторської розробки 3D-моделі коромисла та перевірочних розрахунків методом скінченних елементів, що буде детально розглянуто у третьому розділі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено комплексне науково-прикладне завдання проектування підвіски спортивного автомобіля *Formula Student*, що включає аналітичне обґрунтування, конструкторську розробку, розрахункову верифікацію та техніко-економічний аналіз.

На початковому етапі дослідження було проведено глибокий аналіз технічного регламенту змагань та існуючих конструктивних рішень підвісок гоночних болідів. Враховуючи жорсткі вимоги до безпеки, геометричних параметрів (хід колеса не менше 50 мм, кліренс понад 30 мм) та необхідність забезпечення високих аеродинамічних характеристик, було обґрунтовано вибір кінематичної схеми передньої підвіски типу *Push-rod* (штовхаюча штанга). Дана концепція визначена як оптимальна для першого прототипу автомобіля гуртка кафедри, оскільки дозволяє прибрати пружні елементи з повітряного потоку, знижуючи аеродинамічний опір, та водночас забезпечує зручний доступ до налаштувань амортизаторів, що є критичною перевагою над схемою *Pull-rod* в умовах змагань.

Теоретичне підґрунтя роботи сформовано на основі дослідження кінематики та динаміки автомобіля. Застосування методу імітаційного моделювання багаотілових систем у середовищі *MSC Adams Car* дозволило отримати достовірні дані про навантаження на елементи підвіски в реальних умовах експлуатації. Встановлено, що найбільш критичним розрахунковим випадком для проектування є режим симетричного удару («Bump»), при якому осьове зусилля у штовхаючій штанзі досягає пікового значення 6783 Н, що значно перевищує навантаження при маневруванні (5030 Н) та гальмуванні (4580 Н). Отримані значення стали базовими граничними умовами для подальших розрахунків на міцність.

Конструкторська частина роботи реалізована шляхом створення параметричної 3D-моделі коромисла в середовищі *PTC Creo Parametric* з

використанням скелетону підвіски для точного позиціювання точок кріплення. Вибір високоміцного алюмінієвого сплаву EN AW 7075 T6 підтвердив свою доцільність, забезпечивши поєднання високої границі плинності та низької густини. Перевірочний розрахунок напружено-деформованого стану методом скінченних елементів у ANSYS Workbench підтвердив надійність конструкції: максимальні напруження не перевищують 164 МПа, що гарантує коефіцієнт запасу міцності на рівні 3.0. Завдяки проведеній топологічній оптимізації вдалося знизити максимальні напруження на 21% та деформації на 26%, отримавши фінальну масу деталі всього 370 г, що позитивно впливає на зниження невіднесених мас.

Важливою складовою проекту стала розробка комплексних заходів з охорони праці, адаптованих до умов навчально-виробничої лабораторії. Ідентифіковано основні виробничі ризики, зокрема механічні травми та вплив шкідливого пилу при обробці композитів, та розроблено відповідні технічні й організаційні заходи захисту. Це гарантує безпеку учасників проекту під час виготовлення деталей на верстатах з ЧПК та роботи з хімічними компонентами. Завершальним етапом став техніко-економічний аналіз, який переконливо довів доцільність власного виробництва компонентів підвіски. Розрахунки показали, що виготовлення коромисел силами студентського гуртка на базі університетської майстерні дозволяє знизити собівартість комплекту до 5255 грн, що майже вдвічі дешевше за ринкову вартість виготовлення аналогічних деталей на замовлення. Така економія дозволяє оптимізувати бюджет команди та спрямувати ресурси на підвищення загальної конкурентоспроможності боліда. Таким чином, результати роботи підтверджують готовність розробленої конструкції до впровадження у виробництво першого прототипу автомобіля *Formula Student* гуртка кафедри.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баженов В. А. Будівельна механіка. Комп'ютерні технології : підручник / В. А. Баженов, А. В. Перельмутер, О. В. Шишов. — Київ : Каравела, 2009. — 606 с.
2. Біляков В. В. Теорія руху автомобіля : навч. посіб. / В. В. Біляков. — Вінниця : ВНТУ, 2010. — 310 с.
3. Бобер М. І. Опір матеріалів : підручник / М. І. Бобер, В. І. Кисельов. — Київ : Вища школа, 2014. — 431 с.
4. Бойко А. І. Економіка підприємства : навч. посіб. / А. І. Бойко. — Київ : КНЕУ, 2018. — 320 с.
5. Василенко О. В. Теорія коливань : навч. посіб. / О. В. Василенко. — Київ : Вища школа, 2005. — 367 с.
6. Гетьман О. О. Економіка підприємства : навч. посіб. / О. О. Гетьман, В. М. Шаповал. — 2-ге вид. — Київ : Центр учбової літератури, 2010. — 488 с.
7. Григор'єв М. О. Автомобільні двигуни та їх системи : навч. посіб. / М. О. Григор'єв. — Харків : ХНАДУ, 2012. — 210 с.
8. Гутаревич Ю. Ф. Автомобілі. Конструкція та розрахунок : підручник / Ю. Ф. Гутаревич. — Київ : НТУ, 2010. — 480 с.
9. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. — [Чинний від 2019-03-01]. — Київ : Мінрегіон України, 2018. — 135 с.
10. Деталі машин : підручник / [А. В. Міняйло, Л. М. Тіщенко, Д. І. Мазоренко та ін.]. — Київ : Агроосвіта, 2013. — 448 с.
11. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. — Затверджено постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999 № 37.
12. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. — Затверджено постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999 № 42.

13. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення понять. — [Чинний від 2015-10-01]. — Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. — 28 с.
14. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. — [Чинний від 1996-01-01]. — Київ : Держстандарт України, 1995. — 95 с.
15. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. — [Чинний від 2016-07-01]. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 16 с.
16. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. — 45 с.
17. Живкович А. Б. Розрахунок на міцність деталей машин методом скінченних елементів : навч. посіб. / А. Б. Живкович. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. — 180 с.
18. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ (зі змінами та доповненнями). — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>.
19. Кисельов В. Б. Технологія машинобудування : підручник / В. Б. Кисельов. — Київ : Кондор, 2015. — 460 с.
20. Клименко Л. П. Технологія машинобудування : підручник / Л. П. Клименко. — Київ : Кондор, 2014. — 564 с.
21. Клим Е. А. Ходова частина автомобілів : навч. посіб. / Е. А. Клим. — Львів : Афіша, 2008. — 342 с.
22. Копитчук М. Б. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля : навч. посіб. / М. Б. Копитчук. — Київ : НТУ, 2011. — 256 с.
23. Корець М. С. Основи розрахунку та конструювання деталей машин : навч. посіб. / М. С. Корець, А. М. Тарасенко. — Київ : Центр учбової літератури, 2017. — 312 с.

24. НПАОП 0.00-1.71-13. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями. — Затверджено наказом Міністерства енергетики та вугільної галузі України від 19.12.2013 № 966.
25. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. — Затверджено наказом Держнаглядохоронпраці від 09.01.1998 № 4.
26. Опір матеріалів : підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський ; за ред. Г. С. Писаренка. — 2-ге вид., допов. і переробл. — Київ : Вища школа, 2004. — 655 с.
27. Павліще В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин : підручник / В. Т. Павліще. — Львів : Афіша, 2008. — 560 с.
28. Про пожежну безпеку : Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>.
29. Сахно В. П. Автомобілі: конструкція, теорія і розрахунок : підручник / В. П. Сахно, Г. Б. Безбородова, М. М. Маяк. — Київ : Арістей, 2006. — 808 с.
30. Смирнов В. О. Фізико-хімічні основи створення нових матеріалів : навч. посіб. / В. О. Смирнов. — Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — 188 с.
31. Яцківський В. В. Охорона праці в галузі : навч. посіб. / В. В. Яцківський, Д. В. Зеркалов. — Київ : Основа, 2007. — 344 с.
32. Ashby M. F. Materials Selection in Mechanical Design / M. F. Ashby. — 4th ed. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2011. — 646 p.
33. ASM Handbook. Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. — Materials Park : ASM International, 1990. — 1328 p.
34. Bathe K.-J. Finite Element Procedures / K.-J. Bathe. — 2nd ed. — Watertown : Klaus-Jurgen Bathe, 2014. — 1065 p.
35. Blundell M. The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics / M. Blundell, D. Harty. — Oxford : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. — 507 p.

36. Dixon J. C. Suspension Analysis and Computational Geometry / J. C. Dixon. — Chichester : John Wiley & Sons, 2009. — 496 p.
37. Dixon J. C. Tires, Suspension and Handling / J. C. Dixon. — 2nd ed. — Warrendale : SAE International, 1996. — 636 p.
38. EN 485-2:2016. Aluminium and aluminium alloys. Sheet, strip and plate. Part 2: Mechanical properties. — Brussels : CEN, 2016. — 26 p.
39. Formula Student Rules 2024 [Электронный ресурс] / Formula Student Germany. — Режим доступа: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>.
40. Genta G. Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation / G. Genta. — Singapore : World Scientific Publishing, 1997. — 552 p.
41. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics / T. D. Gillespie. — Warrendale : Society of Automotive Engineers Inc, 1992. — 495 p.
42. HELICOIL® Thread inserts – Technical Data [Электронный ресурс]. — Böllhoff Group. — Режим доступа: <https://www.boellhoff.com>.
43. Lee H.-H. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2020 / H.-H. Lee. — Mission : SDC Publications, 2020. — 602 p.
44. Milliken W. F. Race Car Vehicle Dynamics / W. F. Milliken, D. L. Milliken. — Warrendale : SAE International, 1995. — 890 p.
45. MSC Adams Car User Guide [Электронный ресурс]. — Newport Beach : MSC Software Corporation, 2021. — Режим доступа: <https://www.mscsoftware.com>.
46. Pacejka H. B. Tire and Vehicle Dynamics / H. B. Pacejka. — 3rd ed. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2012. — 672 p.
47. Puhn F. How to Make Your Car Handle / F. Puhn. — New York : HP Books, 1981. — 208 p.
48. Ridin T. PTC Creo Parametric 3.0 for Designers / T. Ridin. — Cadcim Technologies, 2015. — 800 p.
49. Rolling bearings : SKF General Catalogue / SKF Group. — Gothenburg, 2018. — 1144 p.

50. Shigley J. E. Shigley's Mechanical Engineering Design / J. E. Shigley, R. G. Budynas, J. K. Nisbett. — 10th ed. — New York : McGraw-Hill Education, 2015. — 1104 p.
51. Smith C. Tune to Win / C. Smith. — Fallbrook : Aero Publishers, 1978. — 173 p.
52. Staniforth A. Competition Car Suspension: A Practical Handbook / A. Staniforth. — 4th ed. — Sparkford : Haynes Publishing, 2006. — 272 p.
53. Thevenot F. Composite Materials: Properties, Characterisation, and Applications / F. Thevenot. — Paris : Elsevier, 2012. — 320 p.
54. Zienkiewicz O. C. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu. — 7th ed. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2013. — 752 p.