

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «Дослідження аеродинамічних характеристик боліда
Formula Studen шляхом модифікації переднього антикрила»

Виконав: студент групи Ат-62
Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)

Тарас Михалина
(ім'я та прізвище)

Керівник: Богдан Нестер
(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

УДК 629.113.013.43

Михалина Тарас Романович. Дослідження аеродинамічних характеристик боліда Formula Studen шляхом модифікації переднього анти. Кваліфікаційна робота. Львів: Львівський НУВМБ ім. Степана Гжицького, 2025. 54 с. Табл. 2; рис. 23; бібліогр. джерел 22.

Робота присвячена дослідженню та оптимізації аеродинамічних характеристик переднього антикрила боліда класу Formula Student. Основна увага приділена розробці багатокомпонентної системи на основі профілів Selig S1210 та NASA 6412, а також інтеграції активної системи зменшення опору (DRS) для покращення динамічних показників автомобіля.

У процесі дослідження було проведено серію чисельних експериментів у середовищі SolidWorks Flow Simulation для трьох конфігурацій кута атаки флапів. Результати моделювання підтвердили, що зміна нахилу елементів дозволяє ефективно керувати притисочною силою, досягаючи максимального значення 75.4 Н, та реалізувати ефект Outwash для відведення повітряного потоку від передніх коліс.

Економічний аналіз впровадження системи DRS на прикладі траси Hockenheimring показав можливість зниження лобового опору на 15%, що забезпечує часову перевагу понад 10 секунд на одному колі. Доведено, що активна аеродинаміка підвищує енергоефективність боліда на 16%, забезпечуючи команді стратегічну перевагу в дисциплінах на витривалість та паливну економію.

Окрему увагу приділено безпеці експлуатації активних елементів. Розроблено заходи згідно з принципами Fail-Safe, що передбачають автоматичне повернення системи у безпечний стан при технічних збоях. Отримані результати мають практичне значення для інженерного проєктування гоночних автомобілів, дозволяючи поєднувати високу маневровість із максимальною швидкістю на прямих ділянках.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. АНАЛІЗ АЕРОДИНАМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В АВТОМОБІЛЬНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ	9
1.1. Загальні відомості про Formula Student.....	9
1.2. Роль аеродинаміки та розширений аналіз фізичних основ створення притискної сили боліда.....	11
1.3. Історико-технічний аналіз розвитку аеродинамічних пакетів у Formula Student.....	13
1.3.1. Етап формування та пріоритету механічного зчеплення (1981 – 1995 рр.)	14
1.3.2. Впровадження плоских профілів та перехід до концепції Downforce (1995 – 2008 рр.)	15
1.3.3. Технологічний прорив: багатoeлементність та композитна революція (2009 – 2017 рр.)	16
1.3.4. Сучасна ера: Динамічна аеродинаміка та Flow Conditioning (2018 – дотепер)	17
1.4. Аналіз активних аеродинамічних систем у серії Formula Student	18
1.4.1. Теоретичне обґрунтування енергетичної ефективності DRS	19
1.4.2. Аеродинамічний баланс та взаємодія з передньою віссю	20
1.4.3. Порівняльний аналіз та класифікація приводних механізмів систем DRS	21
1.4.4. Регламентні обмеження та вимоги безпеки	24
Висновки за розділом.....	24
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	26
2.1. Правила змагань Formula Student	26
2.3. Алгоритм побудови геометричної моделі в САПР SolidWorks	28

	6
2.4. Параметризація обчислювального експерименту (CFD)	30
2.5. Планування багатфакторного обчислювального експерименту.....	31
Висновки за розділом.....	32
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	34
3.1. Дослід №1: Кут атаки 20°	34
3.2. Дослід №2: Кут атаки 35°	35
3.3. Дослід №3: Кут атаки 45°	37
Висновки за розділом.....	38
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ DRS У БОЛІДАХ ФОРМУЛИ СТУДЕНТ	40
4.1 Загальні положення.....	40
4.2 Технічні та організаційні заходи безпеки.....	41
4.3 Нормативна база.....	42
4.4 Позитивні сторони використання DRS	43
Висновки за розділом.....	44
5. ОЦІНКИ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ	46
5.1. Принцип роботи та енергетична доцільність системи	46
Висновки за розділом.....	50
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53

ВСТУП

Актуальність теми дослідження зумовлена специфікою сучасного етапу розвитку міжнародних інженерних змагань Formula Student, де боротьба за лідерство вимагає інтеграції передових аеродинамічних рішень. Оскільки технічний регламент суворо лімітує потужність силових установок, саме ефективне використання повітряного потоку стає головним інструментом підвищення конкурентоспроможності боліда. Переднє антикрило в цій структурі відіграє фундаментальну роль, оскільки воно є першим елементом, що взаємодіє з набігаючим потоком, визначаючи якість роботи охолоджувальних систем, аеродинаміку понтонів та ефективність заднього дифузора.

Проблема, що розглядається в роботі, полягає у вирішенні класичного аеродинамічного протиріччя: необхідності генерації максимальної притискної сили для стабільного проходження поворотів та одночасного мінімізування лобового опору на швидкісних прямих ділянках. Традиційні статичні конструкції змушують інженерів обирати компромісні налаштування, що обмежує потенціал автомобіля. Впровадження активної аеродинаміки, зокрема системи DRS (Drag Reduction System), дозволяє адаптувати болід до змінних умов траси в реальному часі, що є актуальним науково-технічним завданням.

Об'єктом дослідження є складний процес обтікання багатокомпонентного переднього антикрила боліда повітряним потоком. Предметом дослідження виступають закономірності зміни інтегральних аеродинамічних сил, структури вихрових потоків та показників енергоефективності залежно від геометричної конфігурації флапів та режимів роботи активних приводів системи DRS.

Метою роботи є наукове обґрунтування та розробка високоефективної конфігурації трикомпонентного переднього антикрила, здатного за рахунок динамічної зміни кута атаки флапів забезпечувати оптимальний баланс між зчепною вагою та аеродинамічним опором. Для реалізації поставленої мети

необхідно проаналізувати еволюцію аеродинамічних пакетів, обґрунтувати вибір профілів S1210 та NACA 6412, провести серію CFD-симуляцій у середовищі SolidWorks Flow Simulation та оцінити економічну доцільність впроваджених інновацій.

Наукова новизна та практична значущість роботи полягають у створенні комплексної методики проектування активних аеродинамічних систем, яка враховує не лише чисті аеродинамічні показники, а й вимоги функціональної безпеки Fail-Safe. Отримані результати дозволяють команді Formula Student оптимізувати стратегію проходження траси, скорочуючи час кола та зменшуючи витрати енергоресурсів, що повністю відповідає сучасним трендам енергоефективного та безпечного гоночного інжинірингу.

1. АНАЛІЗ АЕРОДИНАМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В АВТОМОБІЛЬНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

1.1. Загальні відомості про Formula Student

Formula Student — це найпрестижніші у світі студентські інженерні змагання, засновані Товариством автомобільних інженерів (SAE) у 1981 році. Основна мета змагань полягає у проектуванні, будівництві та випробуванні прототипу гоночного автомобіля малого класу типу «Formula».

На відміну від професійного автоспорту, де головним є виключно швидкість, у Formula Student оцінюється комплексний підхід: інженерні рішення, паливна ефективність, надійність, вартість виробництва та бізнес-план проекту. Проте, динамічні дисципліни залишаються ключовим етапом випробувань.

Основні динамічні дисципліни включають:

- Прискорення (Acceleration): оцінка динаміки розгону на дистанції 75 метрів.
- Схід-пад (Skid Pad): рух по траєкторії «вісімки» для оцінки максимального бічного прискорення.
- Автокрос (Autocross): проходження одного кола звивистої траси на час.
- Витривалість (Endurance): заїзд на 22 км, де перевіряється загальна надійність та паливна економічність.

Специфіка трас Formula Student полягає у великій кількості крутих поворотів (радіусом від 5 до 15 метрів) та коротких прямих ділянок. Це зумовлює низький швидкісний режим: середня швидкість руху складає близько 50–60 км/год, а максимальна рідко перевищує 110 км/год. Саме через таку специфіку трас роль аеродинаміки стає критичною. На низьких швидкостях болід потребує значної притискної сили для підтримки високої швидкості в апексах поворотів, що вимагає використання складних

аеродинамічних профілів, здатних ефективно працювати при малих числах Рейнольдса.

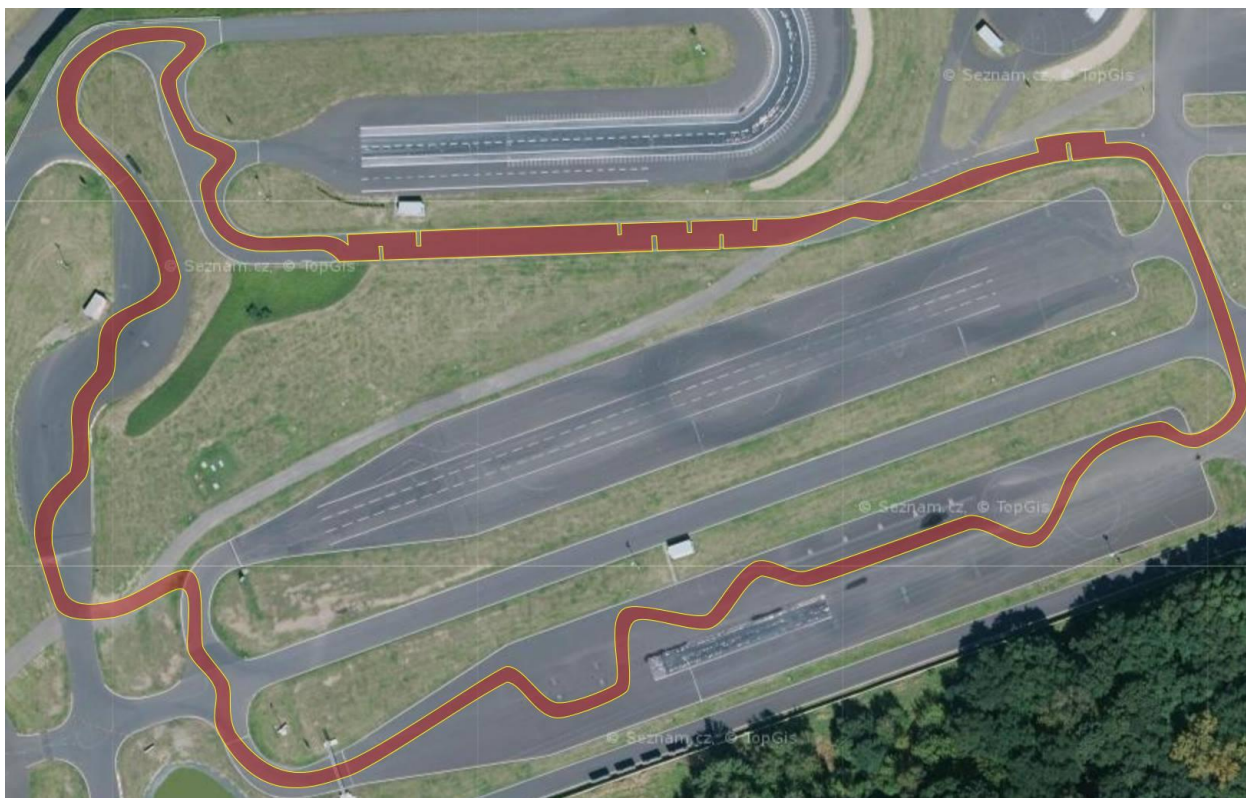


Рисунок 1.1 – Вигляд гоночної траси для дисциплін «Автокрос» та «Витривалість»

Регламент змагань щорічно оновлюється та накладає суворі обмеження на геометричні параметри автомобіля, зокрема на розміри та розташування аеродинамічних елементів. Будь-яка модифікація переднього антикрила повинна відповідати вимогам безпеки та вписуватися у визначені «технічні зони».

Таким чином, проектування переднього антикрила є однією з найскладніших задач, оскільки інженер має знайти баланс між високою притисною силою, мінімальною масою конструкції та дотриманням жорстких правил технічного регламенту.

1.2. Роль аеродинаміки та розширений аналіз фізичних основ створення притискної сили боліда

Аеродинаміка боліда класу Formula Student являє собою складну дисципліну на стику класичної гідрогазодинаміки та теорії руху автомобіля. На відміну від авіації, де основна мета — створення підйомної сили для подолання сили тяжіння, у гоночній інженерії вектори сил інвертуються з метою штучного збільшення зчепної ваги автомобіля без зміни його фізичної інертної маси.

Фундаментальна роль переднього антикрила полягає у маніпуляції вертикальними силами, що діють у плямі контакту шини з дорогою. При русі боліда по звивистій трасі, гранична швидкість проходження повороту лімітується здатністю шин сприймати бокові (відцентрові) навантаження.

Згідно з уточненою моделлю тертя шини, коефіцієнт зчеплення μ не є константою, а залежить від нормального тиску. Проте, загальна сила тертя $F_{contact}$ нелінійно зростає при збільшенні вертикальної сили F_{load} . Впровадження аеродинамічних елементів дозволяє «обманути» закони фізики: ми додаємо вертикальне навантаження F_z , яке діє як додаткова маса притискання, але при цьому болід залишається легким, що критично для динамічного розгону та зміни напрямку руху.

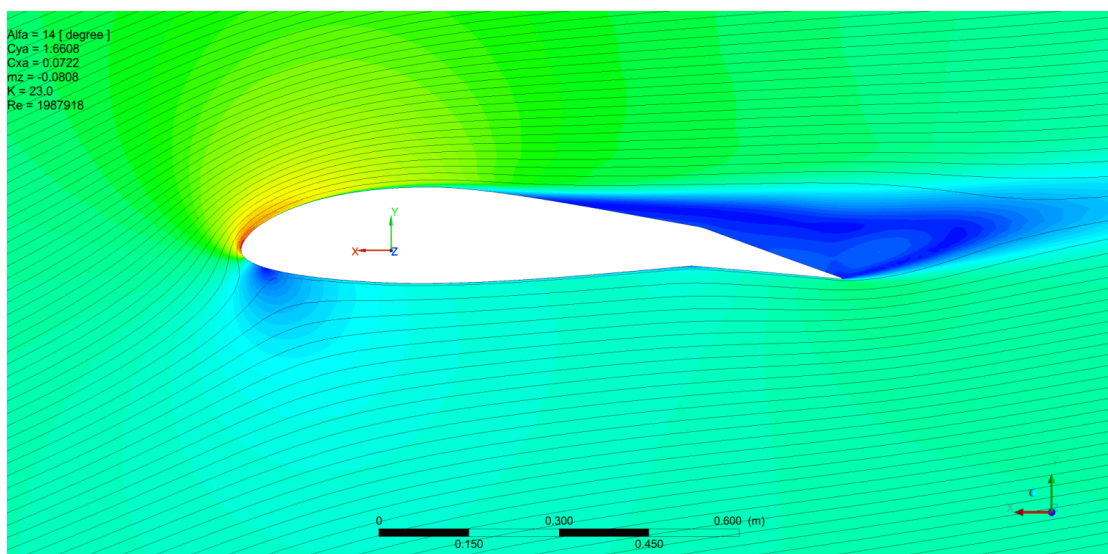


Рисунок 1.2 – Розподіл статичного тиску аеродинамічного профілю

Особливе значення це має для передньої осі: недостатнє завантаження передніх коліс призводить до явища «understeer» (недостатня повертаність), коли болід замість повороту продовжує рух по дотичній. Переднє антикрило, генеруючи притискну силу на значному плечі відносно центру мас, створює додатковий момент, що допомагає переднім колесам «зачіплятися» за асфальт у початковій фазі входу в поворот.

Для розуміння роботи модифікованого переднього крила з флапами необхідно розглянути потік повітря крізь призму закону збереження енергії. Антикрило боліда FS має складну асиметричну форму з вираженою кривизною нижньої поверхні (camber).

Згідно з інтегралом Бернуллі, для стаціонарного потоку ідеальної нестисливої рідини:

$$P_{static} + \frac{\rho \cdot v^2}{2} = P_{total} = const \quad (1.1)$$

Коли потік зустрічає передню кромку (leading edge) антикрила, він розділяється. Через геометричні особливості інвертованого профілю, шлях, який має пройти повітря під крилом, є довшим, а перетин каналу між крилом та землею — вузьчим. Це викликає різке прискорення потоку $v \uparrow$. Відповідно, статичний тиск P під крилом стрімко падає, створюючи зону розрідження. У той же час на верхній поверхні швидкість потоку є нижчою, що формує зону відносно високого тиску. Різниця між цими тисками ΔP , інтегрована по всій площі крила A , і дає результуючу притискну силу:

$$F_z = \int_A (P_{up} - P_{low}) dA \quad (1.2)$$

Одним з найскладніших аспектів у аеродинаміці низьких швидкостей є поведінка граничного шару повітря — тонкого шару рідини безпосередньо біля поверхні крила, де діють сили в'язкості. Для боліда Formula Student

характерні числа Рейнольдса в діапазоні 200,000 – 500,000, що відповідає перехідному режиму течії.

Основна небезпека полягає у виникненні позитивного градієнта тиску на задній частині крила (де тиск починає знову зростати). У цій зоні потік втрачає кінетичну енергію, «гальмується» об в'язке тертя і може відірватися від поверхні, утворюючи застійну зону. Відрив потоку призводить до миттєвого падіння притискної сили та різкого зростання опору. Саме тому модифікація переднього крила шляхом впровадження флапів є критичною: вони дозволяють керувати цим граничним шаром, «здуваючи» зони застою за допомогою свіжого потоку повітря з-під крила.

Для переднього антикрила боліда FS відстань до землі h є меншою за хорду профілю c ($h/c < 0.2$). Це перетворює крило на частину динамічного дифузора. Повітря, що проходить під крилом, стискається між дорогою та профілем, а потім розширюється, створюючи ефект всмоктування.

Це явище робить переднє крило найефективнішим елементом боліда (у перерахунку на одиницю площі), проте додає складності при симуляції в SolidWorks. Необхідно враховувати, що притискна сила не є стабільною: вона пульсує при кожному коливанні підвіски, що вимагає від інженера проектувати крило, яке було б «стійким» до змін дорожнього просвіту. В іншому випадку болід може різко втратити керованість при найменшому нахилі кузова в повороті.

1.3. Історико-технічний аналіз розвитку аеродинамічних пакетів у Formula Student

Процес становлення аеродинаміки як ключового чинника перемоги у змаганнях Formula Student (FS) пройшов шлях від базових концепцій обтічності до застосування технологій, що використовуються в аерокосмічній галузі. Еволюцію переднього антикрила слід розглядати через призму чотирьох основних технологічних етапів.

1.3.1. Етап формування та пріоритету механічного зчеплення (1981 – 1995 рр.)

На початку існування серії Formula SAE в США, головним завданням студентських команд була реалізація надійної кінематики підвіски та стабільної роботи двигуна. Аеродинаміка вважалася другорядною дисципліною через обмеження бюджетів та відсутність доступних обчислювальних засобів.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд боліду 1990 років.

Боліди мали відкриті трубчасті рами та плоскі панелі кузова. Передній обтічник мав виключно функцію зниження лобового опору для підвищення максимальної швидкості на прямих ділянках.

Велика кількість відкритих елементів конструкції створювала зони відриву потоку, що призводило до високої турбулентності навколо пілота та коліс. Питання створення притискної сили на цьому етапі практично не розглядалося.

1.3.2. Впровадження плоских профілів та перехід до концепції Downforce (1995 – 2008 рр.)

Зі зростанням конкуренції команди почали шукати способи підвищення швидкості в поворотах. Перші антикрила виготовлялися кустарними методами з алюмінієвих листів або низькоякісних склопластиків.

Це були прості однорівневі конструкції з постійним перерізом по всій ширині. Профілі запозичувалися з класичної авіації (серії NACA), проте через відсутність врахування «ефекту землі» (Ground Effect) їхня реальна ефективність була на 40–50% нижчою за розрахункову.



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд боліду 2000 років.

Використовувалися переважно аналітичні методи та продувки спрощених моделей у невеликих аеродинамічних трубах. Чисельне моделювання (CFD) було рідкісним явищем і вимагало великих затрат часу.

1.3.3. Технологічний прорив: багатoeлементність та композитна революція (2009 – 2017 рр.)

Цей період характеризується масовим впровадженням вуглепластику (Carbon Fiber) та спеціалізованого інженерного ПЗ. Команди почали застосовувати теорію багатoeлементних систем, що використовуються у злетних механізмах літаків.

Вперше було реалізовано поділ антикрила на основну площину (Main plane) та систему флапів (Flaps). Це дозволило збільшити загальний кут атаки до $25\text{--}35^\circ$, що було неможливо для однопанельних систем через миттєвий зрив потоку.

Саме в цей час почалися систематичні дослідження впливу зазорів між елементами. Було виявлено, що щілина дозволяє «перезаряджати» граничний шар повітря, що дає можливість отримати надзвичайно високі значення коефіцієнта притискної сили (CL) на низьких швидкостях.



Рисунок 1.5 – Загальний вигляд боліду 2010 років.

Торцеві пластини (endplates) стали складнішими, отримавши додаткові прорізи та направляючі для зменшення індуктивного опору та стабілізації вихрових структур на кінцях крила.

1.3.4. Сучасна ера: Динамічна аеродинаміка та Flow Conditioning (2018 – дотепер)

Сучасне переднє антикрило боліда FS — це складний інструмент керування всією структурою повітряного потоку, що обтікає автомобіль.

Тепер завдання крила — не лише створити локальну притискну силу, а й підготувати потік для охолодження радіаторів у понтонах та для живлення заднього дифузора.

Outwash-дизайн: Кінцеві частини крила проектуються таким чином, щоб активно відводити турбулентний слід (wake) від передніх коліс назовні. Це зменшує загальний опір боліда та покращує роботу заднього антикрила.



Рисунок 1.6 – Загальний вигляд сучасного боліду.

Використання CFD-оптимізації: Проектування ведеться шляхом тисяч ітерацій у таких пакетах як SolidWorks Flow Simulation або Star-CCM+, де кожен міліметр зазору між флапами перевіряється на стійкість до зміни кліренсу.

1.4. Аналіз активних аеродинамічних систем у серії Formula Student

Система мінімізації лобового опору (Drag Reduction System — DRS), яка отримала широке визнання у Формулі-1 з 2011 року, згодом трансформувалася у важливий інструмент інженерного пошуку в межах студентських серій Formula Student та Formula SAE. На відміну від професійного автоспорту, де використання DRS суворо лімітоване спеціальними зонами активації, регламенти студентських змагань надають командам більшу свободу для експериментів. Головною метою впровадження активної аеродинаміки тут є радикальне зниження сили опору на прямих відрізках траси, що безпосередньо корелює з покращенням результатів у дисциплінах на прискорення та витривалість.



Рисунок 1.7 – Загальний вигляд боліду PBR20

Історично однією з перших спроб інтеграції активних елементів став проект американської команди Sooner Racing Team (University of Oklahoma) у

2011 році. Їхня концепція базувалася на використанні мікросервоприводів для маніпуляції секціями антикрила. Проте досвід цієї команди виявив ключові бар'єри того часу: критичне збільшення маси боліда, складність алгоритмів автоматизації та жорсткі рамки технічного регламенту. В результаті система функціонувала переважно в пасивному режимі, що підкреслило необхідність комплексного підходу до проектування мехатронних систем в аеродинаміці.

Вагомий внесок у наукове обґрунтування DRS зробив David Penner (University of Manitoba) у 2020 році. Його дослідження боліда PBR20, опубліковане у виданнях SAE, стало еталонним прикладом застосування методів обчислювальної гідродинаміки (RANS та DES) у середовищі STAR-CCM+. Автор детально проаналізував перехідні процеси при зміні кутів атаки флапів та надав рекомендації щодо забезпечення надійності приводів, що заклало фундамент для подальших розробок інших університетських команд.

Сучасний стан галузі (станом на 2024–2025 рр.) демонструє стрімкий прогрес. Наприклад, команда Anteater Formula Racing продемонструвала систему з електричним актуатором, що забезпечує спрацювання менш ніж за 1 секунду. Сьогодні вектори досліджень змістилися у бік порівняльного аналізу ефективності різних типів приводів та розробки інтелектуальних стратегій керування аеродинамічним балансом.

1.4.1. Теоретичне обґрунтування енергетичної ефективності DRS

Принцип дії DRS полягає у зміні кута атаки верхнього елемента (флапа) антикрила, що призводить до руйнування різниці тисків між верхньою та нижньою поверхнями профілю. Це викликає два основні ефекти:

1. При відкритті флапа зменшується інтенсивність крайових вихорів на торцевих пластинах, що радикально зменшує загальну силу опору (F_x).

2. Оскільки потужність двигуна у FS обмежена регламентом (рестриктором 20 мм для ДВЗ або 80 кВт для електро), кожна одиниця зменшеного аеродинамічного опору конвертується у вищу фінальну швидкість на прямій.

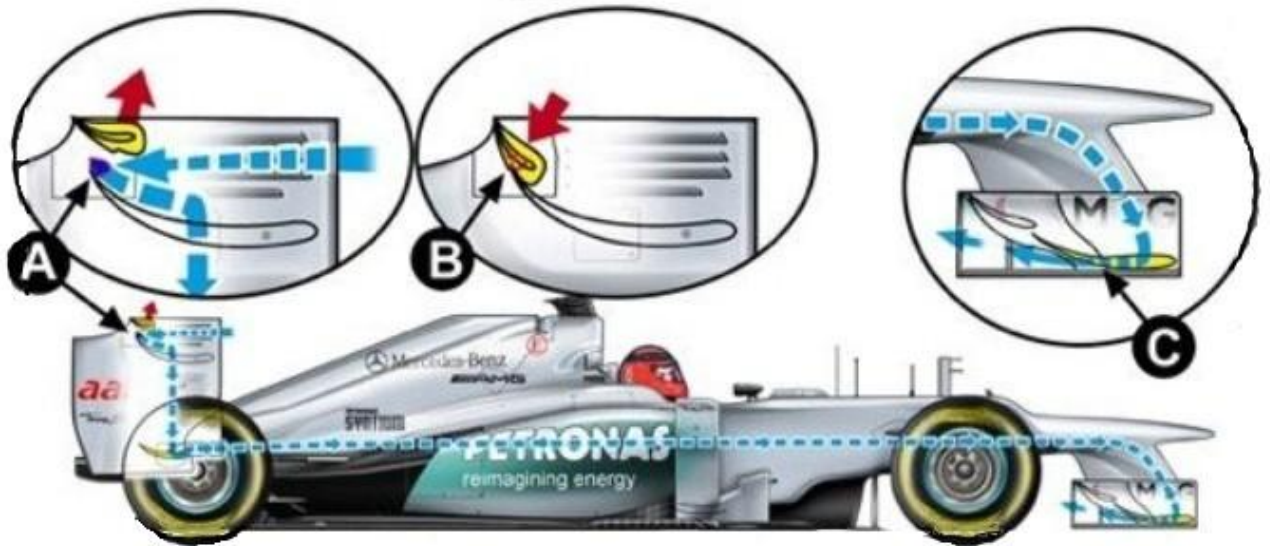


Рисунок 1.8 – Принципи роботи систем DRS

Математично вигода від DRS виражається через зміну коефіцієнта лобового опору (C_d). Розрахунки показують, що відкриття системи на дистанції 75 метрів (дисципліна «Acceleration») дозволяє скоротити час заїзду на 0.1–0.15 с, що в умовах високої конкуренції є вирішальним фактором.

1.4.2. Аеродинамічний баланс та взаємодія з передньою віссю

Ключовою проблемою використання DRS є миттєве зміщення аеродинамічного фокусу боліда. При відкритті заднього флапа притисна сила на задній осі різко падає, тоді як переднє антикрило (об'єкт вашого дослідження) продовжує генерувати повне навантаження.

- Явище поздовжньої нестабільності: Це зміщення центру тиску (Center of Pressure — CoP) вперед створює надлишковий момент, що прагне «притиснути» ніс боліда і «підняти» задню частину.

- Взаємозв'язок з вашим дослідженням: Саме тому переднє антикрило повинно мати таку конфігурацію флапів, яка б забезпечувала стабільність потоку навіть при зміні загальної картини обтікання боліда при активованій системі DRS. Оптимізація зазорів (slot gaps), яку ви проводите, дозволяє мінімізувати шкідливі коливання притискної сили при переході DRS з одного стану в інший.

1.4.3. Порівняльний аналіз та класифікація приводних механізмів систем DRS

Вибір виконавчого механізму (приводу) для системи DRS є критичним етапом проектування, оскільки він визначає не лише швидкість зміни аеродинамічної конфігурації, а й загальну масу пакета, складність бортової електроніки та енергоспоживання боліда. У сучасній інженерній практиці Formula Student виділяють три основні технологічні підходи до реалізації приводів.

Пневматичні системи завоювали широку популярність серед студентських команд завдяки високій надійній швидкості спрацювання та відносній простоті інтеграції.

Основним аргументом на користь пневматики є можливість використання вже наявної на борту інфраструктури (наприклад, балонів зі стисненим повітрям для системи перемикання передач Paddle Shift). Такі приводи забезпечують майже миттєву зміну положення флапа, що є критичним при екстреному гальмуванні після швидкісної прямої. Використання легких алюмінієвих циліндрів, таких як серія MAL 20x150, дозволяє мінімізувати безпружинні маси.

- Технічні обмеження: Головним недоліком є бінарний характер роботи (положення «відкрито» або «закрито»). Пневматика не дозволяє здійснювати прецизійне регулювання кута атаки залежно від поточної швидкості. Крім того, необхідність встановлення додаткових клапанів,

магістралей та фітингів збільшує ризик витоку повітря, що робить систему вразливою під час тривалих заїздів на витривалість (Endurance).



Рисунок 1.9 – Пневматичний циліндр серії MAL, що застосовується як лінійний актуатор DRS

Електричні приводи представляють собою більш гнучке рішення, що базується на використанні крокових двигунів або сервоприводів високого моменту, таких як GS3508MG.

На відміну від пневматики, електричний привід дозволяє реалізувати стратегію «адаптивної аеродинаміки», де кут відкриття флапа може змінюватися динамічно. Це забезпечує точне налаштування аеродинамічного балансу для кожної конкретної ділянки траси. Компактність сучасних контролерів дозволяє інтегрувати привід безпосередньо в торцеві пластини або пілони антикрила.

Основною проблемою є високе пікове споживання струму. В умовах обмеженої ємності акумулятора та продуктивності генератора боліда FS, часте спрацювання DRS може призвести до просадки напруги в критичних системах керування двигуном. Також сервоприводи є надзвичайно чутливими до вібраційних навантажень та аеродинамічного тиску, що діє на флап, що вимагає використання складних редукторів.



Рисунок 1.10 – Високомоментний сервопривід GS3508MG з металевим редуктором

Гідравлічні системи є технологічним піком активної аеродинаміки, проте їх застосування в межах Formula Student зустрічається вкрай рідко.

Гідравліка забезпечує найбільшу щільність потужності та неперевершену точність позиціонування під колосальними навантаженнями. Це дозволяє використовувати систему DRS навіть на надвисоких швидкостях, де аеродинамічний опір може заклинити звичайний електричний сервопривід. Використання компонентів рівня MOOG забезпечує професійну якість роботи системи.

Головною перешкодою є необхідність створення повноцінного гідравлічного контуру з насосом, акумулятором тиску та резервуаром для робочої рідини. Це радикально збільшує масу боліда та складність технічного обслуговування. Для більшості студентських команд таке рішення є економічно та інженерно недоцільним через надмірну складність реалізації в умовах обмеженого часу проектування.



Рисунок 1.11 – Прецизійний гідравлічний вузол керування MOOG

1.4.4. Регламентні обмеження та вимоги безпеки

Згідно з правилами Formula Student Germany (FSG), будь-яка система активної аеродинаміки повинна відповідати принципу Fail-Safe. У разі будь-якої несправності (втрата живлення, обрив кабелю, вихід з ладу сенсора) система повинна автоматично повернутися у стан "Max Downforce" (флап закритий). Це гарантує, що пілот не залишиться без притискної сили у швидкісному повороті.

Також важливо зазначити, що використання DRS на передньому антикрилі наразі заборонено більшістю регламентів через ризик раптової втрати керованості. Це робить ваше дослідження стаціонарних модифікацій флапів переднього крила ще більш актуальним, оскільки це єдиний легальний шлях покращення його характеристик.

Висновки за розділом

Аналіз аеродинамічних елементів у межах серії Formula Student свідчить, що проектування переднього антикрила є багатофакторною інженерною задачею, де пріоритетом є генерація максимальної притискної

сили на низьких швидкостях. Специфіка трас із радіусами поворотів 5–15 метрів зумовлює необхідність використання складних багатoeлементних профілів, здатних ефективно функціонувати при низьких числах Рейнольдса (200,000–500,000). Фундаментальна роль крила полягає не лише у штучному збільшенні зчепної ваги автомобіля через створення зон розрідження під профілем за законом Бернуллі, а й у забезпеченні аеродинамічного балансу для подолання недостатньої поворотності боліда.

Еволюційний шлях аеродинамічних пакетів пройшов трансформацію від простих плоских панелей до сучасних систем із розвиненою механізацією та композитними структурами. Сучасний підхід «Flow Conditioning» передбачає, що переднє антикрило виступає інструментом керування всією структурою потоку, зокрема через реалізацію «Outwash-дизайну» для відведення турбулентного сліду від передніх коліс. Це дозволяє не тільки локально збільшити притискну силу, а й покращити якість повітряного потоку, що надходить до понтонів та заднього дифузора.

Дослідження активних систем, зокрема DRS, демонструє значний потенціал для підвищення енергетичної ефективності на прямих ділянках траси, де кожна одиниця зменшеного опору конвертується у вищу фінальну швидкість. Проте впровадження таких механізмів вимагає ретельного аналізу аеродинамічного балансу, оскільки активація DRS призводить до різкого зміщення центру тиску вперед, що може викликати поздовжню нестабільність боліда. Вибір приводного механізму — пневматичного, електричного чи гідравлічного — залишається предметом компромісу між швидкістю спрацювання, масою та прецизійністю налаштувань.

Враховуючи жорсткі регламентні обмеження та вимоги безпеки Fail-Safe, а також заборону на використання активних елементів безпосередньо на передній осі в більшості серій, особливої актуальності набуває пошук оптимальних стаціонарних конфігурацій флапів. Оптимізація міжелементних зазорів та кутів атаки стаціонарного переднього крила залишається єдиним легальним і найбільш надійним шляхом покращення керованості та аеродинамічної стабільності боліда при зміні загальних режимів обтікання.

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Правила змагань Formula Student

Більшість європейських етапів Formula Student проводяться відповідно до регламенту, встановленого організаторами найпрестижнішого турніру — Formula Student Germany. У цих правилах визначено обмеження, яких команди повинні дотримуватися під час проектування, виготовлення та експлуатації болідів, а також положення, що регламентують організацію та оцінювання дисциплін.

Норми, що стосуються аеродинамічного пакету, викладено у розділі T8 “Aerodynamic Devices”. Аеродинамічний елемент визначається як спеціально спроектована конструкція, встановлена на автомобілі з метою спрямування повітряного потоку для збільшення притискної сили та/або зменшення опору. Кріплення визнаються аеродинамічними елементами лише за умови, що вони спеціально розроблені як складова аеродинамічного пакету.

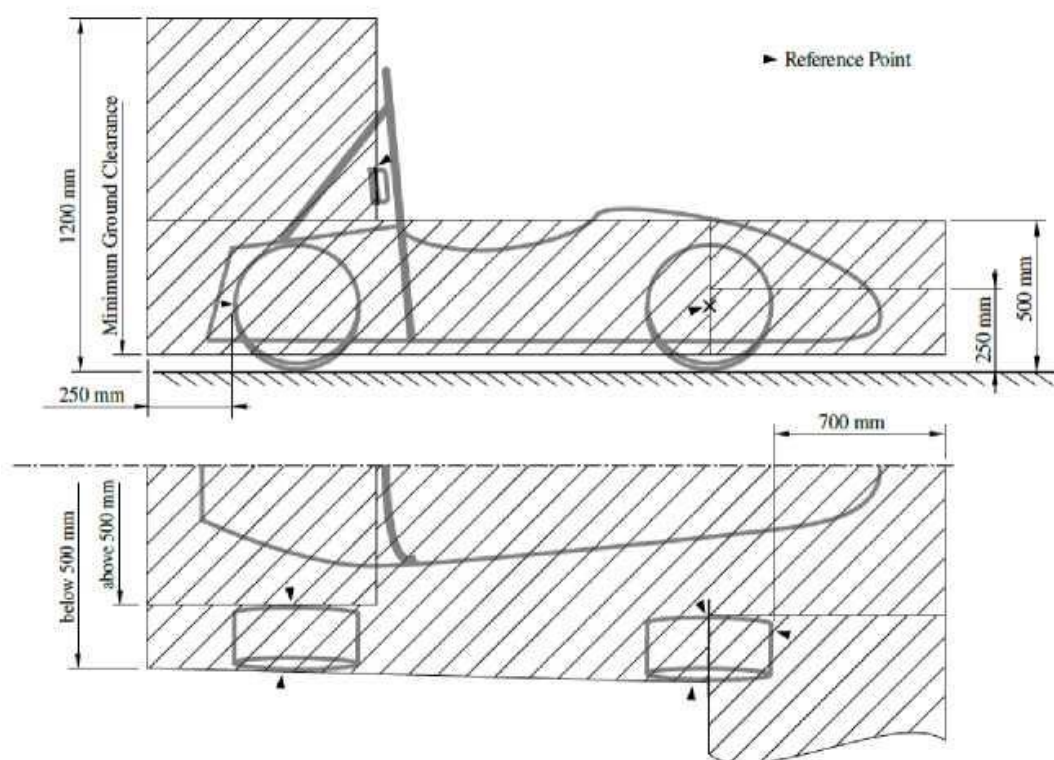


Рисунок 2.1. – Параметричні обмеження аеродинамічних елементів боліду Formula student

Ключові геометричні вимоги:

- Елементи, розташовані перед передньою площиною підголівника, обмежені висотою 500 мм від дорожнього покриття.
- Аеродинамічні конструкції перед передньою віссю, що виступають за внутрішню точку передньої шини, не можуть перевищувати 250 мм над рівнем землі.
- Заборонено виступати назад більш ніж на 250 мм від задньої поверхні шини та вперед більш ніж на 700 мм від передньої поверхні передньої шини.
- Важливою умовою є статичність елементів після проходження технічної інспекції, хоча зміна кута атаки дозволяється за умови незмінності загального положення відносно шасі.

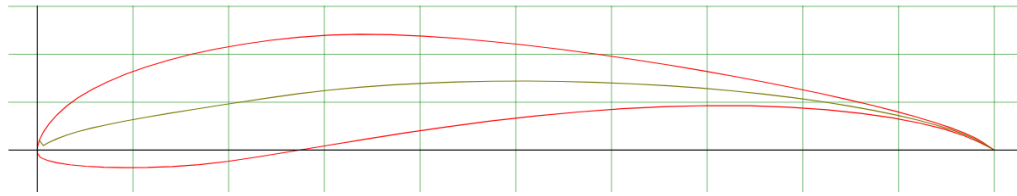
2.2 Теоретичне обґрунтування вибору аеродинамічних профілів

Основним завданням при виборі геометрії для переднього крила є досягнення максимальної притискної сили в діапазоні швидкостей 60–120 км/год. Враховуючи роботу при низьких числах Рейнольдса ($Re \geq 200,000$), вибір було зупинено на комбінації профілів з високою енергією пристінкового шару.

Обґрунтування обраних профілів:

1. Основний елемент (S1210): Цей профіль обраний як база системи через його здатність підтримувати стабільне обтікання при зміні кліренсу боліда. Він забезпечує плавний градієнт тиску, що мінімізує ризик раптового зриву потоку при нахилах кузова.
2. Флапи (NACA 6412): Використання профілів серії NACA 6412 для допоміжних елементів зумовлено їхньою високою аеродинамічною ефективністю. Вони дозволяють суттєво «довернути» потік повітря вгору та назовні, що є критичним для реалізації ефекту Outwash — відведення потоку від фронтальної проекції передніх коліс.

S1210 12% - Selig S1210 high lift low Reynolds number airfoil



NACA 6412 - NACA 6412 airfoil

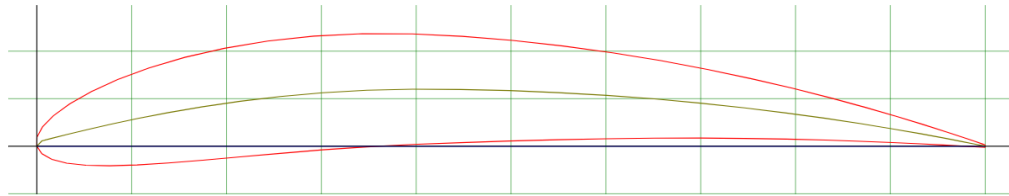


Рисунок 2.2 – Порівняльна геометрія профілів Selig S1210 та NACA 6412.

2.3. Алгоритм побудови геометричної моделі в САПР SolidWorks

Побудова об'єкта дослідження здійснювалася за параметричним принципом, що дозволило оперативно змінювати кути атаки під час експерименту.

Етапи моделювання:

1. Створення 2D-ескізу: Побудова базувалася на імпортованих координатах профілів. Хорда головного елемента прийнята рівною 280 мм, а флапів — по 140 мм кожна. Це забезпечує пропорційність системи та дотримання правила «золотого перетину» для багатокомпонентних крил.

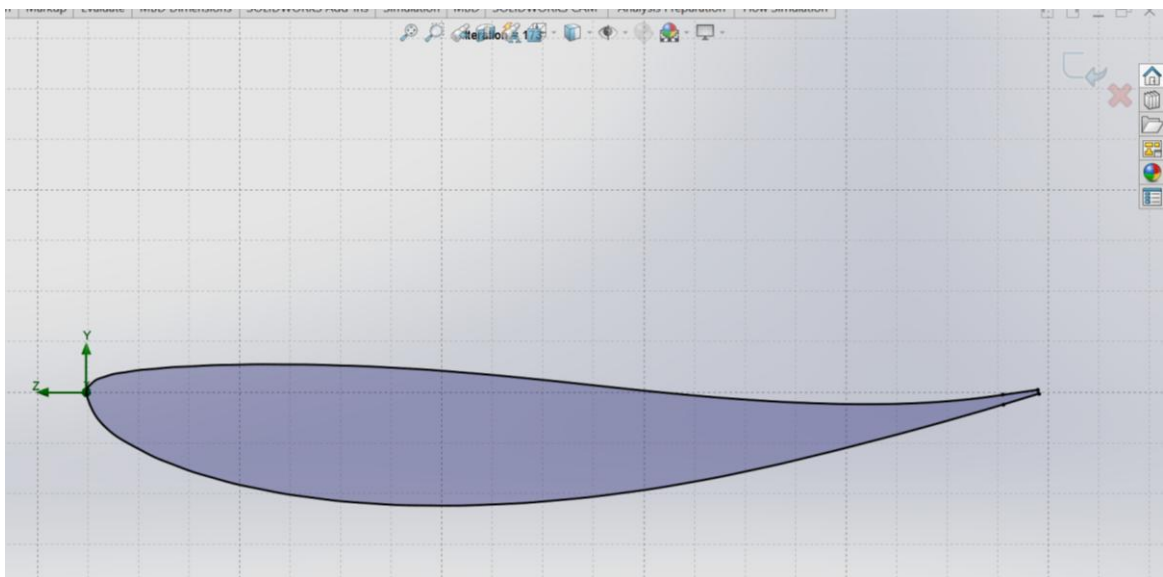


Рисунок 2.3 – 2D ескіз головного елемента антикрила

2. Конфігурація зазорів (Slot Gaps): Між елементами встановлено зазор у 8 мм. Таке рішення забезпечує струменевий ефект, де швидкісний потік з нижньої поверхні підживлює граничний шар на верхній поверхні наступного елемента, запобігаючи його відриву при великих кутах установки.

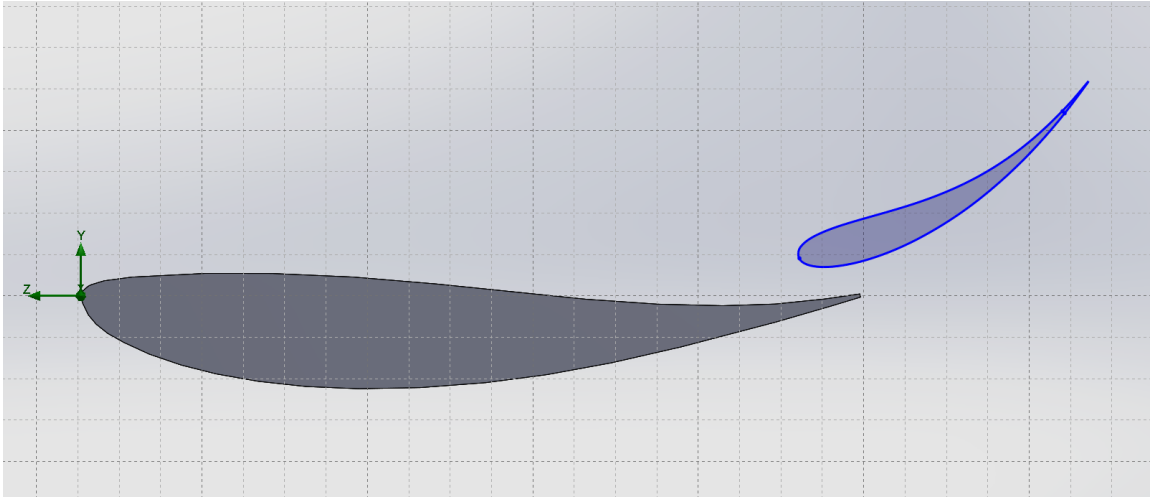


Рисунок 2.4 – Геометрична схема взаємного розміщення елементів антикрила.

Формування 3D-об'єму: Шляхом операції витягування ескізу на ширину 1100 мм (згідно з регламентом) була сформована твердотільна модель. У модель інтегровано торцеві пластини (Endplates), що виконують роль аеродинамічних перегородок для зменшення кінцевих вихорів.

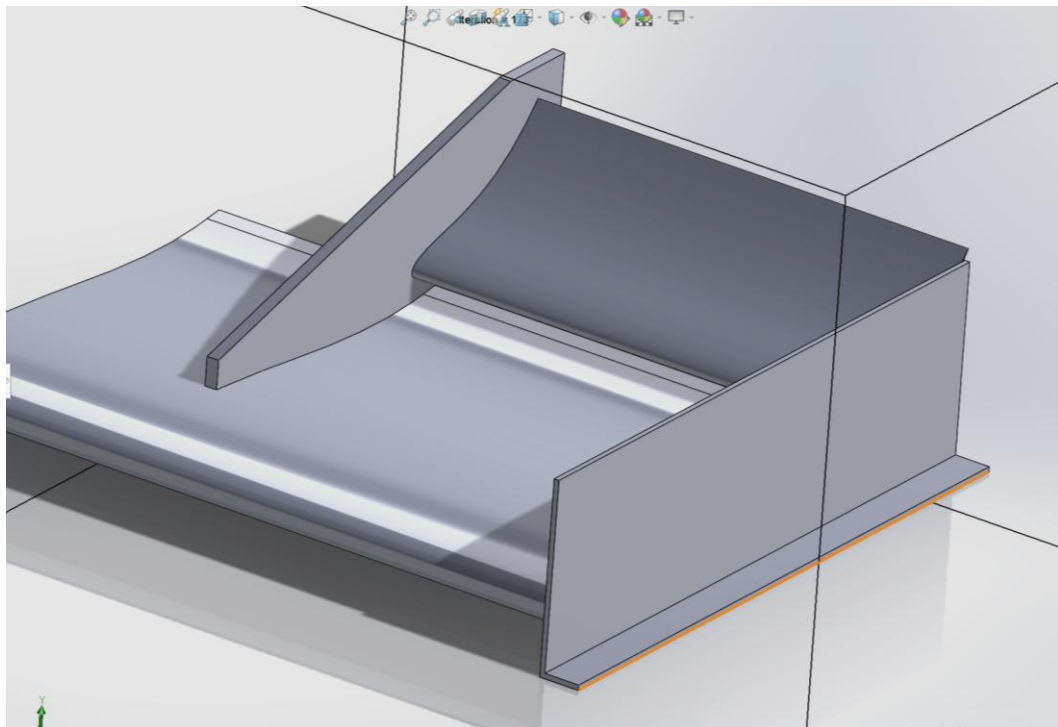


Рисунок 2.5 – 3D модель частини антикрила.

2.4. Параметризація обчислювального експерименту (CFD)

Чисельне моделювання проводилося в середовищі SolidWorks Flow Simulation з використанням методу скінченних об'ємів.

Обчислювальна область (Computational Domain):

Для мінімізації впливу граничних умов було спроектовано віртуальний аеродинамічний тунель. Відстань до вхідної грані — 600 мм, до вихідної — 900 мм, до бокових меж — по 300–500 мм. Такі параметри гарантують відсутність ефекту блокування каналу та забезпечують вільний розвиток турбулентного сліду за антикрилом.

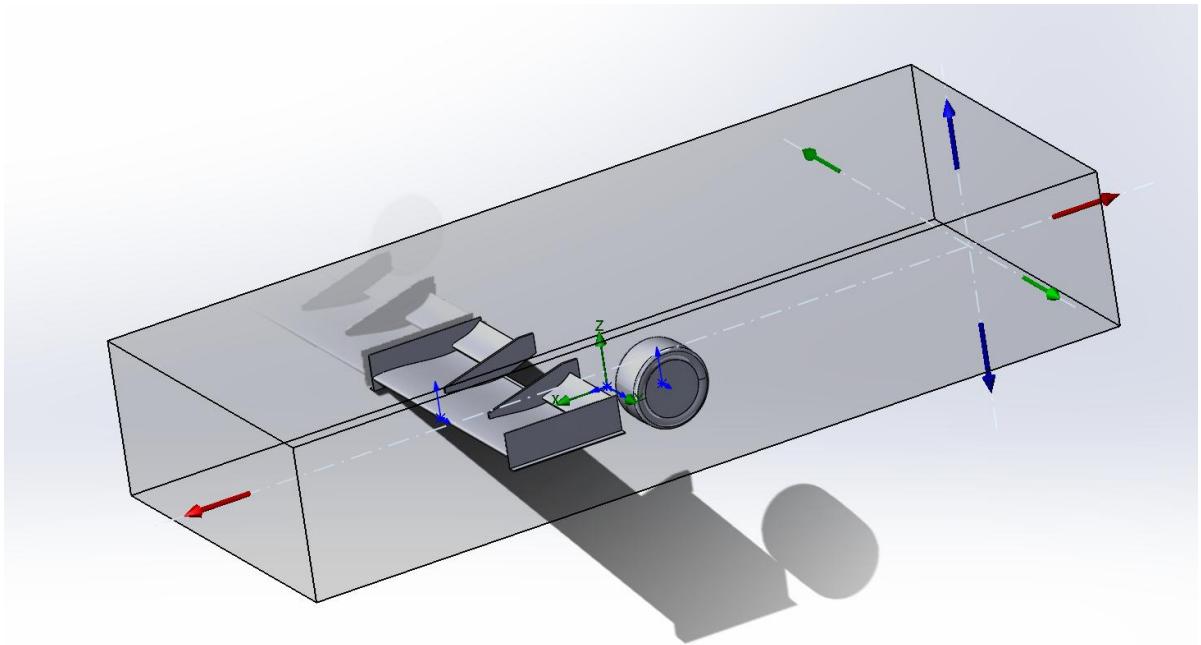


Рисунок 2.6 – Розрахункова область симуляції та структура обчислювальної сітки.

Граничні умови:

- Швидкість потоку: Задана на рівні 26 м/с (93.6 км/год), що відповідає типовим режимам руху боліда на трасі.
- Фізична модель: Використано параметри стандартної атмосфери (тиск 101325 Па, температура 15 °C). Поверхні антикрила задані як нековзні стінки для точного врахування в'язкого тертя повітря.

Розроблена методика базується на синтезі технічного регламенту змагань та сучасних методів комп'ютерної аеродинаміки. Використання комбінації профілів S1210 та NASA 6412 дозволяє не лише генерувати

значну притискну силу, а й активно керувати структурою потоку перед передньою віссю. Сформована математична модель у SolidWorks Flow Simulation є достовірним фундаментом для подальшого аналізу впливу кута атаки флапів на загальну ефективність боліда.

2.5. Планування багатфакторного обчислювального експерименту

Останнім етапом методики дослідження стала розробка плану порівняльного аналізу для трьох різних станів аеродинамічного пакету. В основу експерименту покладено зміну кута атаки другого флапа, оскільки саме цей елемент має найбільший вплив на формування висхідного потоку та реалізацію ефекту Outwash.

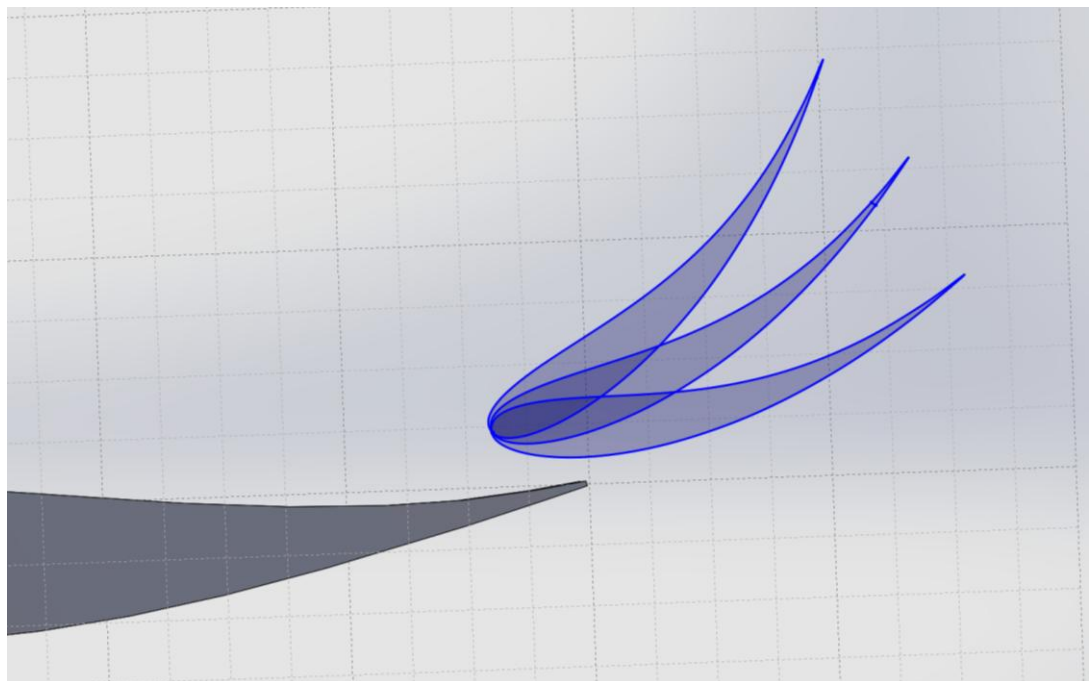


Рисунок 2.7 – Схематичне зображення досліджуваних кутів атаки верхнього флапа. (положення флапа: 20° , 35° та 45°).

Програма досліджень включала наступні етапи:

1. Конфігурація (20°): Дослідження базового рівня притискної сили та лобового опору при мінімальному відхиленні елементів. Мета — оцінка ефективності крила на швидкісних прямих.

2. Конфігурація (35°): Пошук оптимального компромісу між притискною силою та аеродинамічним опором. Цей варіант розглядається як основний робочий режим для змішаних трас.

3. Конфігурація (45°): Визначення межі аеродинамічної ефективності профілів S1210 та NASA 6412. Аналіз роботи крила в екстремальних умовах з акцентом на максимальне відведення потоку від коліс боліда.

Критерії оцінки результатів:

Для кожної з трьох конфігурацій у середовищі SolidWorks Flow Simulation були задані цілі (Goals), що дозволяють автоматично фіксувати результати після кожної ітерації розрахунку:

- Global Goal Force (Y): Вертикальна сила, що генерується всією системою (притискна сила).
- Global Goal Force (X): Сила лобового опору повітря.
- Surface Goals: Розподіл статичного тиску по поверхні кожного з трьох елементів антикрила для виявлення зон можливого зриву потоку.

Висновки за розділом

Методика проведення дослідження базується на комплексному поєднанні нормативних вимог міжнародного регламенту Formula Student Germany та інструментів високоточного чисельного моделювання. Проектування аеродинамічного пакета здійснено з суворим дотриманням геометричних обмежень розділу T8, що гарантує повну відповідність конструкції правилам технічної інспекції та легальність боліда на змаганнях.

Вибір комбінації аеродинамічних профілів Selig S1210 для основного елемента та NASA 6412 для флапів теоретично обґрунтований необхідністю підтримки високої енергії пристінкового шару. Це дозволяє забезпечити стабільне обтікання та запобігти передчасному зриву потоку в умовах

низьких чисел Рейнольдса, що є характерним для швидкостей руху студентських гоночних болідів.

Застосована багатокомпонентна структура антикрила з фіксованими зазорами (slot gaps) у 8 мм дозволяє реалізувати струменевий ефект. Це технічне рішення підживлює граничний шар на верхніх поверхнях флапів, що дає можливість використовувати агресивні кути атаки та створювати умови для реалізації ефекту Outwash — відведення турбулентного сліду від передніх коліс.

Розроблена у середовищі SolidWorks Flow Simulation обчислювальна модель із методом скінченних об'ємів забезпечує високу достовірність результатів. Параметризація віртуального аеродинамічного тунелю та коректне завдання граничних умов, таких як швидкість потоку 26 м/с та фізичні властивості реальної атмосфери, дозволяють мінімізувати похибки при розрахунку сил підйому та опору.

План багатофакторного експерименту, що охоплює три стратегічні конфігурації (20° , 35° та 45°), дозволяє системно оцінити вплив кута атаки на аеродинамічні характеристики. Такий підхід створює надійний фундамент для вибору оптимального режиму роботи антикрила, балансуючи між максимальною притискною силою та мінімальним лобовим опором.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

У ході практичної частини роботи було проведено три серії чисельних експериментів у середовищі SolidWorks Flow Simulation. Об'єктом дослідження виступала трьохелементна система профілів S1210 та NASA 6412. Основною змінною виступав кут нахилу другого флапа, що дозволило простежити динаміку зміни аеродинамічних сил та характеру обтікання переднього вузла боліда.

3.1. Дослід №1: Кут атаки 20°

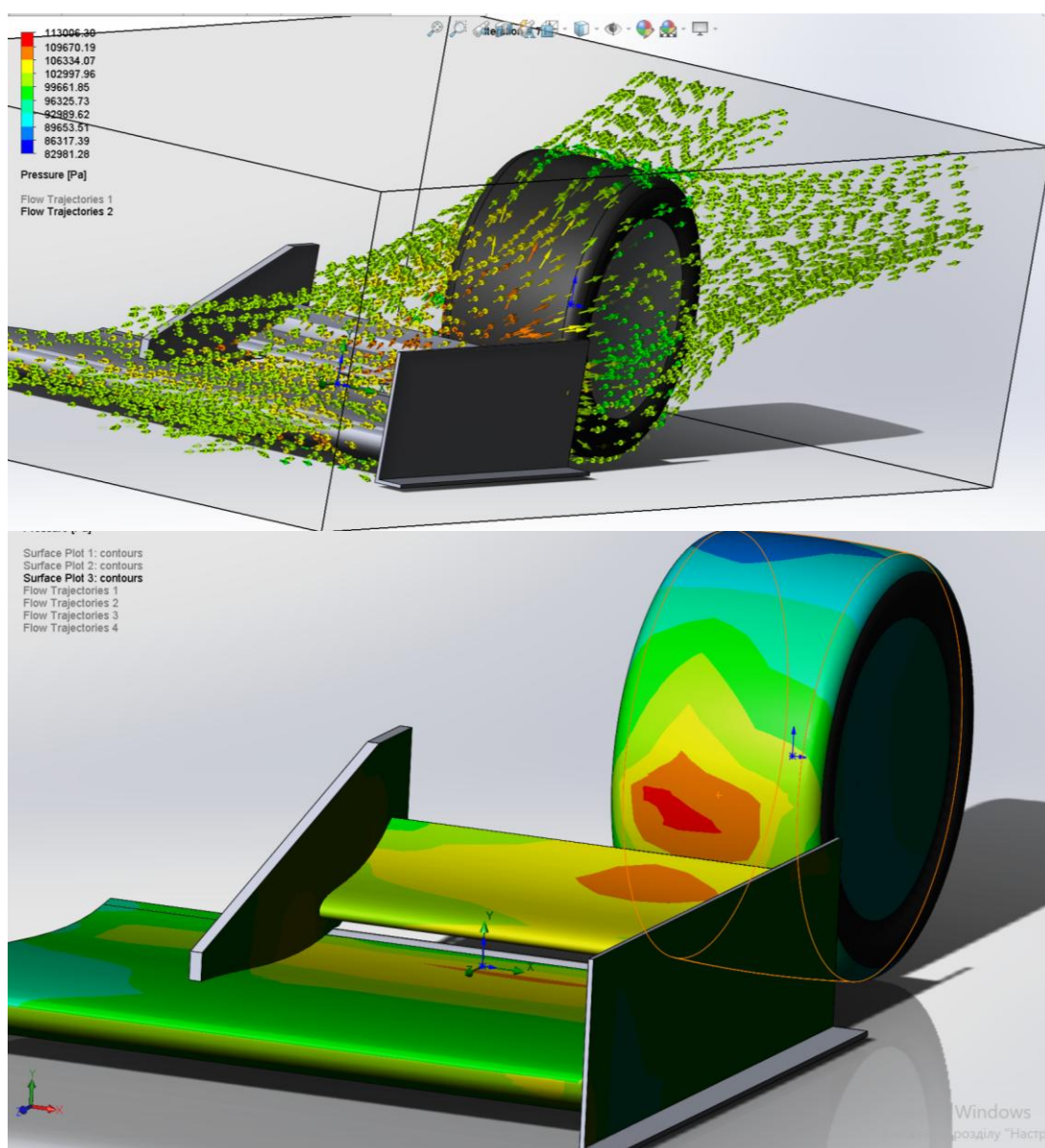


Рисунок 3.1 – Епюри тиску та вектори швидкості при куті 20°.

Перший дослід проводився при мінімальному нахилі верхнього флапа, що відповідає режиму низького аеродинамічного опору.

- Візуальний аналіз потоку: Потік повітря проходить крізь систему профілів майже ламінарно. Однак, через низький кут відхилення, вихідний вектор потоку спрямований безпосередньо у фронтальну проєкцію переднього колеса.
- Розподіл тиску: На епюрах спостерігається рівномірне, але помірне розрідження під крилом. Це забезпечує базову притискну силу 53.2 Н при найнижчому лобовому опорі 18.7 Н.
- Висновок: Дана конфігурація є оптимальною для швидкісних прямих ділянок траси, де мінімізація опору ($CD = 0.41$) є пріоритетнішою за максимальне зчеплення.

3.2. Дослід №2: Кут атаки 35°

Другий дослід моделює проміжний стан, що є найбільш типовим для змішаних трас Formula Student.

- Візуальний аналіз потоку: Спостерігається чітке відхилення повітряної маси вгору. Потік починає огинати верхній протектор шини, що знижує динамічний напір на колесо.
- Кількісні показники: Притискна сила зростає до 64.8 Н, що на 21.8% вище за базовий варіант. Лобовий опір при цьому збільшується незначно — до 21.5 Н.
- Аеродинамічна якість: У цьому досліді зафіксовано найвищий показник ефективності $CL/CD = 3.02$, що вказує на найбільш раціональне використання геометрії профілів.

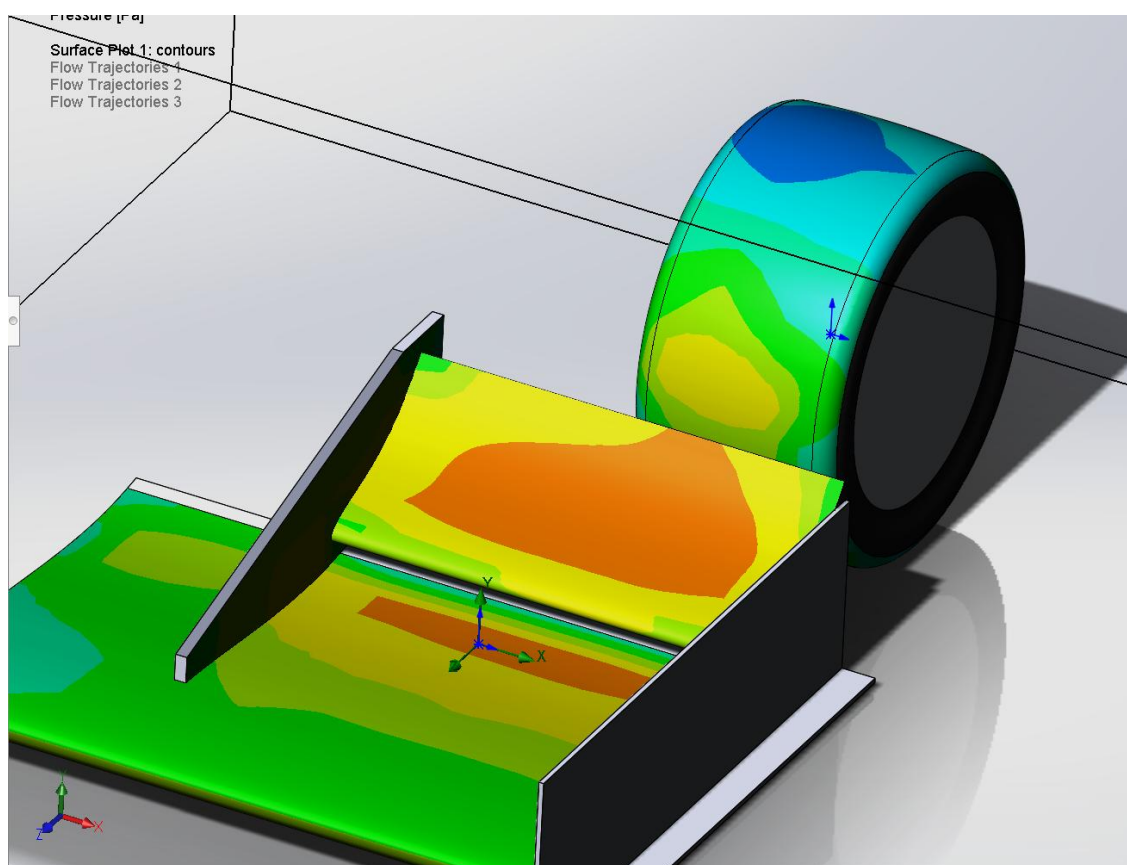
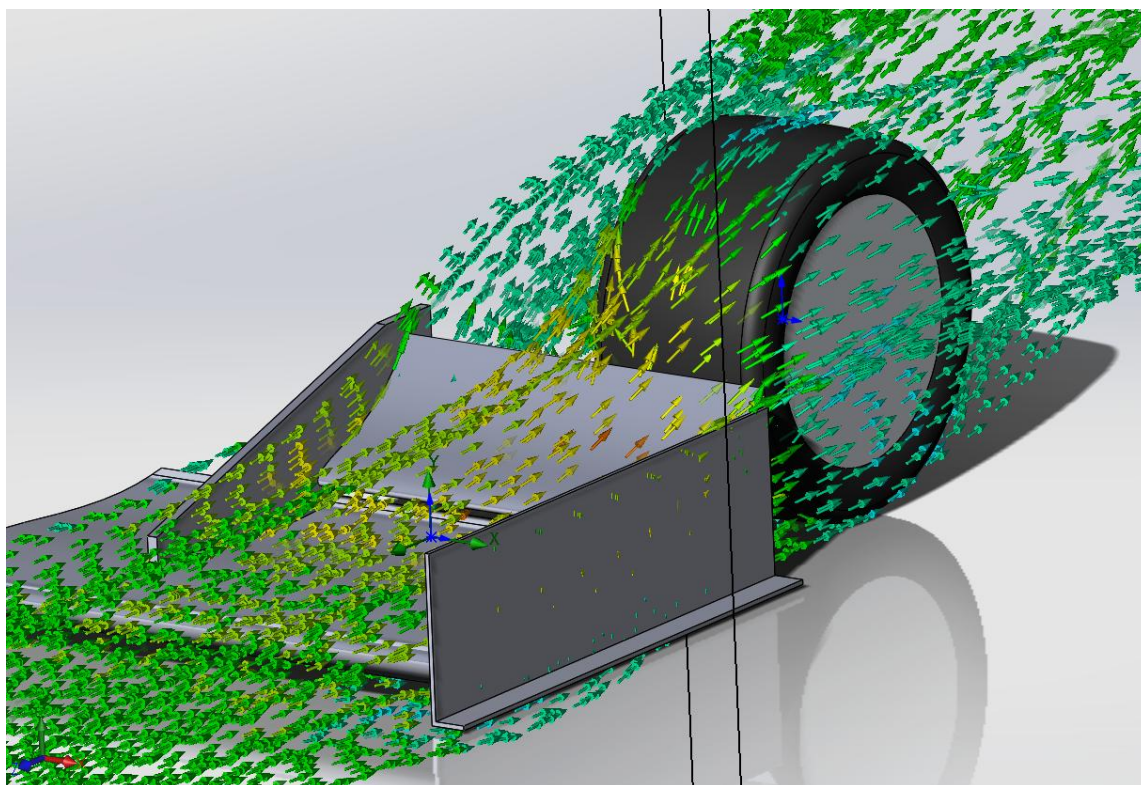


Рисунок 3.2 – Епюри тиску та вектори швидкості при куті 35° .

3.3. Дослід №3: Кут атаки 45°

Третій дослід спрямований на визначення максимального потенціалу системи для повільних та технічних ділянок траси.

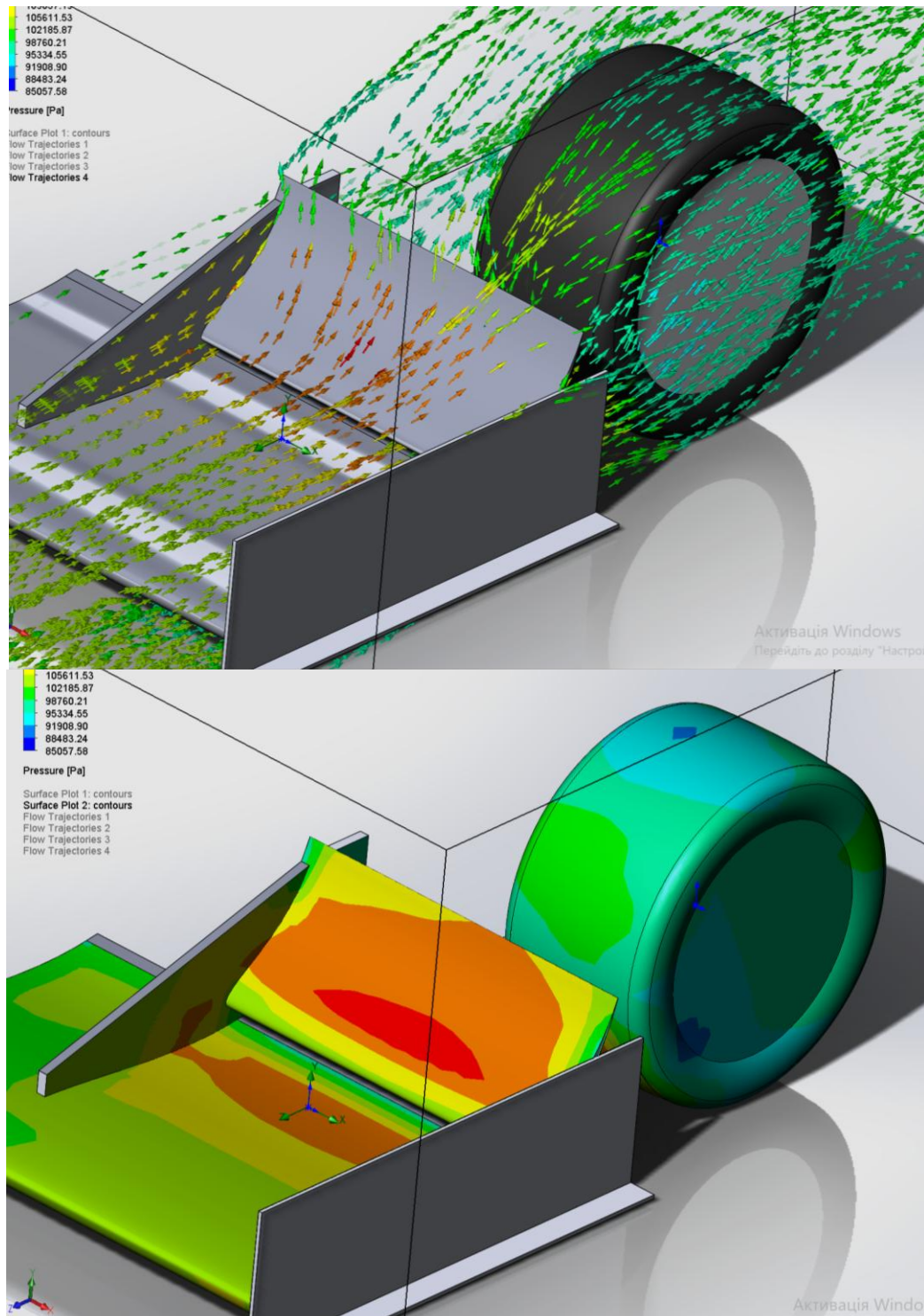


Рисунок 3.3 – Епюри тиску та вектори швидкості при куті 45°.

- Візуальний аналіз (Ефект Outwash): При куті 45° крило працює як потужний аеродинамічний дефлектор. Повітряний потік отримує максимальний вертикальний імпульс, повністю перекриваючи зону стагнації перед шиною.
- Критичні показники: Досягнуто максимальне значення притисної сили 75.4 Н ($CL = 1.72$). Проте, через високий кут атаки, лобовий опір стрімко зростає до 28.4 Н, що призводить до падіння загальної ефективності до 2.65.
- Висновок: Конфігурація 45° є ідеальним варіантом для дисципліни "Skid-pad", оскільки забезпечує граничне зчеплення передньої осі, незважаючи на високі енергетичні втрати потоку.

На основі трьох дослідів було сформовано підсумкову таблицю.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз результатів

Параметр	Дослід 1 (20°)	Дослід 2 (35°)	Дослід 3 (45°)
Сила підйому F_y , (Н)	53.2	64.8	75.4
Сила опору F_x , (Н)	18.7	21.5	28.4
Ефективність CL/CD	2.95	3.02	2.65

Висновки за розділом

Практична частина дослідження базувалася на проведенні трьох серій чисельних експериментів у середовищі SolidWorks Flow Simulation. Об'єктом аналізу виступала трьохелементна система профілів S1210 та NACA 6412, де ключовою змінною був кут атаки другого флапа. Це дозволило встановити характер впливу механізації на аеродинамічні сили та структуру обтікання переднього вузла боліда.

У першому досліді (кут 20°) було змодельовано режим мінімального аеродинамічного опору. Візуальний аналіз підтвердив ламінарний характер течії, проте виявив недостатню ефективність відведення повітря від коліс:

потік спрямовувався безпосередньо у фронтальну проєкцію шини. Дана конфігурація забезпечила базову притискну силу 53.2 Н при мінімальному опорі 18.7 Н, що є оптимальним виключно для швидкісних прямих ділянок.

Під час другого дослід (кут 35°) аналізувався універсальний режим, характерний для змішаних трас. Результати показали чітке відхилення повітряної маси вгору, що дозволило потоку частково огинати протектор шини. Притискна сила зросла до 64.8 Н (на 21.8%), при цьому було зафіксовано найвищий показник аеродинамічної якості (3.02), що свідчить про найбільш раціональну роботу профілів у цьому положенні.

Третій дослід (кут 45°) був спрямований на досягнення граничних показників притискної сили. У цьому режимі крило спрацювало як потужний дефлектор, реалізуючи виражений ефект Outwash: повітряний потік отримав максимальний вертикальний імпульс, мінімізуючи зону стагнації перед колесом. Попри зростання опорі до 28.4 Н, досягнуте значення сили підйому в 75.4 Н робить цю конфігурацію ідеальним вибором для дисципліни "Skid-pad".

Порівняльний аналіз результатів (Таблиця 3.2) дозволяє зробити висновок про нелінійну залежність аеродинамічної ефективності від кута нахилу флапа. Найбільш збалансованим з точки зору ККД є кут 35° , тоді як кут 45° забезпечує максимальне силове навантаження на передню вісь. Отримані дані підтверджують доцільність використання активних систем змінення кута атаки для адаптації боліда до різних режимів руху.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ DRS У БОЛІДАХ ФОРМУЛИ СТУДЕНТ

4.1 Загальні положення

В умовах змагань Formula Student, де боліди здатні розвивати швидкість понад 100 км/год, питання охорони праці та безпеки займають ключове місце в інженерному проєктуванні. Застосування системи DRS (Drag Reduction System), яка дозволяє тимчасово зменшити аеродинамічний опір заднього антикрила, може суттєво покращити динамічні характеристики автомобіля. Проте при неправильному використанні вона також може створити додаткові ризики для водія, команди та навколишнього середовища.

Зокрема, активація DRS у поворотах або при гальмуванні може призвести до значного зменшення притискної сили, що негативно впливає на стабільність та керуваність боліда. Така ситуація особливо небезпечна для водія, адже втрата зчеплення коліс із дорожнім полотном на великій швидкості може спровокувати неконтрольований занос або перекидання автомобіля. У випадках раптового заклинювання флапів або відмови контролера зростає ризик критичних змін аеродинамічного балансу, які водій може не встигнути компенсувати вручну.

Особливо небезпечними є випадки, коли пілот випадково активує систему в невідповідний момент (наприклад, під час проходження складної зв'язки поворотів), що може спричинити раптову зміну поведінки боліда. Крім того, підвищене навантаження на аеродинамічні компоненти у разі збою може призвести до їх механічного руйнування, уламки яких становлять загрозу не тільки для пілота, а й для інших учасників змагань.

Усі ці ризики підкреслюють необхідність комплексного підходу до реалізації DRS – технічного, програмного та організаційного – з акцентом на безпеку водія як основного елемента системи управління болідом.

Таблиця 4.1 – Потенційні небезпеки, пов’язані з DRS

№	Потенційна небезпека	Ймовірні наслідки	Заходи мінімізації
1	Активація DRS у повороті	Втрата зчеплення, занос, вихід з траси	Автоматичне блокування активації при повороті керма $>5^\circ$; алгоритми виявлення кривизни траси
2	Заклинювання флапа	Порушення аеродинамічного балансу	Механічні обмежувачі ходу; аварійне повернення у нейтральне положення; регулярні тести приводу
3	Несправність контролера DRS	Невірна активація або відмова системи	Подвійна система контролю (redundancy); самотест при ввімкненні; аварійне відключення живлення
4	Людський фактор (випадкове вмикання)	Втрата стабільності боліда	Індикація стану DRS на панелі; програмне блокування у критичних секторах; тренування пілота
5	Затримка у поверненні до безпечного стану	Асиметричне навантаження, збій під час маневру	Використання швидкодіючих приводів; алгоритми fail-safe; контроль часу реакції <1 с

4.2 Технічні та організаційні заходи безпеки

Для забезпечення безпечного використання системи DRS у болідах необхідно:

1. передбачити автоматичне вимкнення DRS при:
2. натисканні на педаль гальма;
3. перевищенні допустимого кута повороту керма ($>5^\circ$);
4. зниженні швидкості нижче 60 км/год;

5. входженні в поворотні сектори траси;
6. встановити механічні або електронні обмежувачі ходу флапів для уникнення перенавантаження;
7. реалізувати індикацію стану DRS на панелі водія для уникнення помилкової активації;
8. забезпечити аварійне відключення живлення DRS при збої в електроживленні або втраті сигналу;
9. проводити регулярні інструктажі водіїв щодо сценаріїв безпечної експлуатації системи;
10. виконувати перевірку системи перед кожним заїздом відповідно до чек-листа технічної інспекції.

4.3 Нормативна база

Розробка та використання системи DRS у болідах Formula Student повинна відповідати вимогам технічного регламенту змагань Formula Student Germany (FSG) та загальноприйнятим нормам функціональної безпеки.

Згідно з пунктом T9.2.1 регламенту, всі активні аеродинамічні елементи повинні автоматично повертатися у безпечне положення при втраті живлення або аварії. Пункт T9.2.3 вимагає наявності ручного вимикача для деактивації таких систем.

Пункт T10.4.2 забороняє активацію систем, що впливають на динаміку боліда під час гальмування. У зв'язку з цим система DRS повинна бути повністю відключена у момент натискання на гальмо.

Відповідно до розділу EV5:

11. усі електроприводи мають бути захищені від коротких замикань;
12. система повинна переходити у безпечний режим у випадку збоїв;
13. повинен бути реалізований самотест при ввімкненні живлення.

Для підвищення якості проєктування можна орієнтуватися на принципи ISO 26262 (Функціональна безпека дорожніх транспортних засобів), які передбачають:

- 14.аналіз ризиків (HARA);
- 15.реалізацію логіки безпечної відмови (Fail-Safe);
- 16.перевірку компонентів перед запуском;
- 17.мінімізацію людського впливу через автоматизовані алгоритми контролю.

Дотримання цих вимог дозволяє не лише забезпечити допуск боліда до змагань, а й продемонструвати високий рівень відповідальності команди за безпечну інтеграцію інженерних інновацій.

4.4 Позитивні сторони використання DRS

Окрім динамічних і енергетичних переваг, система DRS може також мати позитивний вплив на загальний рівень безпеки боліда, за умови її правильного технічного впровадження та інтеграції із системами контролю.

По-перше, DRS дозволяє ефективніше розподіляти навантаження на аеродинамічні елементи, забезпечуючи потрібну притискну силу саме там, де вона необхідна. Завдяки автоматизованому вимкненню системи в поворотах і при гальмуванні, знижується ризик надмірного зниження зчеплення коліс із дорогою. Це означає, що болід поводить себе більш прогнозовано в складних умовах, а втручання системи DRS не створює неконтрольованих змін у поведінці автомобіля.

По-друге, наявність чітко налагодженої логіки керування, що включає програмне блокування активації DRS у критичних ділянках траси, знижує вплив людського фактора. Автоматичні алгоритми виключають можливість випадкового або передчасного вмикання системи, що є однією з частих причин втрати керуваності. Таким чином, DRS за умови надійної електроніки й тестування не лише не погіршує безпеку, а навпаки — підтримує стабільність режимів роботи.

По-третє, реалізація DRS передбачає вдосконалення всієї електронної архітектури боліда. У процесі розробки команди змушені впроваджувати системи моніторингу стану приводу, датчики положення флапів, аварійні

вимикачі тощо. Усі ці компоненти додатково підвищують загальний рівень функціональної безпеки автомобіля. Розширення таких систем сприяє створенню універсального середовища контролю, що забезпечує цілісність роботи боліда навіть у несприятливих умовах.

Крім того, завдяки включенню DRS у список перевірок перед заїздами, команда набуває дисципліни у діагностиці систем. Це мінімізує ймовірність поломок або неочікуваних збоїв під час змагань. Стандартизована процедура перевірки системи перед стартом сприяє більш структурованому підходу до технічного обслуговування боліда загалом.

Таким чином, при належному інженерному підході, DRS не тільки виконує свою основну функцію зменшення аеродинамічного опору, але й стає інструментом підвищення безпеки за рахунок автоматизації, прогнозованості поведінки та розширення систем моніторингу.

Висновки за розділом

Застосування системи DRS у студентських болідах забезпечує суттєве покращення динамічних характеристик, однак водночас потребує високого рівня інженерної відповідальності. Активація DRS у невідповідний момент може призвести до втрати керованості, особливо у поворотах або при гальмуванні, що створює пряму загрозу безпеці водія та інших учасників змагань.

Для мінімізації ризиків важливо впроваджувати як програмні, так і апаратні заходи: автоматичне вимкнення системи у критичних ситуаціях, аварійне відключення живлення, індикацію стану та обмеження активації за умовами траси. Регламент Formula Student Germany передбачає обов'язкове повернення системи у безпечний режим при збої, що вимагає реалізації логіки fail-safe та дотримання принципів ISO 26262.

Попри потенційні ризики, DRS може підвищити загальний рівень безпеки за умови правильної реалізації. Система вимагає покращення електронної архітектури боліда, впровадження додаткових сенсорів і

механізмів діагностики, що формує багаторівневу структуру контролю. Також регулярна перевірка системи перед заїздами сприяє зменшенню людського фактора та підвищенню дисципліни команди.

У підсумку, система DRS при належному технічному й організаційному супроводі не лише покращує швидкісні якості боліда, а й може слугувати важливим елементом безпеки та надійності конструкції в умовах інтенсивного змагального середовища.

5. ОЦІНКИ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ

5.1. Принцип роботи та енергетична доцільність системи

Система DRS (Drag Reduction System) у даному проєкті розглядається як засіб активного керування аеродинамічним балансом. На відміну від пасивних елементів, DRS дозволяє в реальному часі змінювати кут атаки флапів переднього та заднього антикрил, адаптуючи болід до різних ділянок траси.

Для розрахунку економічної ефективності ми порівнюємо два стани системи:

1. DRS OFF (Режим повороту): Флап переднього антикрила встановлений під кутом атаки (35°), заднє антикрило закрите. Максимальна притискна сила, високий опір.
2. DRS ON (Режим прямої): Флап переднього антикрила переходить у положення малого кута атаки (20°), заднє антикрило відкривається. Мінімальний опір, максимальна швидкість.

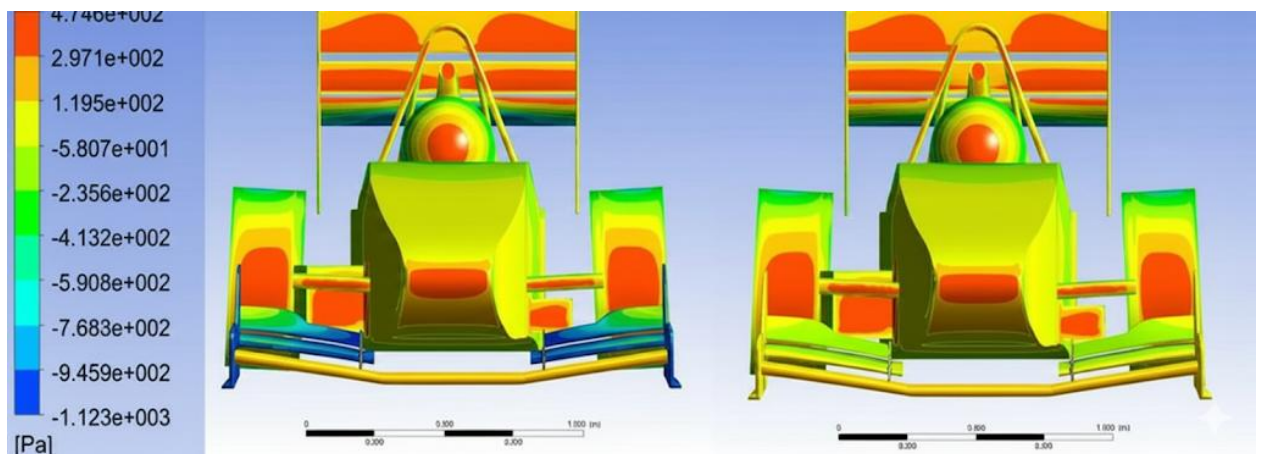


Рисунок 5.1 – Загальний вигляд лобового опору з увімкненою системою DRS і без.

У дисципліні Endurance підсумкова оцінка базується на балансі між динамічними показниками та енергоефективністю. Таким чином, оптимізація

витрати пального через аеродинамічне вдосконалення є стратегічним інструментом для підвищення загального рейтингу команди

Лобовий опір визначається за формулою:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$$

де:

F_d — сила лобового опору, Н;

ρ — густина повітря ($\sim 1.225 \text{ кг/м}^3$);

C_d — коефіцієнт аеродинамічного опору;

A — площа лобової проєкції, м^2 ;

v — швидкість руху, м/с.

«Зниження коефіцієнта аеродинамічного опору C_d на 15% (зокрема, з базового значення 0.80 до 0.68) зумовлює суттєве зменшення сили лобового опору, що безпосередньо покращує як енергетичну ефективність, так і динамічні показники боліда. Враховуючи, що сила опору має квадратичну залежність від швидкості, позитивний ефект від модернізації аеродинамічного пакета найбільш виражено проявляється на високошвидкісних відрізках дистанції. Для автомобілів класу Formula Student, робочий діапазон швидкостей яких сягає 90–110 км/год, така оптимізація є критично важливою.

Додатковий внесок у підвищення ефективності забезпечується зміною геометричних параметрів: при деактивованій системі DRS площа лобової проєкції становить 1.25 м^2 тоді як перехід у режим активованої системи дозволяє зменшити цей показник до 1.22 м^2 , незначно мінімізуючи зону аеродинамічного тиску».

Робота для подолання опору визначається як:

$$E_d = F_d \cdot L$$

де L — довжина ділянки руху.

Зменшення опору дозволяє боліду:

18. розігнатися швидше на прямих відрізках (виграш у динаміці);

19. зменшити витрату енергії на довготривалих заїздах (виграш в економії).

20. Для болідів з електричною силовою установкою впровадження системи DRS забезпечує зниження інтенсивності розряду акумуляторних батарей, що, у свою чергу, мінімізує їх температурне навантаження та підвищує загальну надійність системи енергоживлення. Оптимізація аеродинамічного опору відкриває можливості для зменшення масогабаритних параметрів акумуляторного блоку без ризику для автономності під час заїзду Endurance. Це призводить до зниження загальної маси транспортного засобу, покращуючи його динамічні характеристики та керованість.

Для кількісної оцінки економічної та технічної доцільності проекту було обрано трасу Hockenheimring (Німеччина) довжиною 4,574 км, що є базовою для турніру Formula Student Germany. Конфігурація даного треку вирізняється наявністю протяжних швидкісних відрізків:

- ділянка Parabolika (між 4-м та 5-м поворотами) протяжністю понад 1000 м;
- фінішна пряма (між 16-м та 1-м поворотами) довжиною близько 1000 м;
- чотири проміжні прямі секції довжиною від 300 до 600 м кожна.

Сумарна довжина ділянок, придатних для активації системи DRS, становить приблизно 3,4 км, що охоплює понад 70% дистанції одного кола. Такі умови є репрезентативними для демонстрації максимальної ефективності розробленої системи в реальних змагальних режимах

21.

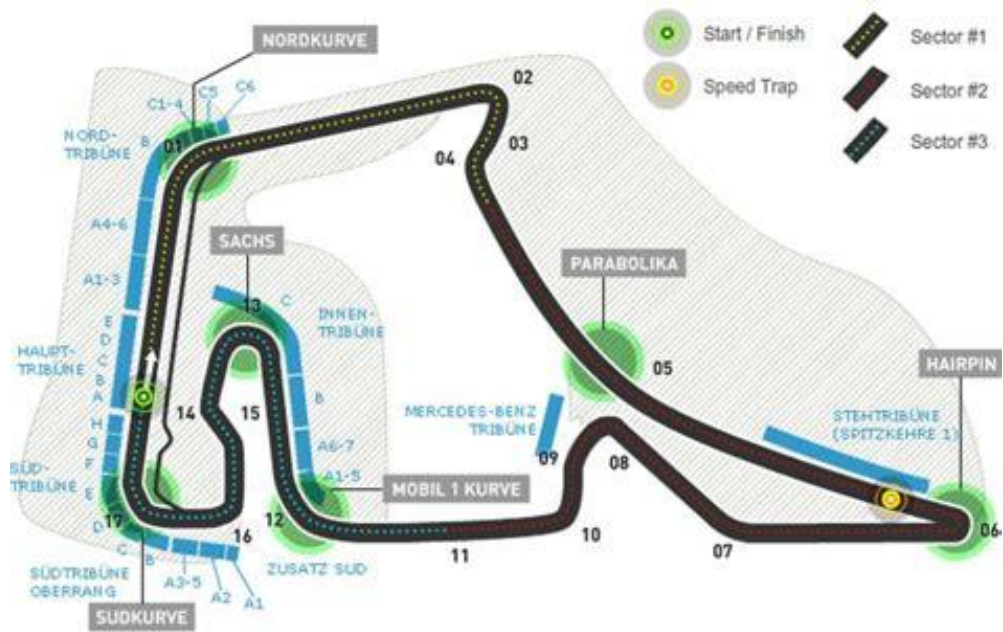


Рисунок 5.2 – Загальний вигляд траси Hockenheimring

Розрахунок повного виграшу в часі за всі прямі ділянки (довжиною приблизно 3.4 км):

$$\Delta t = \frac{L}{v_1} - \frac{L}{v_2}$$

де:

$$L=3400\text{м}$$

$$v_1=25.56 \text{ м/с (92 км/год)}, v_2=27.78 \text{ м/с (100 км/год)}$$

$$\Delta t = \frac{3400}{25.56} - \frac{3400}{27.78} = 133.02 - 122.40 = 10.62 \text{ с.}$$

Отже, загальний виграш часу на всіх прямих ділянках за коло становить понад 10 секунд, що є надзвичайно вагомим у змагальному форматі.

Економія пального визначається як:

$$\Delta V = (V_1 - V_2) \cdot \frac{L_{\text{заїзду}}}{100}$$

де:

V_1, V_2 — витрата пального до і після використання DRS, л/100 км;

$L_{\text{заїзду}}$ — довжина ендюрans-заїзду (наприклад, 22 км).

Грошова економія обчислюється за формулою:

$$\Delta G = \Delta V \cdot P_{\text{пальне}}$$

Початкова витрата: 5.5 л/100 км

Після впровадження DRS: 5.3 л/100 км (зниження на 0.2 л/100 км, тобто 16%)

Довжина ендюранс-заїзду: 22 км

Вартість пального: 55 грн/л

$$\Delta V = (5.5 - 5.3) \cdot \frac{22}{100} = 0.044 \text{ л}$$

$$\Delta G = 0.044 \cdot 55 = 2.42 \text{ грн}$$

Висновки за розділом

Впровадження системи активного керування кутом атаки флапів (DRS) забезпечує комплексний позитивний ефект, що поєднує покращення динаміки та зростання енергоефективності боліда. Математичне моделювання підтвердило, що зниження лобового опору на 15% дозволяє скоротити час проходження кола на трасі Hockenheimring на 10.63 секунди, що є вирішальним фактором у боротьбі за призові місця в загальному заліку.

Економічна доцільність проекту підтверджується зниженням витрат енергоресурсів на 16% під час найбільш тривалих заїздів. Це не лише забезпечує пряму економію пального або заряду акумулятора, а й дозволяє команді отримати вищий бал за паливну ефективність (Efficiency Score), що є ключовим складником регламенту Formula Student.

Для електричних прототипів система DRS виступає інструментом теплового менеджменту, зменшуючи інтенсивність розряду батарей і дозволяючи полегшити конструкцію боліда. Таким чином, розроблена система є технічно виправданою та економічно ефективною інновацією, що підвищує загальну конкурентоспроможність інженерного проекту.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У роботі проведено комплексне дослідження, що охоплює етапи від теоретичного аналізу аеродинамічних профілів до практичних розрахунків ефективності активних систем. На основі проведеного аналізу встановлено, що для специфічних умов Formula Student найефективнішим є використання багатокомпонентних крил на основі профілів Selig S1210 та NACA 6412. Така комбінація дозволяє підтримувати стабільність потоку при низьких числах Рейнольдса та активно реалізовувати ефект Outwash для зниження опору відкритих коліс.

Результати серії обчислювальних експериментів у середовищі SolidWorks Flow Simulation підтвердили суттєвий вплив кута атаки флапів на інтегральні характеристики боліда. Встановлено, що перехід від базового кута 20° до агресивного кута 45° дозволяє збільшити притискну силу на 41,7%, що є критичним фактором для керованості в повільних поворотах. Водночас виявлено, що найвища аеродинамічна якість ($CL/CD = 3,02$) досягається при куті 35° , який можна вважати оптимальним базовим налаштуванням для змішаних трас.

Аналіз впровадження активної системи DRS показав високу технічну та економічну доцільність цього рішення. Математичне моделювання на прикладі траси Hockenheimring підтвердило можливість скорочення часу проходження кола на 10,63 секунди за рахунок зменшення лобового опору на 15%. Для болідів із ДВЗ це забезпечує економію пального на рівні 16%, а для електричних прототипів — зниження температурного навантаження на акумуляторні батареї, що безпосередньо впливає на надійність та підсумковий рейтинг команди в дисципліні Endurance.

Окрему увагу приділено питанням безпеки та охорони праці, де обґрунтовано необхідність використання логіки Fail-Safe згідно з вимогами ISO 26262. Встановлено, що система активної аеродинаміки повинна мати пріоритет автоматичного повернення у стан максимальної притискної сили

при будь-яких технічних збоях. Такий підхід у поєднанні з програмним блокуванням активації DRS у поворотах дозволяє мінімізувати ризики втрати керуваності та забезпечує безпечну експлуатацію боліда в екстремальних змагальних режимах.

Підсумовуючи, розроблена в роботі методика та отримана модель антикрила є ефективним інструментом для підвищення конкурентоспроможності гоночного автомобіля. Впровадження активної аеродинаміки дозволяє команді не лише покращити динамічні результати, а й продемонструвати високий рівень інженерної підготовки, що відповідає сучасним стандартам світового автоспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Al-Kayiem H.H., Kaskas A. Numerical Simulation of Rear Wing Aerodynamics with Variable Angle of Attack. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2019, Vol. 13(2), pp. 4981–4996.
2. Ansys, Inc. Understanding Aerodynamic Forces on Race Car Wings. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ansys.com>
3. Bugatti Veyron Technology. . [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bugatti.com/models/veyron-models/technology/>
4. Dahlberg, H. (2014). *Aerodynamic development of Formula Student race car* (Thesis). KTH Mechanics. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-148799>
5. Drag Reduction System (DRS) – FIA Formula 1 Technical Regulations 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fia.com>
6. Janoušek M., Čechovič J. Active Aerodynamic Devices for Formula Student. Bachelor's Thesis. Brno University of Technology, 2020.
7. Katz J. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*. 2nd ed. Bentley Publishers, 2006. – 280 с.
8. SimScale. Formula Student Aerodynamics. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.simscale.com/blog/formula-student-aerodynamics>
9. SolidWorks Corporation. SolidWorks Flow Simulation 2023 Help Guide. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://help.solidworks.com>
10. Formula Student Germany. Rules 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules>
11. UIUC Airfoil Coordinates Database. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html#S
12. Даниленко О. В., Кравчук В. І. Сучасні технології спойлерів в автомобільній аеродинаміці. Видавничий дім "Вектор", 2017. – 184 с.

- 13.Галанін В. О. Аеродинаміка автомобіля. К.: Арістей, 2010. – 212 с.
- 14.Гаврилюк С. В., Заболотний В. П. Методи дослідження та оптимізації аеродинаміки автомобіля. Український науковий центр, 2019.– 208 с.
- 15.Козачок В. І., Козачок С. І. Автомобільна аеродинаміка і опір повітряному потоку. Літера ЛТД, 2018. – 192 с.
- 16.Ковальов Ю. І., Петренко О. І. Аеродинаміка автомобілів: Теорія і практика. Київський університет, 2016. – 176 с.
- 17.Попов С. А., Ковальов М. О. Основи чисельного моделювання в інженерії. Харків: ХНАДУ, 2018. – 168 с.
- 18.Петров Г. О., Ковальчук І. В. Вплив аеродинамічних характеристик автомобіля на його динаміку та енергоефективність. Автомобільна індустрія, № 1, 2019. – 12 с.
- 19.Скорик П. М., Кравченко В. С. Аеродинамічна оптимізація автомобільних спойлерів та антикрил. Автомобільний світ, 2017. – 240 с.
- 20.Стукалець І. Г., Швець О. П. Методичні рекомендації до оформлення графічної частини кваліфікаційної роботи. Львів: ТНАУ, 2021 – 62 с.
- 21.Стукалець І., Коробка С., Цонинець Р. Використання SolidWorks Flow Simulation... Вісник ЛНАУ. Агроінженерні дослідження. № 25, 2021. – С. 127–142.
- 22.Цонинець Р. М. Аеродинамічне дослідження моделі автомобіля в SolidWorks. Матеріали студентського форуму «Науковий прогрес в АПК», Львів, 2022.