

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка та дослідження автоматизованої системи прогнозування траєкторії руху автономних транспортних засобів

Виконав: студент VI курсу, групи КАМ-61

спеціальності

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Сас Д.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Дмитрів О.Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Козбур І.Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Савків В.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Станько А.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Савків В.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« » 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Сасу Денису Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження автоматизованої системи прогнозування траєкторії руху автономних транспортних засобів обладнання

Керівник роботи Дмитрів Олена Романівна, канд. техн. наук, доцент кафедри АВ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «20» листопада 2025 року № 4/7-1077

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні вимоги щодо системи рпрогнозування

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Аналітична частина

Технологічна частина

Конструкторська частина

Науково-дослідна частина

Спеціальна частина

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Титульний слайд

Актуальність роботи

Завдання роботи

Основна частина

Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та			
безпека в надзв. ситуаціях			

7. Дата видачі завдання 20 листопада 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Сас Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Дмитрів О.Р.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини дипломної роботи становить 12

Об'єм пояснювальної записки складає 85 друкованих сторінок формату А4.

В роботі використано ____ літературних джерел.

Робота була зосереджена на дослідженні моделі автономного автомобіля, а також кермування та керування швидкістю автономних транспортних засобів. Було розглянуто різні рівні динамічної моделі транспортного засобу, такі як кінематична модель та модель велосипеда з лінійною або нелінійною моделями шин.

Контролер контролю був розділений на дві частини: перша — поздовжній контролер, що відповідає зміні швидкості, а інший — поперечний, який головним чином пов'язаний з кутом повороту керма. Поперечний контролер базується на теорії MPC, а поздовжній — на теорії PID. Весь контролер, розроблений у Matlab Simulink, показав хороші параметри роботи у двох напрямках регулювання, щоб слідувати бажаному шляху. Для перевірки було згенеровано різні сценарії за допомогою інструментарію автономного водіння в Matlab.

Щоб отримати більш достовірні дані про стан транспортного засобу було також використано програмне забезпечення Carsim у поєднанні з Matlab, що дозволило оцінити роботу розробленого контролера для керування автономним транспортним засобом.

Ключові слова: КОНТРОЛЕР, ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ, ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК, КЕРУВАННЯ, МОДЕЛЬ ПРОГНОЗНОГО КЕРУВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	7
1.1 Загальне уявлення про автономне керування автомобілем.	7
1.2 Модель прогнозного керування для планування та відстеження шляху.	10
1.3 Постановка проблеми.....	12
2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	13
2.1 Модель транспортного засобу та шин	13
2.2 Кінематична модель	14
2.3 Динамічна модель	16
2.3.1 Модель велосипеда	17
2.3.2 Модель шини.....	20
2.3.3 Лінійна модель велосипеда	23
3 КОСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	24
3.1 Розробка MPC-контролер для бокового керування	24
3.2 LTI (лінійна незмінна в часі) модель прогнозного керування (MPC)	26
3.3 Нелінійне моделювання прогнозного керування	31
3.4 Чисельний метод для нелінійної системи	33
3.5 Динамічна модель у координатах шляху	34
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	37
4.1 Огляд теорії ПІД-регулювання	37

<i>4.2 Впровадження поздовжнього контролю.....</i>	<i>39</i>
<i>4.3 Генерація бажаної швидкості.....</i>	<i>41</i>
<i>4.4 Спільний вплив між поздовжнім та поперечним напрямком</i>	<i>43</i>
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	48
<i>5.1. Впровадження моделі та розвиток MPC в Simulink.....</i>	<i>48</i>
<i>5.1 Середовище Simulink</i>	<i>49</i>
<i>5.2 Моделювання співпраці з Carsim</i>	<i>53</i>
<i>5.3 Бенчмаркінг за допомогою модуля Carsim</i>	<i>56</i>
<i>5.4 Графіки продуктивності та кінцевих результатів.....</i>	<i>59</i>
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ...	63
<i>6.1 Вимоги охорони праці під час роботи з електроустаткуванням.....</i>	<i>63</i>
<i>6.2 Вимоги безпеки під час виконання робіт</i>	<i>68</i>
<i>6.3 Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування</i>	<i>70</i>
<i>6.4 Розрахунок захисного заземлення</i>	<i>72</i>
ВИСНОВКИ.....	78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	79

ВСТУП

Автономні транспортні засоби є перспективним технічним рішенням важливих проблем у сфері транспорту. Щороку понад мільйон людей гине внаслідок дорожньо-транспортних пригод, спричинених переважно людською помилкою. Автоматизація водіння має потенціал значно зменшити кількість цих аварій. Крім того, автомобілі з автономним керуванням можуть покращити мобільність людей, які не можуть самотійно керувати автомобілем. Використання машинного навчання з учителем стало домінуючим підходом до автономного водіння, оскільки воно може добре обробляти високорозмірні дані датчиків, такі як зображення. Для навчання алгоритмів машинного навчання наскрізним способом, тобто безпосередньої оптимізації нейронної мережі для виконання повного завдання водіння, потрібні демонстрації від водія-експерта. Промислові дослідження часто збирають дані від водіїв-експертів, але цей підхід є дорогим з точки зору грошей та часу.

Моделювання часто використовується для проведення досліджень автономного водіння, оскільки в них можна безпечно перевірити нові ідеї. У моделюваннях доступна альтернатива експертам-людям, яку називають привілейованими експертами, для виконання завдання збору даних. Привілейовані експерти – це комп'ютерні програми, які мають прямий доступ до симулятора (наприклад, знаючи розташування всіх автомобілів), обходячи складне завдання сприйняття. Ці привілейовані експерти можуть генерувати марковані дані швидше, ніж експерти-люди, і практично безкоштовно.

Однак існуючі підходи привілейованих експертів мають недоліки, оскільки вони не можуть безпечно керувати автомобілем, не спричиняючи зіткнень або порушуючи правила дорожнього руху.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальне уявлення про автономне керування автомобілем.

Автомобіль з автономним керуванням – це автомобіль, який виконує транспортне завдання без втручання людини, використовуючи комп'ютер усередині автомобіля для імітації поведінки водія та прийняття рішень. Отримуючи дані про навколишнє середовище з різних датчиків, на основі інформації про дорогу, локалізацію транспортного засобу та перешкоду, контролер дає команди.

Тут систему автономного керування можна розділити на 4 частини: управління системою, зондування навколишнього середовища, планування шляху та керування транспортним засобом.

Система зондування навколишнього середовища. Так само, як і автомобіль з людиною, автономний автомобіль потребує інформації про стан руху в режимі реального часу. Існує 2 способи отримання даних: один – за допомогою всіх датчиків всередині транспортного засобу в поєднанні з даними про навколишнє середовище для об'єднання даних датчиків, намагаючись дозволити транспортному засобу «зрозуміти» навколишнє середовище, інший – через Інтернет для надання даних про зовнішній простір. Наприклад, за допомогою автомобільної мережі транспортний засіб може легко отримати дані про дорогу перед собою, а також тенденцію руху автомобіля навколо автономного автомобіля.

Система зондування навколишнього середовища використовує ці дані, співвідносячи їх з моделлю всередині комп'ютера, для розуміння та розпізнавання ситуації. Система зондування навколишнього середовища є ключовою частиною для надійного водіння, а це означає, що вона також є найскладнішою частиною для виконання. Як ми всі знаємо, для водіння в місті принаймні автономний автомобіль повинен розпізнавати дорогу,

світлофор та всі дорожні знаки, пов'язані з правилами дорожнього руху. Отримання даних із системи зондування навколишнього середовища переносить їх у систему планування шляху.

Система планування шляху. Планування шляху означає в середовищі з перешкодами, на основі певного стандарту, такого як мінімальна довжина шляху або мінімальне використання енергії, пошук шляху від початкової точки до кінцевого пункту призначення без будь-яких перешкод. В даний час система планування шляху в основному використовує теорію, що береться з досліджень робототехніки. Загалом є 2 частини: глобальне планування шляху та локальне планування шляху. Глобальне планування шляху означає, що за умови знання загальної карти навколишнього середовища, використовуючи інформацію про локальне середовище, таку як розташування перешкоди та межі дороги, автономний автомобіль може підтвердити оптимальний шлях для руху.

Але коли умови змінюються, наприклад, інший автомобіль перериває шлях, яким рухався автономний автомобіль, важливо використовувати локальне планування шляху для перепланування шляху. Планування локального шляху, яке на основі даних датчиків, що представляють інформацію про локальне середовище, генерує шлях, яким потрібно слідувати. Це здійснюється під керівництвом глобального планування шляху; у процесі планування враховуйте не лише мінімальне використання енергії, питання безпеки, але й проблему динамічних обмежень середовища.

У процесі планування локального шляху ще одним питанням, на яке слід звернути увагу, є планування руху, що означає, що локальний шлях повинен враховувати обмеження динаміки транспортного засобу. Використовуючи теорію прогнозного керування моделями в процесі планування шляху автономного водіння, важливим питанням є те, як вирішити обмеження динаміки транспортного засобу.

Система керування транспортним засобом.

Система керування транспортним засобом, яка включає поздовжнє та поперечне керування напрямком, генерує команду для слідування траєкторією, що надходить від системи планування траєкторії. Так само, як і в управлінні роботом, існує різниця між траєкторією та простором. Траєкторія, яка одночасно враховує простір і час, є одним із видів траєкторії.

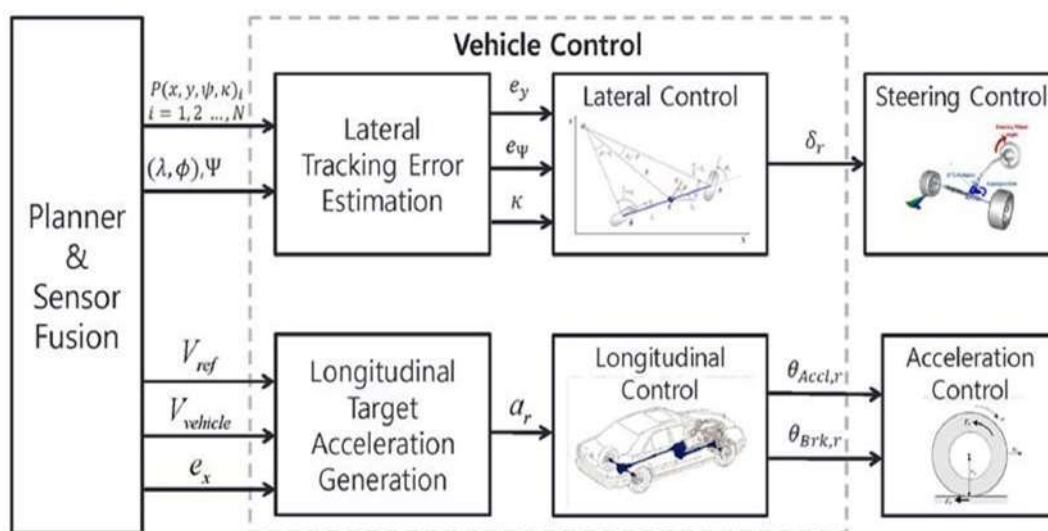


Рисунок 1.1 - Керування транспортним засобом

Суть траєкторії.

Планування полягає в тому, щоб мінімізувати похибку між місцем розташування транспортного засобу та його еталонною траєкторією шляхом контролю його руху. Якщо говорити про траєкторію, то вона також включає похибку в часі.

Система керування транспортним засобом є важливою частиною автономного керування автомобілем. Зйомка навколишнього середовища та планування шляху повинні бути інтегровані із системою керування транспортним засобом. За будь-яких умов водіння, особливо на дуже високій швидкості, динаміка автомобіля має набагато більший вплив на результати.

Такі параметри, як бічне ковзання транспортного засобу, коефіцієнт тертя між шиною та дорогою, аеродинаміку потрібно враховувати порівняно з умовами низької швидкості.

Управління системою.

Автономне керування автомобілем – це, перш за все, система, в якій багато датчиків, виконавчих механізмів та електронних блоків керування повинні працювати разом для виконання різноманітних функцій, таких як слідування за автомобілем, утримання смуги руху, екстрене гальмування та уникнення перешкод. Різні функції повинні взаємодіяти з різними датчиками та виконавчими механізмами, щоб забезпечити безпеку та комфортне керування.

Коли виникає нова умова або автономний автомобіль отримує нову вимогу від транспортного засобу, система управління повинна призначити різні функції виконавчим механізмам на основі даних, що надходять від різних датчиків.

Водночас система управління повинна контролювати весь автономний автомобіль, щоб перевірити стан деталей всередині автомобіля.

1.2 Модель прогнозного керування для планування та відстеження шляху.

Модель прогнозного керування (Model Predictive Control – MPC) як правило повинна прогнозувати подальшу траєкторію.

Динамічна модель транспортного засобу відіграє важливу роль у вирішенні проблеми планування та відстеження маршруту автономного водіння автомобілів. Впровадження динамічної моделі в процес планування шляху може збільшити можливості роботи в режимі реального часу за рахунок зменшення обсягу обчислень.

Феліпе Куне розробив схему керування на основі кінематичної моделі транспортного засобу для колісного мобільного робота. Використовуючи MPC для покращення умов обмежень, за допомогою квадратичного програмування (Quadratic programming - QP) вирішується проблема лінеаризації моделі колісного мобільного робота [1].

Разван Рафайла розглядає модель автономного автомобіля з динамічною моделлю, але з урахуванням нелінійної сили шини. Нелінійна модель прогнозного керування використовує алгоритм оптимізації для досягнення мінімального значення функції витрат [2].

Метью Браун помістив локальне планування шляху та відстеження шляху в одну систему керування, використовуючи модельне прогнозне керування. Всі результати мають бути згенеровані перед розрахунком, який враховує бажаний шлях, розташований у двох безпечних оболонках. Одна обвідна відображає оптимізацію задачі стійкості, а інша — індикатор уникнення перешкод [3].

Джонатан Й. Гох збирає ідеї від професійних водіїв. Вони пропонують підхід до контролю автономного дрейфу для кращого виконання задачі відстеження шляху.

Опорний шлях генерується точково з усіх рівноважних точок дрейфу, враховуючи, що кут бокового ковзання шини вже не дуже малий, тобто нелінійний для сили, що діє на шину [4].

Цзечао ЛІУ досліджує вплив різних ступенів свободи на продуктивність модельного прогнозуючого контролера. Для оцінки продуктивності використовуються такі показники, як час досягнення цільової точки та відхилення від бажаного шляху [5].

Стівен К. Пітерс розробив контролер відстеження траєкторії, враховуючи диференціальну площинність, щоб дослідити межі сили шини з кращою продуктивністю в задачі відстеження траєкторії [6].

Задача проходження шляху формується для геометричного підходу до проектування алгоритму керування [7-11], важливо враховувати контролер із замкнутим циклом, включаючи як поздовжній, так і поперечний напрямки. [12], а детальна інформація про модель драйвера наведена в статті [13-14, 26, 27, 28].

1.3 Постановка проблеми

У цій роботі досліджується застосування моделі прогнозного керування (MPC) в автономних автомобілях. Починаючи з побудови кінематичної та динамічної моделі транспортного засобу в рамках лінійної або нелінійної моделі шин, обговорюються концепції прогнозного керування моделлю, такі як оптимізація, функція витрат, квадратичне програмування та обмеження.

На основі даних про транспортний засіб, що надходять з системи Carsim, розроблено нелінійну математичну модель для транспортного засобу з динамічними обмеженнями [29, 30, 31]. Проведено тестування в Simulink з різними типами сценаріїв дозволило побачити кінцеву продуктивність контролера. Модель транспортного засобу Carsim вбудована як S-функція Simulink, а контролер розроблено за допомогою інструментарію Matlab MPC.

Слід уточнити важливе питання, а саме горизонт прогнозування; це головний параметр у MPC-контролері. Горизонт прогнозування впливає на кінцеву продуктивність контролера та тривалість обчислень. Для автономного автомобіля дуже важливо виконувати відстеження шляху в режимі реального часу, інакше транспортний засіб легко зіткнеться з небезпечною ситуацією через затримку в часі.

2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Модель транспортного засобу та шин

Автономний автомобіль повинен знати модель автомобіля, таку як кінематичну або динамічну, щоб виконувати функцію планування та відстеження шляху [32, 33, 34]. З першого розділу ми розуміємо, що чим краще відома динамічна модель транспортного засобу, особливо під час проектування системи планування шляху з використанням динамічної моделі, тим кращими будуть результати відстеження шляху. Це означає, що надійна модель транспортного засобу є не лише передумовою проектування МРС-контролера, але й основою відстеження шляху.

Під час проектування МРС-контролера важливо враховувати умови водіння автономного автомобіля. Для належного керування рухом автономного автомобіля необхідно вибрати правильну змінну для точного прогнозування зміни руху транспортного засобу.

Рух транспортного засобу на дорозі є дуже складним, тому для отримання правильних описів руху автомобіля одним із корисних підходів є складна система диференціальних рівнянь з вибором різних змінних, що представляють рух автомобіля.

Додаючи кінематичну або динамічну модель транспортного засобу всередину МРС-контролера, ми можемо підтвердити мету керування для контролера. Особливо в плануванні руху, за допомогою лінеаризації та спрощення моделі транспортного засобу вимога продуктивності в режимі реального часу може бути виконана.

Лінеаризація та спрощення є важливими підходами для розв'язання задачі про моделі автомобіля, такої як еліптична модель шин та модель точкової маси автомобіля.

У цьому розділі ми представляємо деякі моделі автомобіля, їхні припущення та обмеження.

2.2 Кінематична модель

Кінематика — це вид теорії, що описує рух точок та груп об'єктів, нехтуючи силою, яка впливає на цей рух.

Кінематика завжди спрямована на геометрію руху, що дозволяє досліджувати її як розділ математики [35, 36, 37, 38]. Проблема кінематики починається з опису геометрії системи та оголошення початкових умов будь-яких відомих значень положення, швидкості та/або прискорення точок у системі.[1]

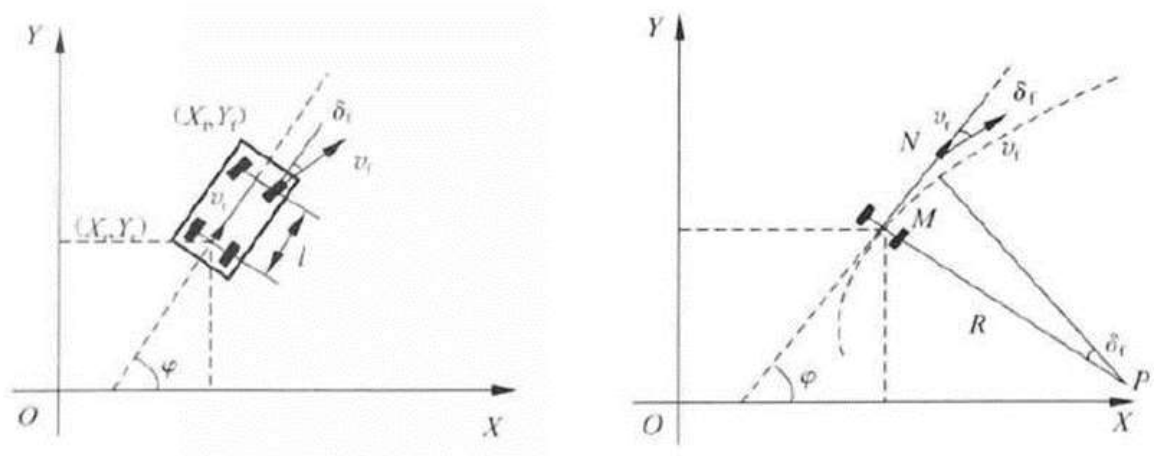


Рисунок 2.1 Кінематична модель

Як показано на рис. 2.1, (X_f, Y_f) , (X_r, Y_r) представляють координати центральних точок передньої та задньої осей, φ — кут рихування транспортного засобу, δ_f — кут повороту передньої осі, δ_r — кут повороту задньої осі, v_f — швидкість передньої осі, l — колісна база транспортного засобу.

R – радіус траєкторії центру мас заднього колеса, P – миттєвий центр обертання, M – центральна точка задньої осі, N – центральна точка задньої осі.

У центральній точці задньої осі M швидкість становить:

$$V_r = \dot{X}_r \cos \varphi + \dot{Y}_r \sin \varphi \quad (2.1)$$

Кінематичні обмеження переднього та заднього мостів:

$$\dot{X}_f \sin(\varphi + \delta_f) - \dot{Y}_f \cos(\varphi + \delta_f) \quad (2.2)$$

$$\dot{X}_r \sin \varphi - \dot{Y}_r \cos \varphi = 0 \quad (2.3)$$

У поєднанні з двома верхніми частинами формули ми можемо отримати:

$$\begin{cases} \dot{X}_r = V_r \cos \varphi \\ \dot{Y}_r = V_r \sin \varphi \end{cases} \quad (2.4)$$

Враховуючи співвідношення геометрії передньої та задньої осей:

$$\begin{cases} X_f = X_r + l \cos \varphi \\ Y_f = Y_r + l \sin \varphi \end{cases} \quad (2.5)$$

швидкість відхилення становить:

$$\omega = \frac{V_r}{l} \tan \delta_f \quad (2.6)$$

ω - кутова швидкість риськування автомобіля, водночас з кутової швидкості риськування можна отримати радіус кривини R та кут повороту передньої осі:

$$\begin{cases} R = \frac{V_r}{\omega} \\ \delta_f = \tan^{-1}(l/R) \end{cases} \quad (2.7)$$

Зрештою, кінематична модель має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_r \\ \dot{Y}_r \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ \tan \delta_f / l \end{bmatrix} V_r \quad (2.8)$$

Модель можна описати більш однорідним способом, який є матрицею простору станів. Тут змінна стану — $[X_r \ Y_r \ \varphi]$, а керуюча змінна — $[V_r \ \omega]$. Нова модель має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_r \\ \dot{Y}_r \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ 0 \end{bmatrix} V_r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \quad (2.9)$$

2.3 Динамічна модель

Динаміка транспортного засобу в основному використовується для аналізу впливу підвіски транспортного засобу, включаючи модель кватеркара та керованість автомобіля. В аналізі керованості основна увага приділяється питанням поздовжньої та поперечної динаміки.[15, 41]

У цій роботі ми хочемо використати MPC-контролер для завершення функції відстеження шляху, а також спростити динамічну модель транспортного засобу для зменшення обчислювальних витрат, щоб підтвердити роботу в режимі реального часу.[16, 39, 40]

Використання кінематичної моделі не є надійним, особливо коли швидкості збільшуються, а кривизна траєкторії змінюється. Але за таких умов динамічна модель має хороші показники відстеження траєкторії.

Динамічна модель автомобіля дуже складна та має більший ступінь свободи в управлінні. Водночас система є нелінійною та розривною.

Перш ніж побудувати динамічну модель транспортного засобу, нам потрібно зробити деякі ідеальні припущення:

1. Дорога вважається рівною поверхнею, рух є площинним.
2. Знехтуйте впливом руху підвісу.
3. Розглянемо лінійну модель шини, нехтуючи ефектом роз'єднання у 2 напрямках.
4. Передача навантаження не враховується.
5. Знехтувати аеродинамічною силою.

2.3.1 Модель велосипеда

Виходячи з вищезазначених 5 ідеальних припущень, існує 3 напрямки руху для плоского транспортного засобу, а саме поздовжній, поперечний та рух по риску.

Як показано на рисунку 3, система координат $Oxuz$ фіксована в транспортному засобі; $хоz$ – це серединна площина лівої та правої сторін. Початкова точка знаходиться в центрі ваги автомобіля Система координат OXY фіксована на дорозі.

Щодо сил, які представлені на рис. 2.2.:

F_{lf} F_{lr} - поздовжні сили передньої та задньої шини;

F_{cf} F_{cr} - це бічна сила передньої та задньої шини;

F_{xf} F_{xr} - сила, що діє на шину в напрямку x ;

F_{yf} F_{yr} - сила, що діє на шину, у напрямку y .

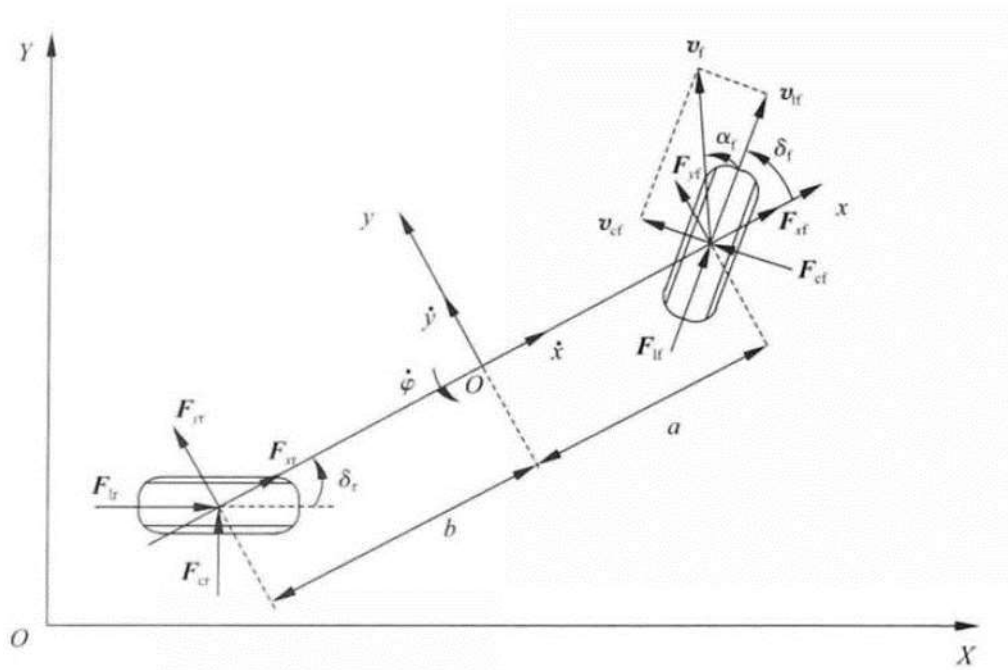


Рисунок 2.2 - Модель велосипеда.

Застосовуючи другий закон Ньютона для руху вздовж осей X, Y та Z:

$$m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\phi} + 2F_{xf} + 2F_{xr}$$

$$m\ddot{y} = m\dot{x}\dot{\phi} + 2F_{yf} + 2F_{yr}$$

$$I_z\ddot{\phi} = 2a F_{yf} - 2b F_{yr} \quad (2.10)$$

Де m та I_z позначають масу транспортного засобу та інерцію ристання відповідно, $\dot{x}$ та $\dot{y}$ позначають поздовжню та поперечну швидкості транспортного засобу відповідно, а $\dot{\phi}$ – швидкість повороту навколо вертикальної осі в центрі ваги транспортного засобу.

Поздовжні та поперечні компоненти сили від шин у рамі кузова автомобіля моделюються наступним чином:

$$\begin{aligned}
F_{xf} &= F_{lf} \cos \delta_f - F_{cf} \sin \delta_f \\
F_{xr} &= F_{lr} \cos \delta_r - F_{cr} \sin \delta_r \\
F_{yf} &= F_{lf} \sin \delta_f - F_{cf} \cos \delta_f \\
F_{yr} &= F_{lr} \sin \delta_r - F_{cr} \cos \delta_r
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Поздовжні та поперечні сили шин задані моделлю Расеїка.

Вони є нелінійними функціями кутів ковзання шини α , коефіцієнтів ковзання σ , нормальних сил F_z та коефіцієнта тертя між шиною та дорогою μ :

$$F_l = fl(\alpha, \sigma, F_z, \mu) \tag{2.12}$$

$$F_c = fc(\alpha, \sigma, F_z, \mu) \tag{2.13}$$

Кути ковзання визначаються наступним чином:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v_c}{v_l} \tag{2.14}$$

Де поперечна та поздовжня складові швидкості шини обчислюються за формулою:

$$\begin{aligned}
v_l &= v_y \sin \delta + v_x \cos \delta \\
v_c &= v_y \cos \delta - v_x \sin \delta
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Компоненту швидкості можна розрахувати за формулою:

$$\begin{aligned}
v_{yf} &= \dot{y} + a\dot{\varphi} & v_{yr} &= \dot{y} - b\dot{\varphi} \\
v_{xf} &= \dot{x} & v_{xr} &= \dot{x}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Коефіцієнти ковзання s приблизно визначаються наступним чином:

$$s = \begin{cases} \frac{rv\omega_t - 1}{v} (v > r\omega_t, v \neq 0) \\ 1 - \frac{v}{r\omega_t} (v < r\omega_t, \omega_t \neq 0) \end{cases} \quad (2.17)$$

Коефіцієнт тертя μ вважається відомою константою та однаковим на всіх чотирьох колесах. Ми використовуємо статичний розподіл ваги для оцінки нормальної сили на колесах. Він наближено визначається як:

$$F_{zf} = \frac{bmg}{2(a+b)} \quad F_{zr} = \frac{amg}{2(a+b)} \quad (2.18)$$

Нарешті, розглянемо нерухому систему координат транспортного засобу та інерціальну систему відліку.

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \\ \dot{X} &= \dot{x} \cos \varphi + \dot{y} \sin \varphi \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.3.2 Модель шини

Проводячи дослідження динаміки транспортного засобу, поздовжня та поперечна сила разом із вирівнюючим крутним моментом впливають на керованість та стійкість керування. Через складну поведінку шини динамічна модель є нелінійною. Тому важливим питанням для створення динамічної моделі є вибір надійної та корисної моделі шини.

Расејка використовує формулу, яка використовує тригонометричну функцію для представлення поздовжньої та поперечної сили [22-23, 42, 43]. Знаходячи зв'язок між кутом бічного ковзання та силою в різних напрямках, можна представити характеристики шини.

Звичайна форма формули така:

$$Y(X) = D \sin(C \arctan(B\Theta(X))) + S_v \quad (2.20)$$

Де, Y – це вихідний сигнал функції, яка може бути поздовжньою або поперечною силою шини. B , C , D , S_v – коефіцієнти, що корелюють з експериментальними даними. У наступній частині ми наводимо типові приклади графіків шин з використанням формули расейка.

На рис. 2.3 показано залежність бічної сили шини від кута бокового ковзання при різних значеннях коефіцієнта тертя.

На рис. 2.4 показано поздовжню силу на шині як функцію коефіцієнта ковзання при різних значеннях коефіцієнта тертя.

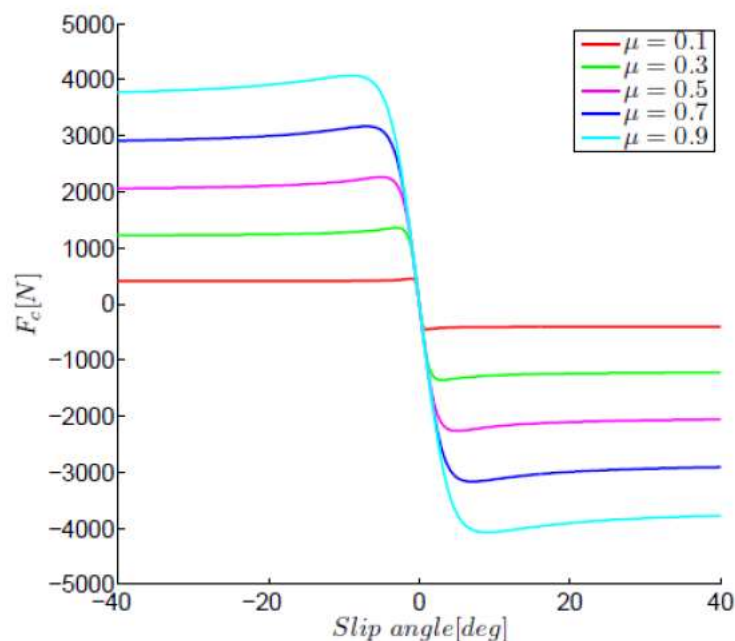


Рисунок 2.3 - Бічна сила.

Використання формули Расейка для розробки контролера також є набагато складнішою, що означає, що потрібно представити спрощену модель [44, 45, 46, 47]. З рисунка ми можемо легко побачити, що, виходячи з припущення, що кут бокового ковзання або коефіцієнт ковзання дуже малий, сила шини знаходиться в лінійній області.

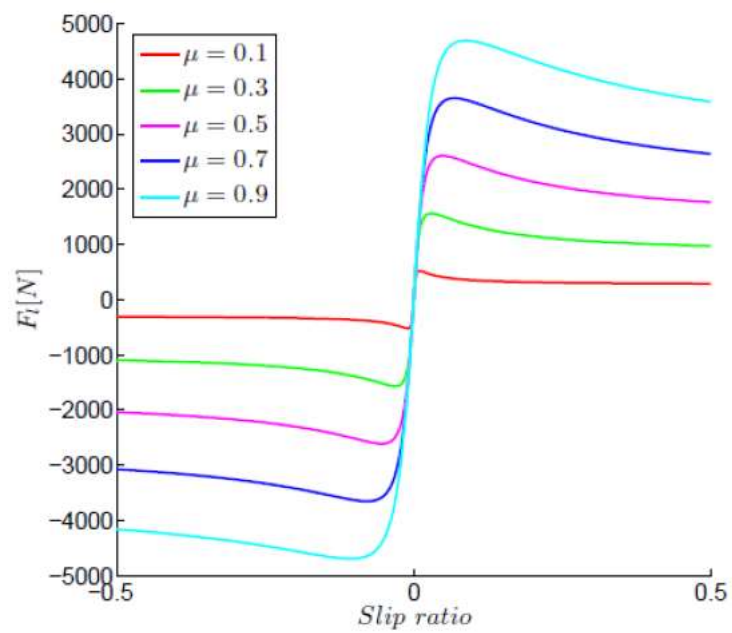


Рисунок 2.4 - Поздовжня сила.

Формулу можна змінити на:

$$F_C = C_\alpha \alpha \quad (2.21)$$

де, C_α – коефіцієнт жорсткості шини на поворотах, він пов'язаний з коефіцієнтом тертя та нормальною силою F_z .

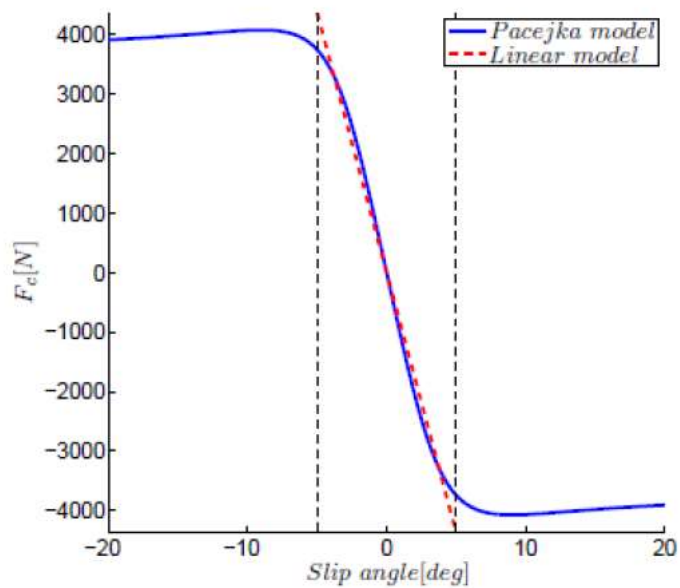


Рисунок 2.5 - Лінійна сила шини

На рис. 2.5 показано різницю між моделлю Расејка та лінійною моделлю. Лінійна модель шин є найпростішою, яку можна використовувати в динамічній моделі для проектування МРС-контролера без шкоди для продуктивності відстеження шляху.

2.3.3 Лінійна модель велосипеда

Для лінійної динамічної моделі, заснованої на припущенні малого кута, апроксимувати всі тригонометричні функції за допомогою розкладу Тейлора першого порядку:

$$\cos \theta = 1, \sin \theta = \theta, \tan \theta = \theta \quad (2.22)$$

Після цього кут бокового ковзання становить:

$$\alpha_f = \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}} - \delta_f, \quad \alpha_r = \frac{\dot{y} - b\dot{\phi}}{\dot{x}} \quad (2.23)$$

Комбіновані рівняння, бічна сила шини мають вигляд:

$$F_{cf} = C_f \left(\frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}} - \delta_f \right) \quad F_{cr} = C_r \left(\frac{\dot{y} - b\dot{\phi}}{\dot{x}} \right) \quad (2.24)$$

Підставивши рівняння, отримаємо лінійне динамічне рівняння.

$$\begin{aligned} m\ddot{y} &= -m\dot{x}\dot{\phi} + 2 \left[C_f \left(\frac{v_y + a\dot{\phi}}{v_x} - \delta_f \right) + C_r \frac{v_y - b\dot{\phi}}{v_x} \right] \\ I\ddot{\phi} &= 2aC_f \left(\frac{v_y + a\dot{\phi}}{v_x} - \delta_f \right) + 2bC_r \frac{v_y - b\dot{\phi}}{v_x} \end{aligned} \quad (2.25)$$

3 КОСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Розробка MPC-контролер для бокового керування

У цьому розділі представлено загальні знання про mpc, щоб показати, чому контролер використовує теорію mpc. Наступний розділ демонструє приклад простого контролера, який відстежує заданий шлях. Всередині контролера модель транспортного засобу є кінематичною моделлю через зменшення складності спочатку.

Решта цього розділу присвячена ілюстрації контролера, який зазвичай використовується для виконання функції відстеження шляху на основі динамічної моделі транспортного засобу.[17 18 19 20 21]

MPC – це метод керування процесом з різними обмеженнями. Хімічна промисловість вперше впровадила його на заводах з 1980-х років [48, 49. 50, 51]. Сьогодні використання цієї теорії керування поширилося на силову електроніку та автономне керування автомобілями завдяки перевазі оптимізації поточних часових інтервалів з урахуванням майбутніх часових інтервалів.

У процесі управління MPC є 3 критичні кроки: модель прогнозування, оптимізація кочення та корекція зворотного зв'язку.

Модель прогнозного керування оптимізує вихід установки протягом скінченного горизонту ітераційним способом (рис. 3.1). На кроці часу k початкове значення поточного стану установки відоме, вхідний сигнал керування розраховується для скінченних кроків у майбутньому $k = t + 0T; t + 1T; \dots; t + pT$, де p - це попередні кроки горизонту прогнозування. Під час розрахунку задача перейшла до задачі з відкритим циклом, обмеженнями та скінченим часом. У практичних ситуаціях лише перше значення послідовності керування може бути вхідним сигналом для системи. Через спрощення моделі та додавання перешкоди або інші види шуму, які можуть

спричинити похибку між прогнозованим виходом і фактичним виходом процесу.

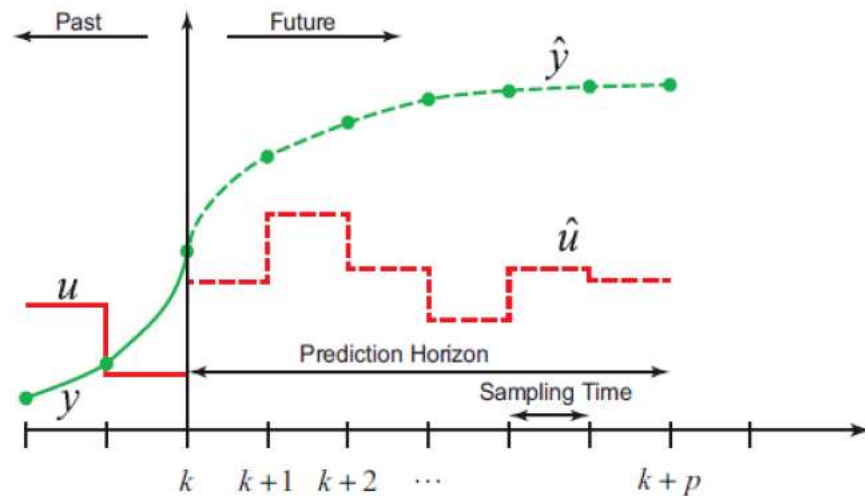


Рисунок 3.1 - Алгоритм MPC.

Таким чином, до об'єкта застосовується лише перший крок стратегії керування, а стан об'єкта вимірюється знову, щоб використовувати його як початковий стан для наступного часового кроку. Цей зворотний зв'язок вимірювальної інформації для оптимізатора додає стійкості до керування. Стан об'єкта знову вибірково вибирається, і весь процес повторюється знову з новоотриманими станами. Часове вікно прогнозування $[t + 0T; t + 1T; \dots; t + pT]$ зміщується вперед на кожному кроці часу (саме тому MPC також відомий як керування відступаючим горизонтом).

На рис. 3.2 показано загальний показник MPC, що використовується для автономного керування автомобілем.

Три основні компоненти - це динамічний оптимізатор, модель транспортного засобу, а також функція вартості та обмеження.

Вихідний сигнал з контролера mpc буде вхідним сигналом для транспортного засобу; тут контролер mpc призначений для поперечного керування, тобто вихідним сигналом є кут повороту керма. Зазвичай для

керування транспортним засобом нам також потрібні ще 2 параметри: дросельна заслінка та гальмо, які будуть розглянуті далі.

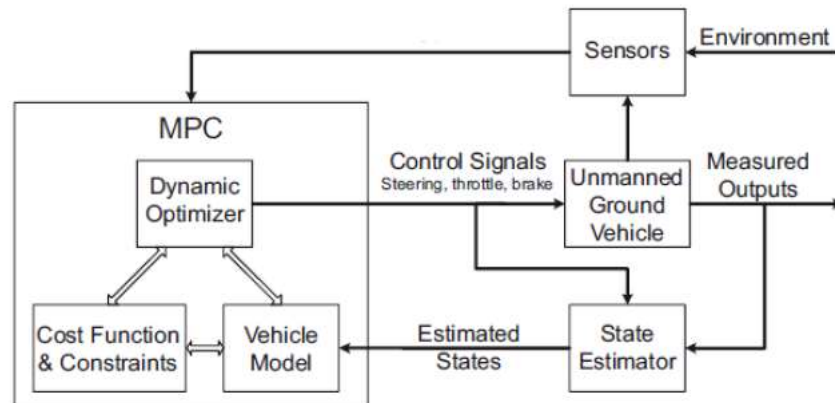


Рисунок 3.2 - Контролер MPC.

Наземний транспортний засіб можна моделювати в Simulink за допомогою окремого блоку. Оцінювач стану надає всі ознаки транспортного засобу, що відображає весь стан транспортного засобу. Вихід цього блоку буде вхідним сигналом для mpc як нова початкова умова розрахунку наступного часового кроку.

Завдання давача полягає в наданні інформації про навколишнє середовище, якою можуть бути межі двох доріг, положення перешкоди та наявність інших автомобілів.

3.2 LTI (лінійна незмінна в часі) модель прогнозного керування (MPC)

Алгоритм прогнозування керування на основі моделі LTI базується на моделі прогнозування LTI, яка також є загальноживаною моделлю в прогнозованому управлінні моделями. Порівняно з прогнозуванням керування нелінійною моделлю, перевага полягає в простоті обчислень та кращій продуктивності в реальному часі. Для автономного керування автомобілями

продуктивність алгоритму в реальному часі є важливим питанням, яке слід враховувати. З цієї причини тут представлено алгоритм прогнозування керування на основі моделі LTI.

Як було зазначено раніше, у наступних частинах ми розділимо обговорення на 3 теми: функція прогнозування, рішення для оптимізації та зворотний зв'язок.

Функція прогнозування:

Розглянемо наступну дискретну лінійну модель:

$$x(k+1) = A_{k,t}x(k) + B_{k,t}u(k) \quad (3.1)$$

Ми можемо встановити як:

$$\xi(k|t) = \begin{bmatrix} x(k|t) \\ u(k-1|t) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Нове рівняння простору станів:

$$\begin{aligned} \xi(k+1|t) &= \tilde{A}_{k,t}\xi(k|t) + \tilde{B}_{k,t}\Delta u(k|t) \\ \eta(k|t) &= \tilde{C}_{k,t}\xi(k|t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Вся матриця визначається як:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{k,t} &= \begin{bmatrix} A_{k,t} & B_{k,t} \\ 0 & I_m \end{bmatrix}, \tilde{B}_{k,t} = \begin{bmatrix} B_{k,t} \\ I_m \end{bmatrix} \\ \tilde{C}_{k,t} &= [C_{k,t} \quad 0] \end{aligned} \quad (3.4)$$

Для спрощення розрахунку, припущення щодо мети:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{k,t} &= \tilde{A}_t, k = 1, \dots, t+N-1 \\ \tilde{B}_{k,t} &= \tilde{B}_t, k = 1, \dots, t+N-1 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Враховуючи, що горизонт прогнозування дорівнює N_p , горизонт керування дорівнює N_c . Вихід послідовності керування та вихід системи на горизонті прогнозування дорівнюють розраховано за:

$$\begin{aligned}\xi(t + N_p | t) &= \tilde{A}_t^{N_p} \xi(t | t) + \tilde{A}_t^{N_p} \tilde{B}_t \Delta u(t | t) + \dots + \tilde{A}_t^{N_p - N_c - 1} \tilde{B}_t \Delta u(t + N_c | t) \\ \eta(t + N_p | t) &= \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p} \xi(t | t) + \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p - 1} \tilde{B}_t \Delta u(t | t) + \dots \\ &\quad + \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p - N_c - 1} \tilde{B}_t \Delta u(t + N_c | t)\end{aligned}\quad (3.6)$$

Щоб зробити зв'язок більш зрозумілим, встановіть вихід системи в майбутньому часі у вигляді матриці:

$$Y(t) = \Psi \xi(t | t) + \Theta \Delta U(t) \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}Y(t) &= \begin{bmatrix} \eta(t + 1 | t) \\ \eta(t + 2 | t) \\ \dots \\ \eta(t + N_c | t) \\ \dots \\ \eta(t + N_p | t) \end{bmatrix} \quad \Psi_t = \begin{bmatrix} \tilde{C}_t \tilde{A}_t \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^2 \\ \dots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c} \\ \dots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p} \end{bmatrix} \quad \Delta U(t) = \begin{bmatrix} \Delta u(t | t) \\ \Delta u(t + 1 | t) \\ \dots \\ \Delta u(t + N_c | t) \end{bmatrix} \\ \Theta_t &= \begin{bmatrix} \tilde{C}_t \tilde{B}_t & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{B}_t & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c - 1} \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c - 2} \tilde{B}_t & \dots & \tilde{C}_t \tilde{B}_t \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c} \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c - 1} \tilde{B}_t & \dots & \tilde{C}_t \tilde{A}_t \tilde{B}_t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p - 1} \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p - 2} \tilde{B}_t & \dots & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p - N_c - 1} \tilde{B}_t \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3.8)$$

З рівняння ми визначаємо змінну стану, а вихід на горизонті прогнозування розраховується за поточним станом $\xi(t|t)$ та приростом керування ΔU , який є функцією прогнозування.

Рішення для оптимізації.

Фактично, приріст контролю невідомий для нас лише після встановлення цілі вимогу та вирішує її. Зрештою, ми можемо отримати керуючу послідовність у горизонті прогнозування.

$$J(k) = \sum_{j=1}^N \chi^T(k+j|k) Q \chi^T(k+j|k) + u^T(k+j-1|k) R u(k+j-1|k) \quad (3.9)$$

Встановивши цільову функцію як верхню, за допомогою певного методу ми можемо перевести її до задачі квадратичного програмування. Квадратне програмування (КП) – це процес розв'язання спеціального типу задачі математичної оптимізації, зокрема, задачі квадратичної оптимізації (з лінійними обмеженнями), тобто задачі оптимізації (мінімізації або максимізації) квадратичної функції кількох змінних з урахуванням лінійних обмежень на ці змінні. Квадратне програмування – це особливий тип нелінійного програмування.

Рівняння встановлює керуючу величину як величину стану в цільовій функції, але з деяким недоліком, таким як відсутність можливості встановити обмеження на приріст керування. Отже, якщо ми змінимо приріст керування як величину стану. Оптимізована цільова функція:

$$J(\xi(t)), u(t-1), \Delta U(t) = \sum \|\eta(t+i|t) - \eta_{ref}(t+i|t)\|_{2_Q}^2 + \sum \|\Delta u(t+i|t)\|_{2_R}^2 \quad (3.10)$$

Q та R – це вагова матриця, все рівняння використовується для відстеження бажаного шляху. Водночас воно повинно базуватися на деяких обмеженнях, таких як:

Обмеження кількості контролю:

$$u_{\min}(t+k) \leq u(t+k) \leq u_{\max}(t+k), k = 0, 1, \dots, N_c - 1 \quad (3.11)$$

Обмеження приросту керування:

$$\Delta u_{\min}(t+k) \leq \Delta u(t+k) \leq \Delta u_{\max}(t+k), k = 0, 1, \dots, N_c - 1 \quad (3.12)$$

Обмеження на виході:

$$y_{\min}(t+k) \leq y(t+k) \leq y_{\max}(t+k), k = 0, 1, \dots, N_c - 1 \quad (3.13)$$

На цьому процес оптимізації завершено. Розв'язавши всі ці рівняння з різними обмеженнями, можна розрахувати послідовність керування в майбутньому часі.

Зворотній зв'язок.

Після розв'язання всіх рівнянь, послідовність приростів керування в майбутній час:

$$\Delta U_t^* = [\Delta u_t^*, \Delta u_{t+1}^*, \dots, \Delta u_{t+N_c-1}^*] \quad (3.14)$$

На основі теорії прогнозного керування моделями, встановлення першого елемента в послідовності як вхідного керування для системи.

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u_t^* \quad (3.15)$$

Система виконує керуючі вхідні дані до наступного кроку часу. На наступному кроці система на основі поточної інформації прогнозує майбутній результат.

3.3 Нелінійне моделювання прогнозного керування

Для використання лінійної моделі прогнозного керування першою вимогою є лінеаризована модель динаміки транспортного засобу. Окрім нелінійної моделі прогнозного керування, лінійна модель прогнозного керування є другим варіантом. Оскільки дослідження тривають, нелінійна модель прогнозного керування використовується все частіше.

Для нелінійної системи розглянемо таку модель:

$$\begin{aligned}\xi(t+1) &= f(\xi(t), u(t)) \\ \xi(t) &\in \mathcal{X}, u(t) \in \Gamma\end{aligned}\tag{3.16}$$

Де f – передавальна функція системи, ξ – n -вимірний стан, m – вимір керування, $\mathcal{X}$ – обмеження стану, Γ – обмеження керування.

Множина $f(0,0)$ є стабільною точкою системи, а також ціллю керування системою. Для будь-якого часового горизонту N розглянемо наступну цільову функцію J_N :

$$J_N(\xi(t), U(t)) = \sum_{k=t}^{t+N-1} l(\xi(k), u(k)) + P(\xi(t+N))\tag{3.17}$$

Де $U(t)$ – це послідовність керування на горизонті N , $\xi(t)$ – це послідовність усіх змінних стану під вхідною послідовністю керування. У середині цільової функції J_N перший елемент представляє здатність відстеження, другий елемент – обмеження.

У поєднанні з моделлю та цільовою функцією, нелінійне моделювання прогнозного керування має на меті вирішити задачу за будь-яких обмежень на кожному кроці часу.

Наприклад:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & J_N(\xi_t, U_t) \\
 \text{s. t} \quad & \xi_{k+1,t} = f(\xi_{k,t}, u_{k,t}), \quad k = t, \dots, N-1 \\
 & \xi_{k,t} \in \chi \quad k = t, \dots, N-1 \\
 & u_{k,t} \in \Gamma \quad k = t, \dots, N-1 \\
 & \xi_{k,t} = \xi(t) \\
 & \xi_{N,t} \in \chi_{\text{fin}}
 \end{aligned}$$

Якщо ми отримаємо результати з рівняння, які задовольняють усі вимоги та обмеження, то оптимальна послідовність керування $U(t)$ буде відповідати умовам. Виходячи з теорії прогнозного керування моделлю, перший елемент, який знаходиться всередині послідовності керування, встановлюється як вхід для керованої системи.

На наступному кроці система отримує новий поточний стан і розв'язує рівняння; продовжуйте встановлювати перший елемент як вхідні дані системи. Для будь-якої нелінійної системи під час розрахунку існує $N(n+m)$ змінних, n N нелінійних обмежень, а також обмеження на приріст керування та вихідні обмеження.

Отже, чим більший ступінь свободи динамічної системи, тим більша обчислювальна потужність потрібна. У нашому випадку динамічна модель транспортного засобу має 3 ступені свободи, перевага прогнозного керування нелінійною моделлю все ще існує. В іншому випадку, для моделі транспортного засобу з високим ступенем свободи потрібне деяке спрощення, щоб відповідати вимозі в режимі реального часу.

3.4 Чисельний метод для нелінійної системи

У нелінійній моделі прогнозного керування, за допомогою нелінійної моделі, поточного стану та послідовності керування, прогнозується майбутній стан системи.

Це ітераційний процес, але з невідомою послідовністю керування. З цієї причини для отримання наближеного розв'язку диференціального рівняння потрібне ітераційне рівняння.

Зазвичай існує 2 методи, один - метод Ейлера, а інший - метод Рунге-Кутта.

Метод Ейлера (також званий методом прямого Ейлера) — це числова процедура першого порядку для розв'язання звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР) із заданим початковим значенням. Це найпростіший явний метод числового інтегрування звичайних диференціальних рівнянь.

Метод Ейлера є методом першого порядку, що означає, що локальна похибка (похибка на крок) пропорційна квадрату розміру кроку, а глобальна похибка (похибка в заданий момент часу) пропорційна розміру кроку. Метод Ейлера часто служить основою для побудови складніших методів.

Для диференціального рівняння:

$$y'(t) = f(t, y(t)) \quad (3.18)$$

Використовуючи метод Ейлера, результат за час $n+1$ можна обчислити з часу n . Ітераційне рівняння має вигляд

$$y_{n+1} = y_n + hf(t_n, y_n) \quad (3.19)$$

Але зазвичай цей метод має дуже низький рівень точності. Тому в деяких випадках ми намагаємося використовувати інший метод.

Методи Рунге-Кутта — це сімейство неявних та явних ітераційних методів, до яких належить добре відомий метод Ейлера, що використовується в часовій дискретизації для наближених розв'язків звичайних диференціальних рівнянь.

Зазвичай метод такий:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$t_{n+1} = t_n + h$$

$$k_1 = hf(t_n, y_n)$$

$$k_2 = hf(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2})$$

$$k_3 = hf(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2})$$

$$k_4 = hf(t_n + h, y_n + k_3)$$

Тут потрібно уточнити одне важливе питання: чим більша точність результатів нам потрібна, тим нижча швидкість обчислень.

3.5 Динамічна модель у координатах шляху

Для керування автономними автомобілями важливо представити динамічну модель у координатах траєкторії. Виходячи з припущення про постійну поздовжню швидкість, можна знайти зв'язок між траєкторією $r(s)$ та швидкістю риськування:

$$r(s) = \kappa(s)v_x \quad (3.20)$$

Після цього бічне прискорення визначається як:

$$\begin{aligned}
\dot{v}_y(s) &= \kappa(s)v_x^2. \\
\ddot{e}_{cg} &= (\dot{v}_y + v_x r) - \dot{v}_y(s) \\
&= \dot{v}_y + v_x(r - r(s)) \\
&= \dot{v}_y + v_x \dot{\theta}_e. \\
\dot{e}_{cg} &= v_y + v_x \sin(\theta_e)
\end{aligned} \tag{3.21}$$

де, e_{cg} - ортогональна відстань від центру тяжіння до бажаного шляху;

θ_e - визначається як $\theta - \theta_p$

$$\begin{aligned}
\ddot{e}_{cg} - v_x \dot{\theta}_e &= \frac{-(c_f + c_r)}{mv_x} (\dot{e}_{cg} - v_x \theta_e) \\
&\quad + \left[\frac{\ell_r c_r - \ell_f c_f}{mv_x} - v_x \right] (\dot{\theta}_e + r(s)) + \frac{c_f}{m} \delta \\
\ddot{e}_{cg} &= \frac{-(c_f + c_r)}{mv_x} \dot{e}_{cg} + \frac{c_f + c_r}{m} \theta_e \\
&\quad + \frac{\ell_r c_r - \ell_f c_f}{mv_x} \dot{\theta}_e + \left[\frac{\ell_r c_r - \ell_f c_f}{mv_x} - v_x \right] r(s) + \frac{c_f}{m} \delta
\end{aligned} \tag{3.22}$$

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta}_e + \dot{r}(s) &= \frac{\ell_r c_r - \ell_f c_f}{I_z v_x} (\dot{e}_{cg} - v_x \theta_e) \\
&\quad + \frac{-(\ell_f^2 c_f + \ell_r^2 c_r)}{I_z v_x} (\dot{\theta}_e + r(s)) + \frac{\ell_f c_f}{m} \delta \\
\ddot{\theta}_e &= \frac{\ell_r c_r - \ell_f c_f}{I_z v_x} \dot{e}_{cg} + \frac{\ell_f c_f - \ell_r c_r}{I_z} \theta_e \\
&\quad + \frac{-(\ell_f^2 c_f + \ell_r^2 c_r)}{I_z v_x} (\dot{\theta}_e + r(s)) + \frac{\ell_f c_f}{m} \delta - \dot{r}(s)
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Таким чином, модель простору станів у змінних помилки відстеження задається так:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{e}_{cg} \\ \ddot{e}_{cg} \\ \dot{\theta}_e \\ \ddot{\theta}_e \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(c_f+c_r)}{mv_x} & \frac{c_f+c_r}{m} & \frac{\ell_f c_f - \ell_r c_r}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{\ell_r c_r - \ell_f c_f}{I_z v_x} & \frac{\ell_f c_f - \ell_r c_r}{I_z} & \frac{-(\ell_f^2 c_f + \ell_r^2 c_r)}{I_z v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{cg} \\ \dot{e}_{cg} \\ \theta_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{c_f}{m} \\ 0 \\ \frac{\ell_f c_f}{I_z} \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\ell_r c_r - \ell_f c_f}{mv_x} - v_x \\ 0 \\ \frac{-(\ell_f^2 c_f + \ell_r^2 c_r)}{I_z v_x} \end{bmatrix} r(s)
\end{aligned} \tag{3.24}$$

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1 Огляд теорії ПД-регулювання

Після обговорення поздовжнього керування обов'язковим є аналіз поздовжнього керування. У цьому розділі основна увага приділяється використанню теорії ПД-керування для проектування нашого поздовжнього регулятора.

Спочатку представлено загальний огляд ПД-регулятора, після чого розраховується бажаний профіль швидкості як опорний для контролера [12-15]. Оскільки поздовжня та поперечна динаміка транспортного засобу пов'язані, для загального розуміння було отримано найпростішу частину, а саме еліптичну модель шини.

ПД-регулятор складається з 3 частин: пропорційної частини, інтегральної частини та похідної частини. Він в основному використовується для лінійних систем, що не змінюють час.

ПД-регулятор є найпоширенішим контролером, що використовується в галузі промислового управління. Загальна теорія стосується технології зворотного зв'язку за контуром керування. Він приймає значення стану системи та порівнює його з опорним.

На основі цієї похибки застосовується корекція, яка враховує пропорційні, інтегральні та похідні члени (позначені відповідно P, I та D), звідси й назва.

Головною метою контролера є забезпечення бажаного значення на виході системи. ПД-контролер регулює вхідні дані відповідно до даних історії та похибки, щоб зробити систему стабільнішою.

У деяких застосуваннях немає обов'язкового використання всіх 3 частин контролера. Зазвичай іноді в контролері представлені лише ПІ-, ПД- або лише П-частини.

На рис. 4.1 показано основні принципи теорії та те, як ці 3 частини застосовуються до системи. Відповідно до значення похибки, яке є різницею між бажаним заданим значенням та виходом процесу, контролер генерує керуючий вхід за алгоритмом ПІД, і цей вхід намагається мінімізувати значення похибки.

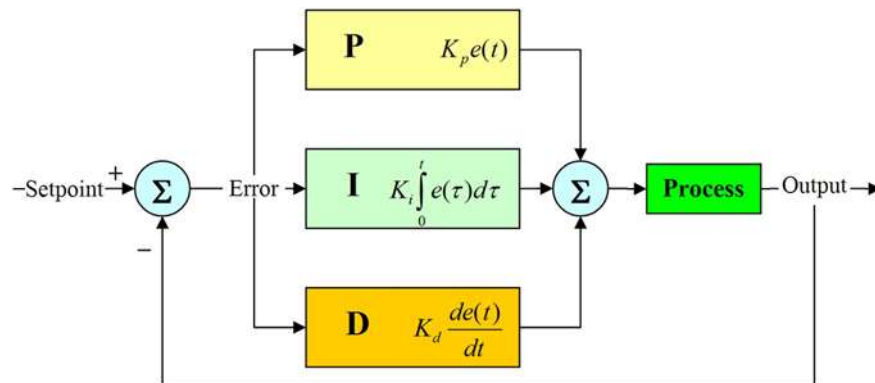


Рисунок 4.1 – Схема ПІД регулятора

«П» означає пропорційність поточному значенню похибки. За допомогою коефіцієнта підсилення «K» значення похибки безпосередньо помножується, використовуючи пропорційну характеристику для компенсації системи.

«І» представляє минуле значення похибки та інтегрує його з плином часу. Через умову, що після пропорційного керування все ще існує похибка між поточним станом і бажаним, яка називається залишковою похибкою. Частини «І» намагаються усунути залишкову похибку. Коли залишкова похибка стає рівною 0, інтеграл перестає зростати.

«Д» – це частина, яка враховує майбутню тенденцію похибки. За допомогою виведення значення похибки завдання цієї частини полягає у зменшенні швидкості зміни значення похибки, щоб зробити його стабільнішим.

Повну функцію можна виразити як:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t') dt' + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

Де K_p позначають пропорційні члени, K_i позначають інтегральні члени, а K_d позначають похідну частину.

4.2 Впровадження поздовжнього контролю

Після обговорення поперечного керування автономними автомобілями, важливо також приділити час поздовжньому керуванню, оскільки транспортний засіб не може рухатися з постійною швидкістю.

Сьогодні багато роботи та досліджень спрямовано на вирішення проблем безпеки, тому навіть сьогодні мільйони людей отримують травми внаслідок автомобільних аварій. Саме тому кожен виробник автомобілів намагається використовувати системи допомоги водієві (ADAS), щоб зменшити цю велику кількість. Іншими словами, ADAS – це також низький рівень автономного керування автомобілями.

Одним із поширених методів є модель багатоточкового попереднього перегляду [24]. Ця модель розділяє бажаний шлях попереду транспортного засобу на кілька точок на основі відхилення між точкою та поточною смугою руху, генеруючи сигнал кута повороту керма та дросельної заслінки/гальма.

Активний круїз-контроль (ACC) також використовується більшістю транспортних засобів. Головною метою є підтримка швидкості автомобіля та безпечної дистанції між автомобілями. Алгоритм керування на основі трс генерується [25] з перевагою мінімального споживання палива.

Оскільки автомобіль є системою, всі її частини тісно пов'язані одна з одною.

Тут ми лише визначимо деякі важливі частини, такі як:

Поздовжні та поперечні рухи є кінематичними та динамічними пов'язаними через рух ризанням.

Коли транспортний засіб розганяється або повертає, виникають поздовжні та поперечні прискорення. Завдяки цьому відбувається перенесення навантаження, і транспортний засіб більше не перебуває у статичному стані.

Обмеження сили шини, яке називається еліптичною моделлю шини, пов'язане в поздовжньому та поперечному напрямках.

Складно враховувати всі ефекти одночасно. Необхідна нелінійна динамічна модель, щоб врахувати всі ефекти. Оскільки в поперечному контролері, розробленому на основі теорії μ рс, витрачається багато часу на обчислення. Якщо в поздовжньому контролері також використовується нелінійна модель, це стане великим викликом для процесора даних всередині автомобіля. У той час як продуктивність у реальному часі є головним пріоритетом усієї системи.

З метою спрощення, тут поздовжній контролер розроблено на основі теорії PID, використовуючи попередньо визначену кривизну траєкторії руху перед транспортним засобом, отримуючи дані з камери та розраховуючи бажану швидкість під час повороту. Тут поперечний та поздовжній пов'язані ефекти впливають на максимальну силу тертя шини. Виходячи з бажаної та поточної швидкості, виходом поздовжнього контролера є сигнал педалі дросельної заслінки або гальма для імітації водія, і зручно безпосередньо надсилати цей сигнал до електронного блоку керування в автономних автомобілях.

4.3 Генерація бажаної швидкості

Під час повороту автомобіля важливо чітко розуміти взаємозв'язок між кутом повороту керма та відцентровою силою. Якщо шина не може створити достатньо зусилля для збалансування відцентрової та аеродинамічної сил, автомобіль втратить керування, що називається недостатнім/надмірним підкеруванням.

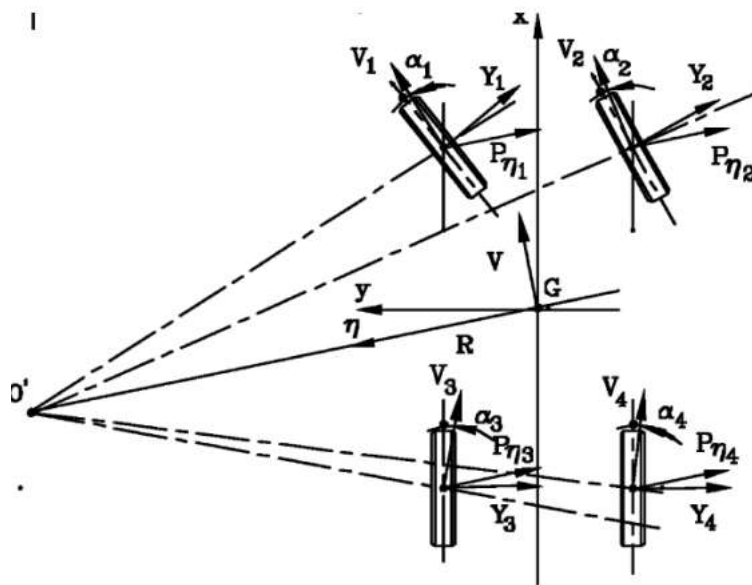


Рисунок 4.2 - розподіл сили на 4 колесах.

З рис. 4.2 видно: ми припускаємо, що транспортний засіб рухається по рівній дорозі, і нехтуємо аеродинамічною силою, оскільки потрібна нам проста модель. Враховуючи відцентрову силу та силу тертя шин у η напрямок для завершення рівняння рівноваги.

$$\frac{mV^2}{R} = \sum P_{\eta} \quad (4.2)$$

Тут ми припускаємо, що P_{η} поєднуються з бічною силою повороту шини F_y . Вертикальна сила на кожній шині вважається однаковою, що

означає, що всі шини мають однаковий коефіцієнт тертя μ . Виходячи з усіх цих припущень, підхід називається ідеальним кермуванням.

$$\begin{aligned} F_Z &= \sum F_Z \\ F_Z &= mg \end{aligned} \quad (4.3)$$

У поєднанні з усіма верхніми рівняннями

$$\begin{aligned} \frac{mV^2}{R} &= \mu_y mg \\ \frac{1}{R} &= K \end{aligned} \quad (4.4)$$

де, k позначає кривизну дороги. Таким чином, ми можемо отримати бажану швидкість:

$$V_{x-\max} = \sqrt{\frac{g\mu}{|k|}} \quad (4.5)$$

Щоб зробити висновок у цьому розділі, за кривизною дороги розраховується максимальна швидкість. Це одне з обмежень поздовжнього регулятора, інакше транспортний засіб виїде за межі смуги руху.

Максимальна швидкість є опорною швидкістю ПД-регулятора, час від часу регульований пристрій розраховує похибку між поточною швидкістю та максимальною. На основі помилки контролер генерує сигнал педалі дросельної заслінки/гальма для керування швидкістю автомобіля.

4.4 Спільний вплив між поздовжнім та поперечним напрямком

Після визначення максимальної швидкості обов'язково необхідно дослідити взаємозв'язок між пов'язаним впливом поздовжнього та поперечного напрямку. Раніше сила генерувалася окремо, лише поперечна сила використовувалася для керування кермом транспортного засобу та дослідження характеристик автономних автомобілів.

Але тепер, завдяки наявності поздовжнього контролера, сили на шини генеруються в обох напрямках одночасно. Сама умова змінюється, і необхідно дослідити обмеження та взаємозв'язки, щоб переконатися в хороших результатах.

З дослідження, коли збільшується поздовжня сила шини, що має певний кут бічного ковзання, сила в бічному напрямку зменшується. Результат такий самий, як показано на рис. 4.3

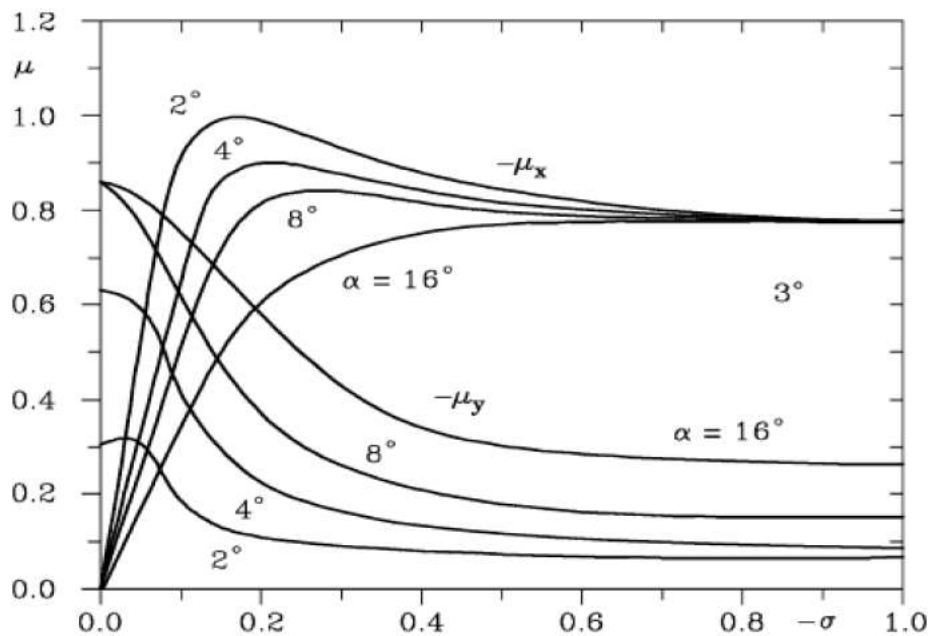


Рисунок 4.3 - Коефіцієнт тертя як функція коефіцієнта ковзання

Прикладаючи рушійний або гальмівний момент до шини з певним кутом бічного ковзання, форма коефіцієнта тертя змінюється вздовж різного кута бічного ковзання.

Набір експериментальних даних показує поздовжню силу по осі x , а поперечну силу по осі y з постійним кутом бокового ковзання. Результати показано на рис. 4.4.

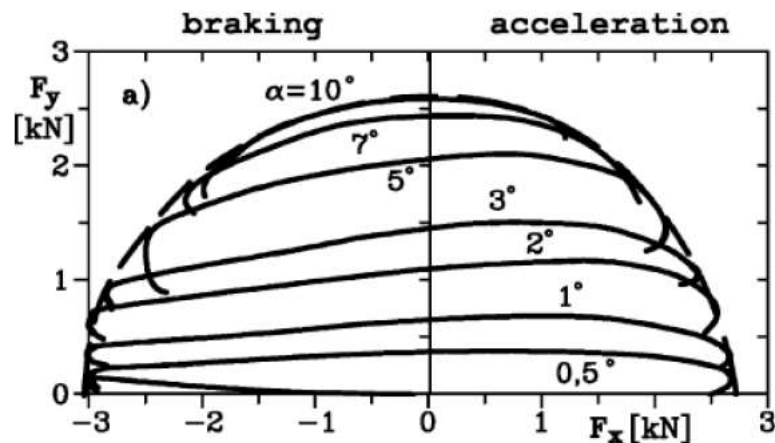


Рисунок 4.4 - Поздовжня та поперечна сила на основі експериментальних даних

Окрім кута бокового ковзання, на криву силу впливають деякі інші параметри, такі як швидкість автомобіля, шина та стан дороги. Різні матеріали та розподіл різних шарів також мають свій вплив.

З метою спрощення, модель призначена для апроксимації кривої. Використовуючи еліптичну апроксимацію, поведінка шини представлена рівнянням:

$$\left(\frac{F_y}{F_{y0}}\right)^2 + \left(\frac{F_x}{F_{x0}}\right)^2 = 1 \quad (4.6)$$

Де F_{y0} – це бічна сила при заданому куті бокового ковзання за відсутності прикладеної поздовжньої сили. F_{x0} – це максимальна поздовжня

сила за відсутності бічної сили, що означає відсутність кута бокового ковзання.

Використовуючи жорсткість на поворотах C_0 , замініть бічну силу:

$$\left(\frac{C\alpha}{C_0\alpha}\right)^2 + \left(\frac{F_x}{F_{x_0}}\right)^2 = 1 \quad (4.7)$$

Нарешті, еліптична модель шини створюється для демонстрації парного ефекту поперечного та поздовжнього напрямку на рис. 4.5.

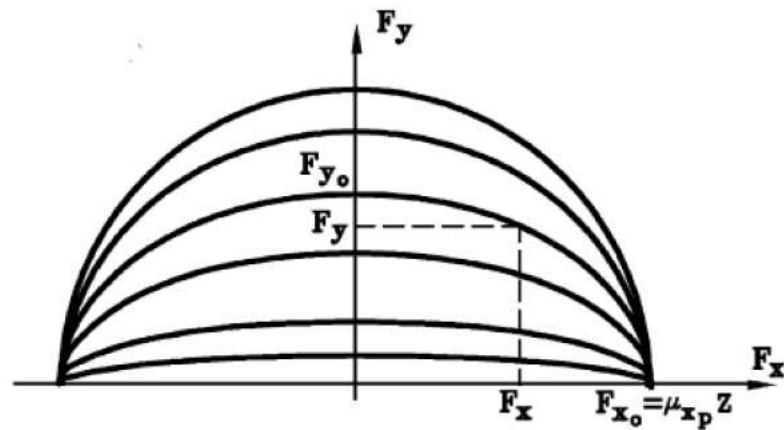


Рисунок 4.5 - Еліптична модель

На основі вихідного сигналу контролера трс, кута повороту керма та кута бокового ковзання шини, бічну силу, необхідну для прикладання до шини, розраховують за формулою:

Slip angles:

$$\alpha_f = \tan^{-1}\left(\frac{v_y + l_r r}{v_x}\right) - \delta$$

$$\alpha_r = \tan^{-1}\left(\frac{v_y - l_r r}{v_x}\right)$$

Lateral forces:

$$F_{yf} = C_f \alpha_f$$

$$F_{yr} = C_r \alpha_r$$

Підставляючи поперечну силу в еліптичну модель, генерується доступна поздовжня сила. Доступна поздовжня сила, поділена на масу транспортного засобу, є межею прискорення транспортного засобу. Ця межа є ще одним обмеженням ПД-регулятора

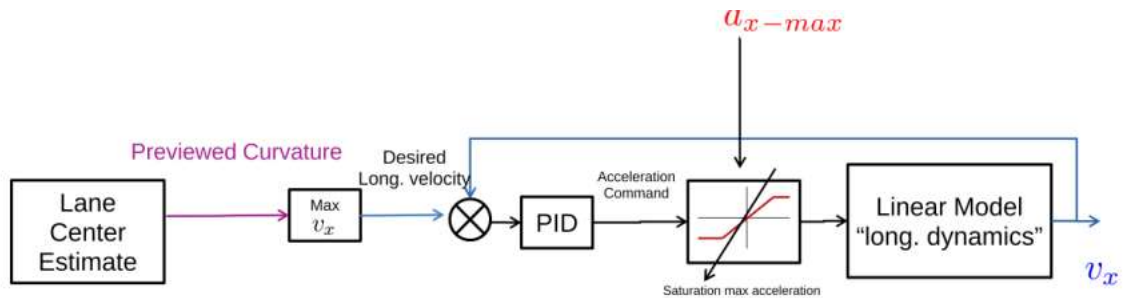


Рисунок 4.6 - Послідовність поздовжнього контролю

На рис. 4.6 представлено послідовність даних. Починаючи з блоку оцінки центру смуги руху, який буде детально розглянуто в наступному розділі, розраховується кривизна шляху. Після цього, завдяки характеристикам прогнозування MPC-контролера, попередня кривизна дорівнює поточній кривизні плюс значення похідної кривизни, помножене на горизонт прогнозування. На основі максимальної попередньої кривизни генерується максимальна опорна швидкість, яка надсилається до PID-контролера відповідно до різниці між бажаною швидкістю та поточною швидкістю, вихідним сигналом є сигнал прискорення. Межа коефіцієнта насичення враховує максимальну поздовжню силу, доступну для шини. Беручи до уваги ефект пари у двох напрямках, система надає перший пріоритет поперечному керуванню, інакше транспортний засіб виїде зі смуги руху. Всередині лінійної моделі поздовжнього динамічного блоку, за допомогою простої передавальної функції, вхідний сигнал, який є прискоренням, перетворюється на вихідний сигнал, який є швидкістю. Використовуючи цю швидкість, повторно надсилайте її до MPC-контролера

для оновлення всіх станів всередині моделі. Загальна архітектура поздовжнього та поперечного контролера показана на рис. 4.7.

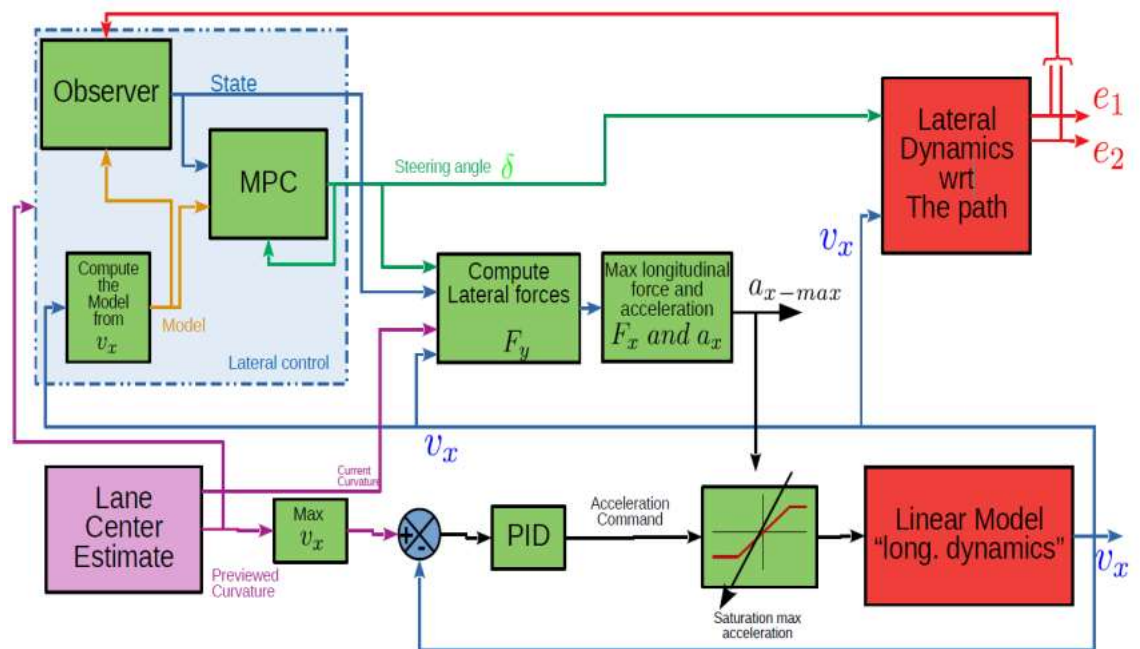


Рисунок 4.7 - Загальна архітектура алгоритму керування

5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1. Впровадження моделі та розвиток MPC в Simulink

У цьому розділі представлено середовище моделювання на основі Matlab та Simulink, щоб продемонструвати загальні функції блоків. Тестовий стенд, розроблений у Simulink за допомогою деяких прикладів, наданих компанією Matlab. Він є основою для нашого процесу, що дає можливість перевірити продуктивність алгоритму керування.

Модель Carsim також введена в нашу систему як s-функція, оскільки вона є більш комплексною моделлю, що враховує аеродинамічну силу та деякі динамічні ефекти транспортного засобу. Це робить продуктивність більш надійною.

Спочатку ми показуємо результати лише з MPC-контролером, щоб побачити продуктивність автономного автомобіля з постійною швидкістю. Потім математична модель Carsim, що представляє всю систему транспортного засобу, вводиться в Simulink, щоб побачити вплив динаміки транспортного засобу, такий як передача навантаження. Після цього результати пов'язані з умовами, включаючи як поздовжній, так і поперечний контролер.

Усередині Carsim передбачено процедуру функції утримання смуги руху, яка ідентична нашому проєкту. Це надає можливість проводити бенчмаркінг з Carsim. Один і той самий сценарій генерується як у Carsim, так і в Simulink. Порівнюються результати двох методів.

5.1 Середовище Simulink

Використання Matlab для моделювання автономних автомобілів пояснюється тим, що це потужна обчислювальна модель та різноманітний набір інструментів, які можна безпосередньо використовувати в нашому проєкті, такий як набір інструментів прогнозного керування моделлю та набір інструментів автоматизованої системи водіння.

Інструментарій автоматизованої системи водіння надає алгоритми та інструменти для проектування та моделювання систем автономного водіння. Система дає можливість генерувати різні сценарії, включаючи всю інформацію про дорожній рух, моделювати весь датчик, вбудований в автомобіль, та обробляти дані.

На рис. 5.1 представлено загальне середовище нашої моделі Simulink, яке можна розділити на кілька частин.

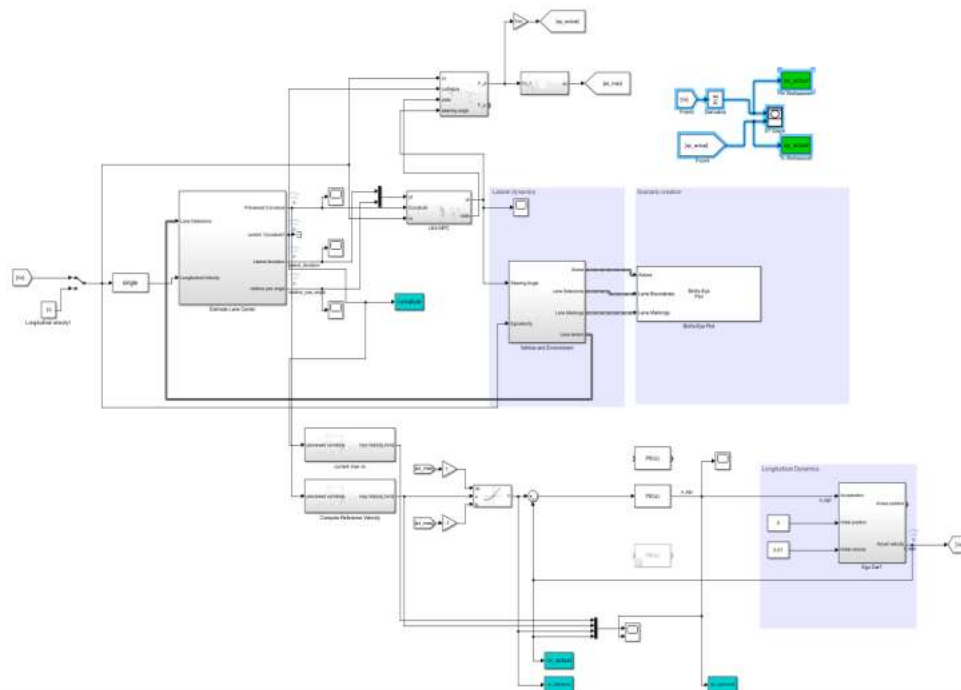


Рисунок 5.1 - Загальне середовище Simulink

Як обговорювалося раніше, є поздовжні та поперечні частини керування, частини транспортного засобу та навколишнього середовища, оцінка центральної частини смуги руху для імітації отримання датчиком даних про траєкторію руху транспортного засобу.

Загальний ідеал нашої системи полягає в тому, щоб утримувати транспортний засіб у своїй смугі руху та слідувати за криволінійною дорогою, контролюючи кут повороту переднього колеса. Ця мета досягається шляхом зменшення бічного відхилення e_1 та відносного кута рискання e_2 . Як показано на рис. 5.2.

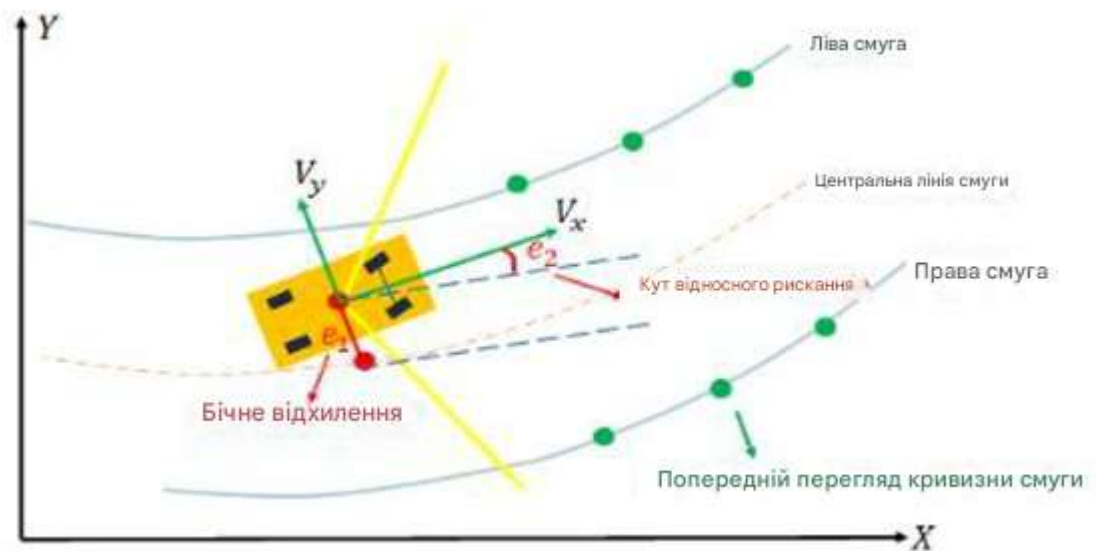


Рисунок 5.2 - Бічне відхилення та кут відносного рискання.

Контролер розраховує кут повороту керма для автомобіля з власним двигуном на основі наступних вхідних даних:

1. Попередній перегляд кривизни (отриманий з виявлення смуг руху)
2. Поздовжня швидкість Его.
3. Бічне відхилення (отримане з виявлення смуг руху).
4. Відносний кут ризику (отриманий з виявлення смуг руху).

Використовуючи функцію, що представляє динамічну модель транспортного засобу, вказуючи кут повороту керма та поздовжню швидкість, ми можемо отримати стан транспортного засобу під час руху. Вихідні дані можуть бути такими:

1. Поздовжнє положення автомобіля (координата X).
2. Бічне положення (координата Y).
3. Поздовжня швидкість.
4. Бічна швидкість.
5. Кут рискання.
6. Швидкість рискання.

Всі ці дані використовуються для оцінки поточного стану автономного автомобіля та повторної їх відправки до нашого контролера для корекції керуючої змінної на наступному кроці, який ми детальніше обговорили в розділі 2.

Транспортний засіб та деталі навколишнього середовища представлено на рис. 5.3.

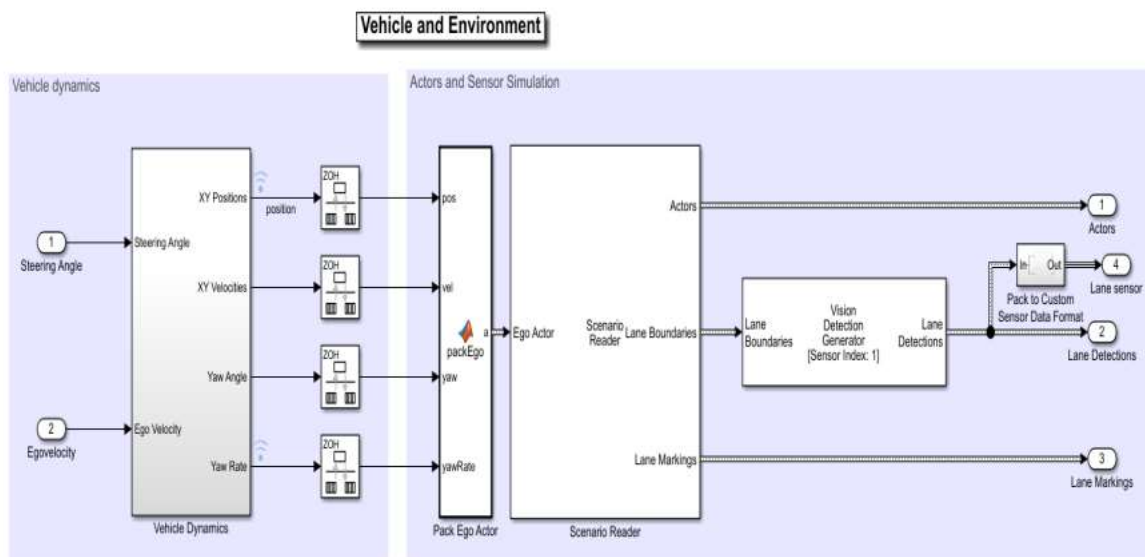


Рисунок 5.3 - Частина транспортного засобу та навколишнього середовища

Надаючи зчитувачу сценаріїв можливість тестувати різні сценарії, він генерує ідеальні межі лівої та правої смуг руху на основі положення транспортного засобу. За допомогою виявлення смуги руху можна відстежувати попередньо визначену кривизну, розмітку смуги руху, відносний кут ризикування та бічне відхилення.

Сценарій, який включає інформацію про дорогу, лінії шляху, автомобіль, яким керує контролер, та інший автомобіль як перешкоду на своєму шляху руху, використовується для перевірки ефективності алгоритмів керування. На рис. 5.4 показано різні сценарії.

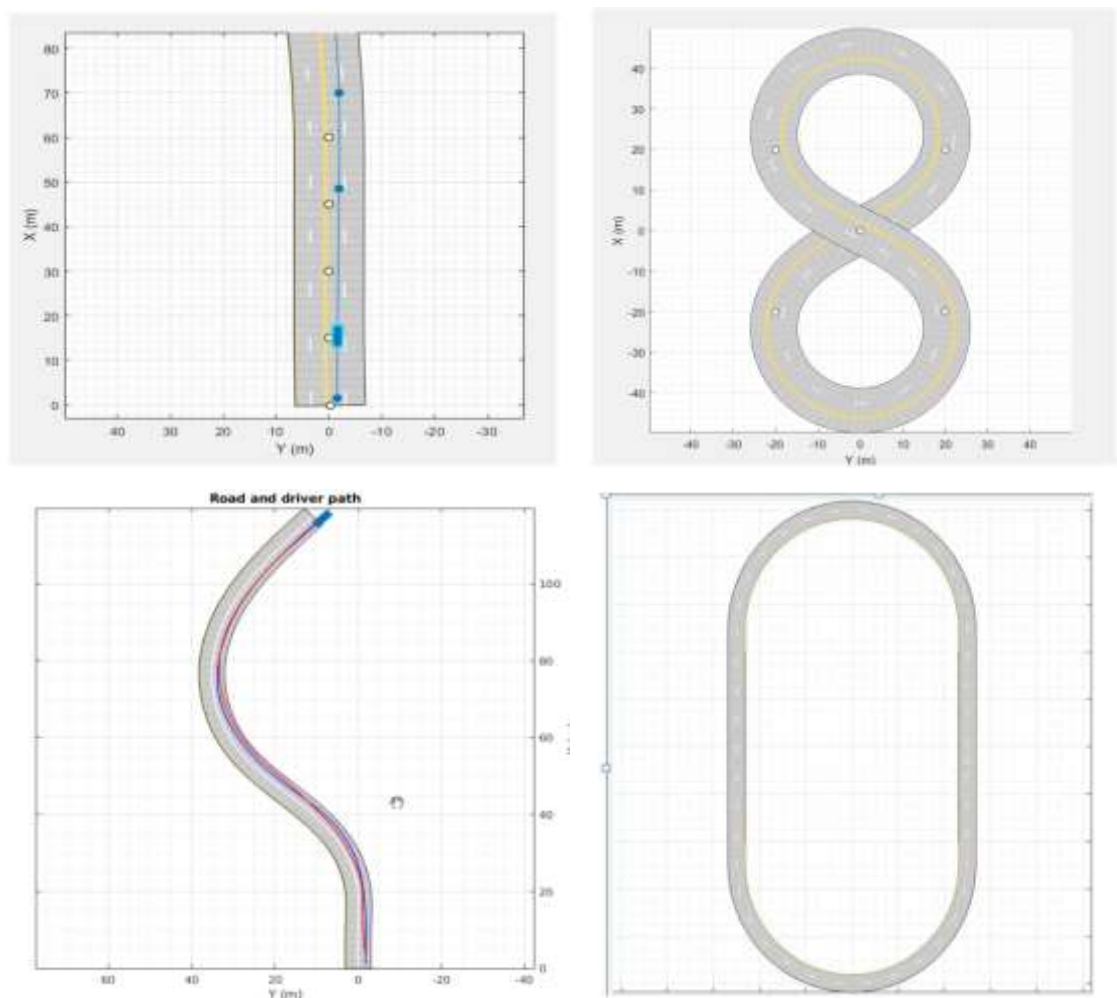


Рисунок 5.4 – Різні сценарії моделювання.

5.2 Моделювання співпраці з Carsim

Carsim – це програмне забезпечення, розроблене корпорацією Mechanical Simulation Corporation; воно в основному використовується для моделювання динамічної поведінки транспортного засобу. Програмне забезпечення моделює результати реакції з урахуванням вхідних даних такі як керування водієм, стан дороги та аеродинамічна сила.

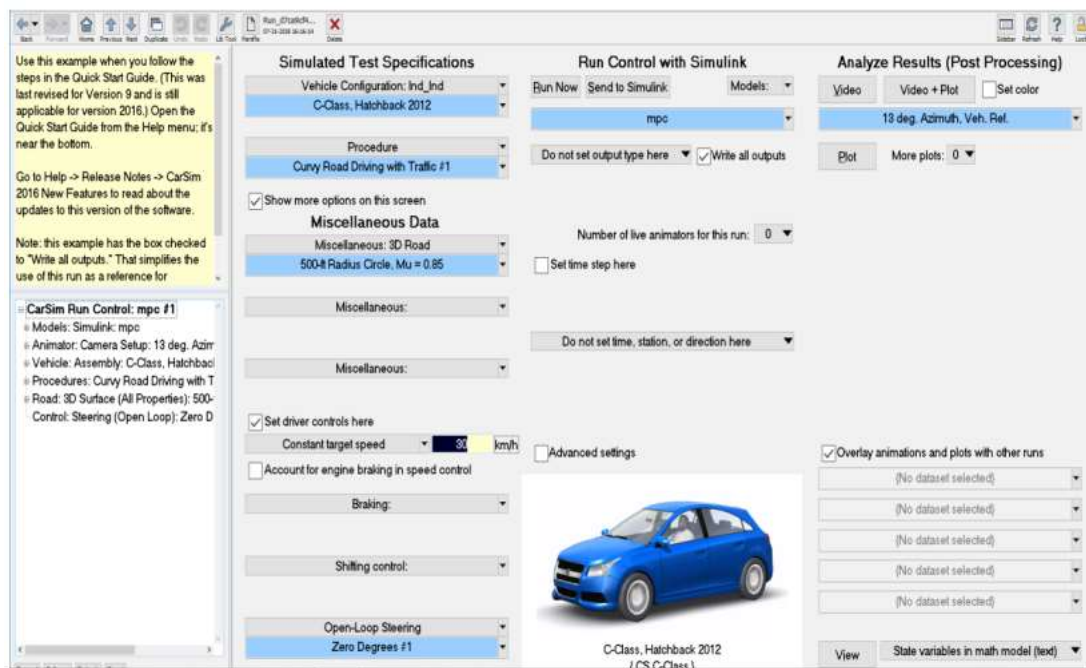


Рисунок 5.5 - Конфігурація CARSIM

Дані про параметри транспортного засобу, отримані з Carsim, наведено нижче.

Значення параметра

M: загальна маса 1412 кг

lf: відстань від GC до передньої осі 1,015 м

lr: відстань від GC до задньої осі 1,89 м

J: момент інерції рихтування транспортного засобу 1536,7 кгм²

Усередині моделі транспортного засобу Carsim визначаються параметри розмірів транспортного засобу, його маси та моменту інерції в різних напрямках. У контролері трс модель транспортного засобу-велосипеда має 3 ступені свободи.

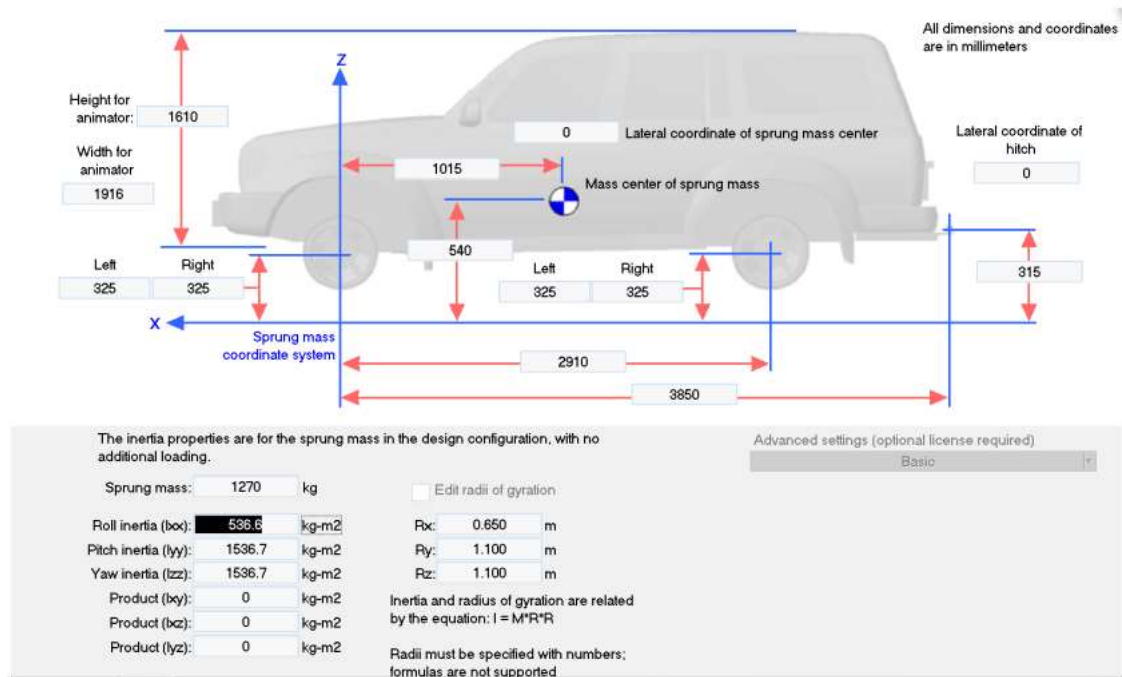


Рисунок 5.6 - Розміри транспортного засобу

Після цього обов'язково встановити модель транспортного засобу, що надсилається, як S-функцію до Simulink. Вкажіть вхідні та вихідні дані S-функції. На рис. 5.7, 5.8 показано загальну конфігурацію.

Набір вхідного сигналу:

1. кут повороту керма
2. Швидкість транспортного засобу

Перш ніж вхідний сигнал кута повороту керма представляє кут повороту шини, слід зазначити одну річ. Але в Carsim він визначається кутом повороту керма. Тому вводиться передавальне число.

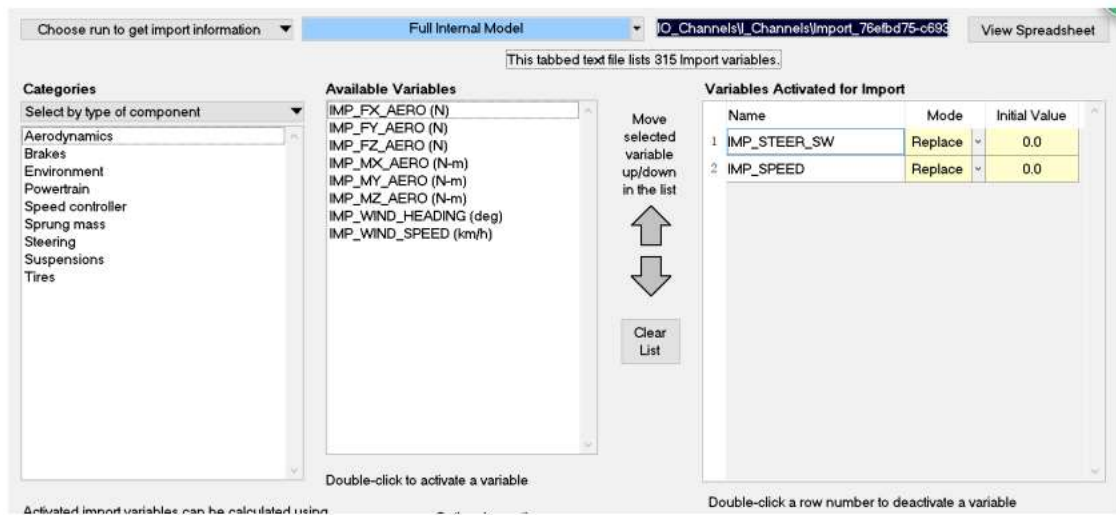


Рисунок 5.7 – Набір вхідних даних

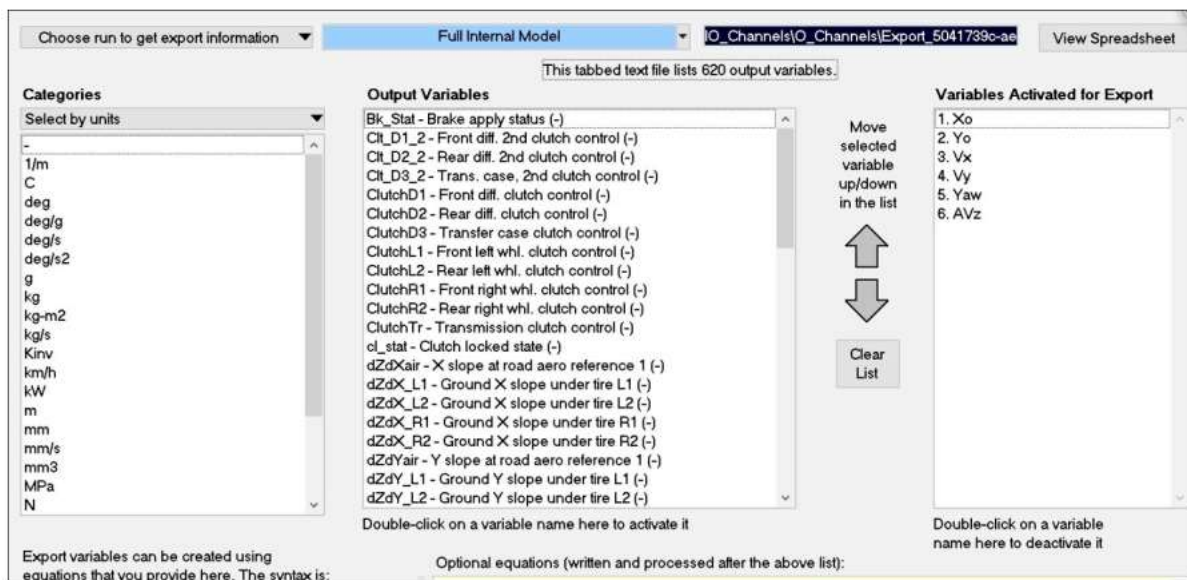


Рисунок 5.8 – Вихідні величини

Набір вихідних сигналів:

1. Поздовжнє положення.
2. Бічне положення.
3. Поздовжня швидкість.
4. Бічна швидкість.
5. Відносний кут ризькування.
6. Низкістьставка.

Нарешті, ми змінюємо функцію стану транспортного засобу на s-функцію Carsim, щоб мати більш повні та достовірні дані (рис. 5.9).

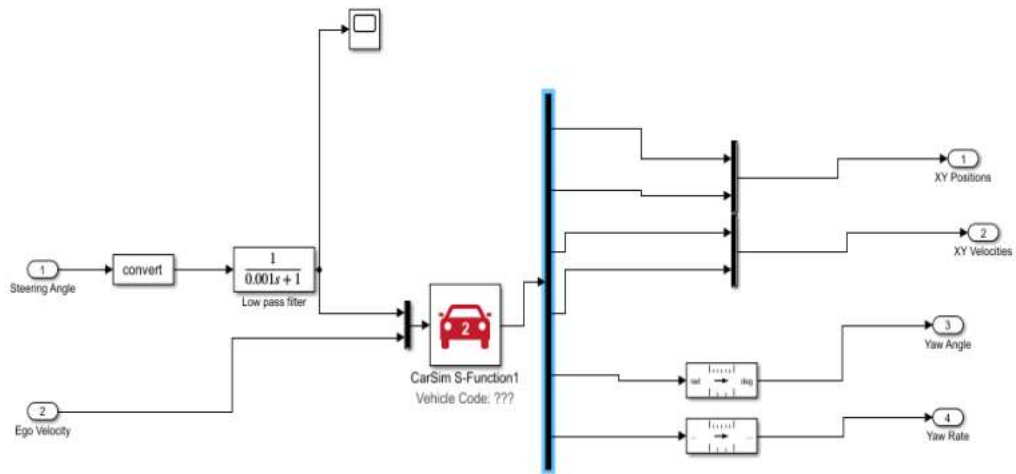


Рисунок 5.9 – Функція середовища Carsim

5.3 Бенчмаркінг за допомогою модуля Carsim

Тут ми обрали процедуру утримання смуги руху за звичайного режиму, щоб порівняти результати

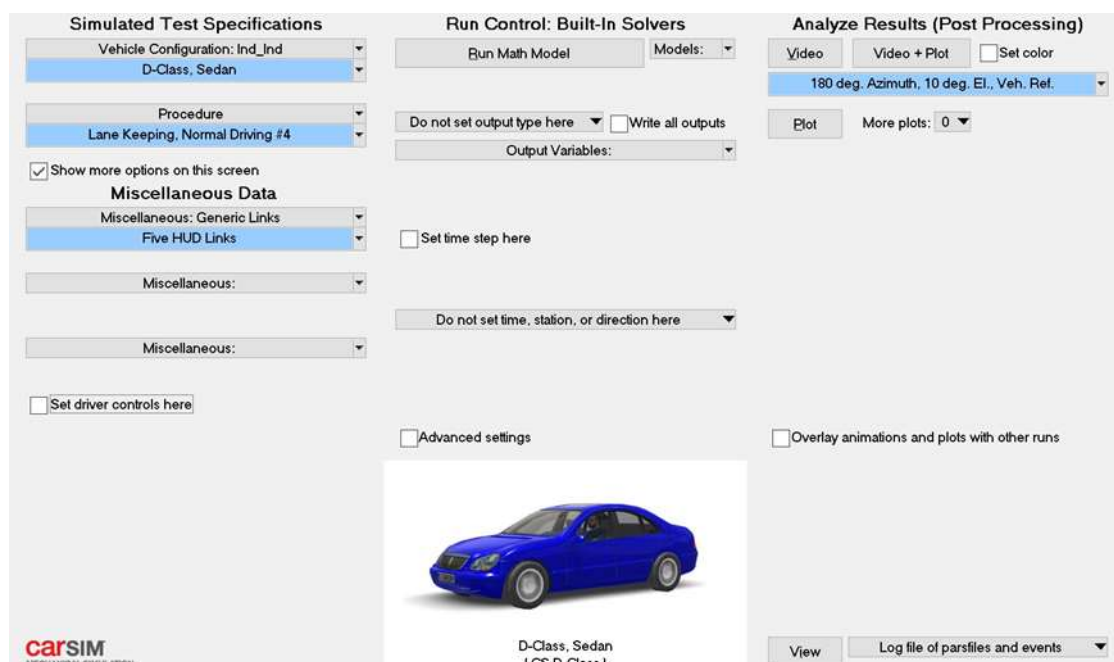


Рисунок 5.10 - Функція утримання смуги руху carsim

Контролер швидкості може розраховувати цільову швидкість як функцію кривизни на цільовому шляху в поєднанні з агресивністю водія

Межі прискорення, що використовуються для визначення цільової швидкості, базуються на рівні майстерності та межах агресивності

Навичка 0: A_x та A_y не поєднуються. Цільова швидкість налаштовується таким чином, щоб забезпечити прискорення або поздовжнє, або поперечне, але ніколи обидва одночасно.

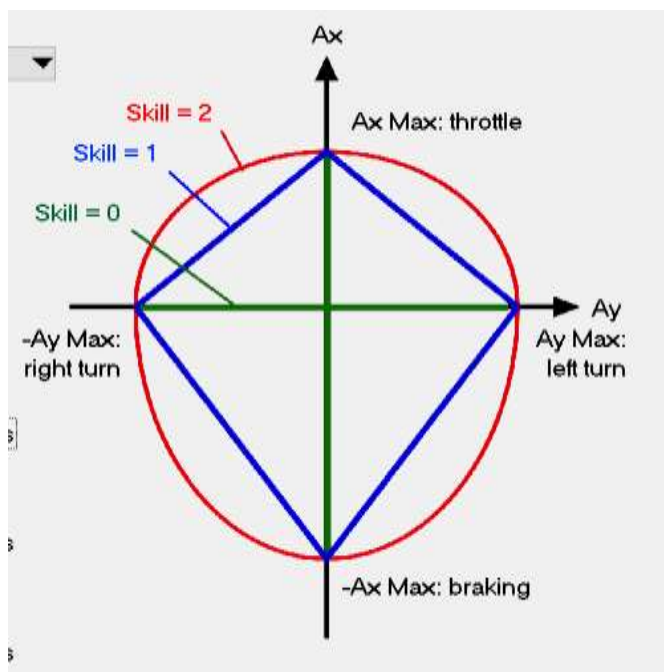


Рисунок 5.11 - Обмеження прискорення

Навичка 1: A_x та A_y поєднуються за допомогою прямих ліній, що дозволяє певну комбінацію поперечного та поздовжнього прискорень. Однак, комбіноване прискорення не використовує стільки доступного тертя, як це використовується при чистому поздовжньому або чистому поперечному прискоренні.

Навичка 2: A_x та A_y об'єднуються за допомогою еліпса тертя, що забезпечує послідовне використання доступного тертя незалежно від напрямку вектора повного прискорення.

Після цього, обговорюючи довжину попереднього перегляду шляху, встановить дані такими ж, як конфігурація камери та характеристики функції виявлення смуги руху.



Рисунок 5.12 - Приклад попереднього перегляду

Попередній перегляд цільового шляху налаштовується за допомогою чотирьох параметрів довжини

1. Довжина дуги, що використовується для оцінки кривизни: Довжина сегмента шляху, що використовується для обчислення кривизни в середині сегмента.
2. Початок попереднього перегляду: частина шляху посилення, яка відображається у попередньому перегляді починається на цій відстані перед початком системи координат підресованої маси транспортного засобу (зазвичай початок знаходиться в центрі передньої осі)
3. Повний попередній перегляд: Це визначає частину опорного шляху, яка відображається попередньо. Більші відстані іноді дають кращі

результати для складних шляхів у поєднанні з агресивними налаштуваннями прискорення.

4. Інтервал попереднього перегляду: Інтервал для обчислення кривизни шляху та швидкості цілі вздовж шляху попереднього перегляду.

Нарешті, згенеруйте однаковий сценарій як у Matlab, так і в Carsim, щоб порівняти результати.

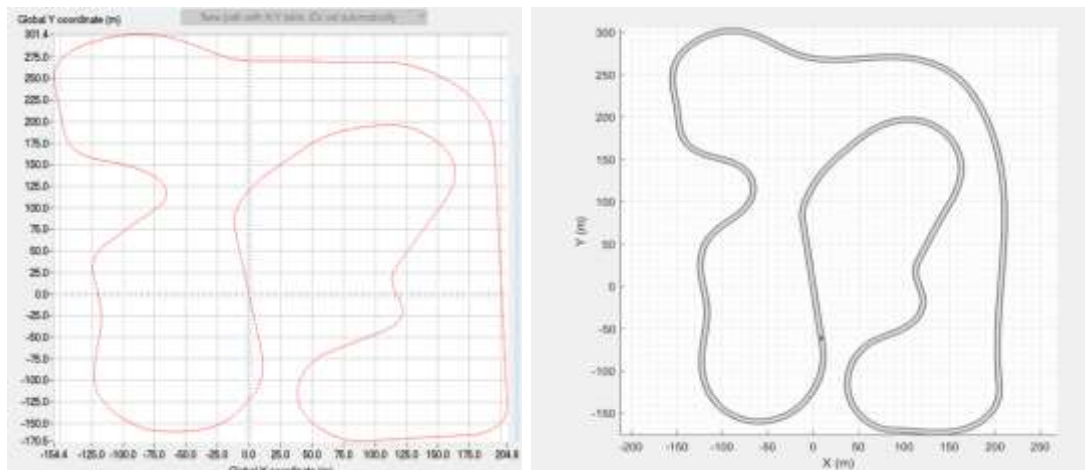


Рисунок 5.13 – Порівняння виконання сценаріїв у системі Carsim і Matlab

5.4 Графіки продуктивності та кінцевих результатів

Система допомоги утримання смуги руху лише з поперечним керуванням

На рис. 5.14 представлені результати роботи контролера, такі як кривизна, бічне відхилення, кут відносного рискання, кут повороту колеса та траєкторія руху водія автономного автомобіля.

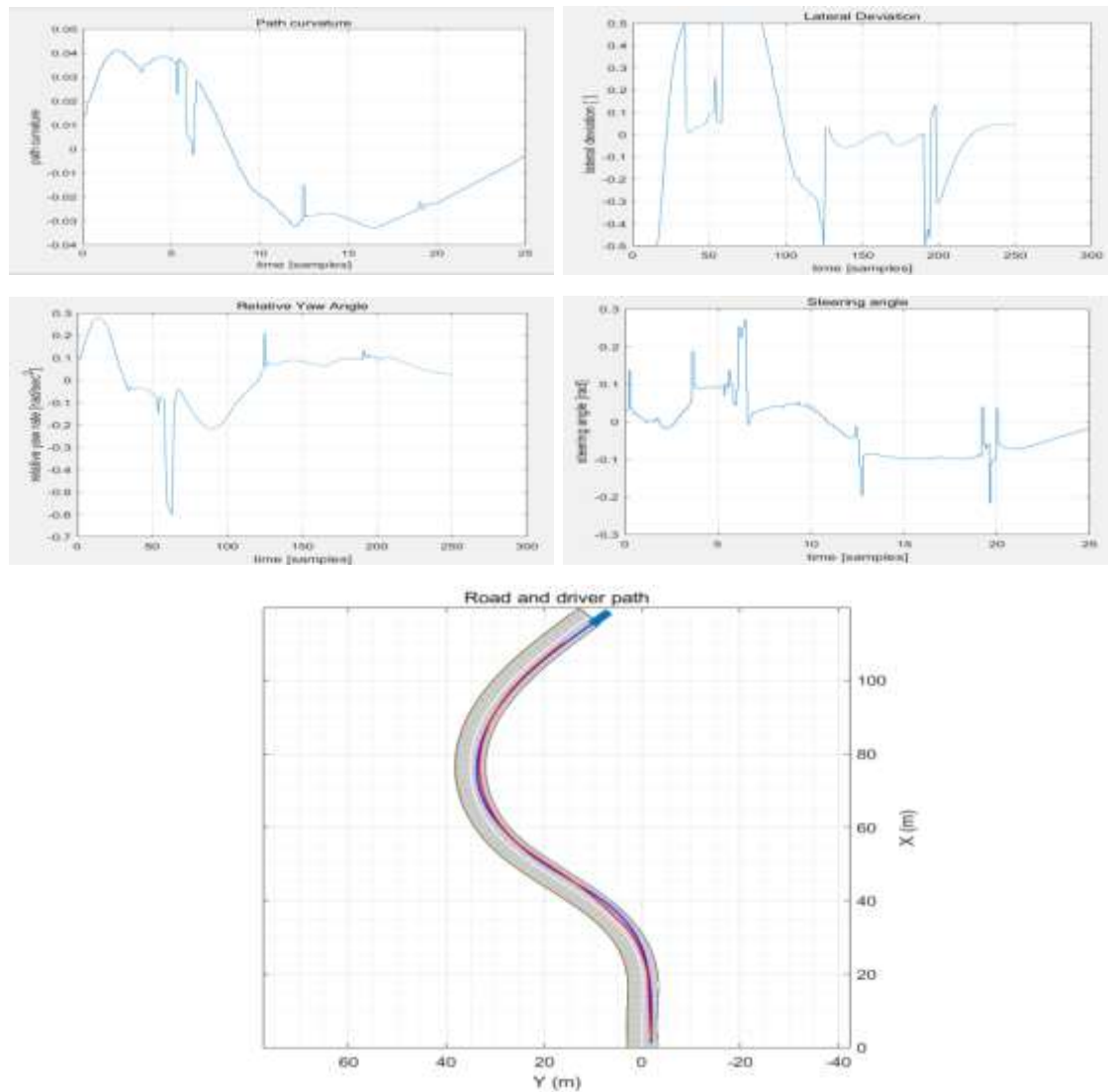


Рисунок 5.14 – Графіки продуктивності сценарію А

На графіку траєкторії руху водія синя лінія позначає центральну лінію двох меж, а червона лінія – траєкторію руху транспортного засобу.

Продуктивність контролера достатньо хороша для досягнення вимог щодо утримання смуги руху. Кут повороту керма знаходиться в діапазоні $[-0,2 + 0,3]$ рад.

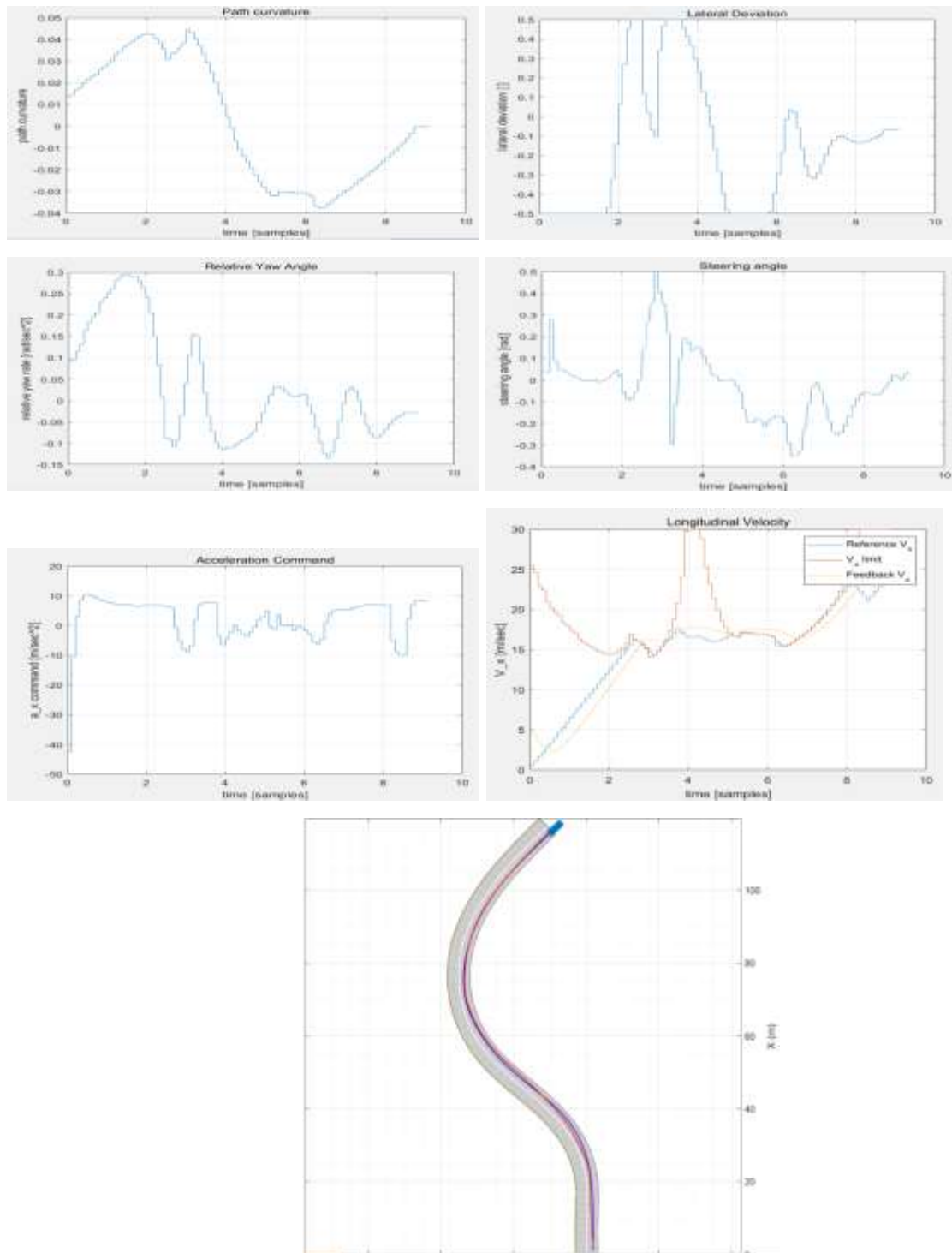


Рисунок 5.14 – Графіки продуктивності сценарію Б

Система допомоги утримування смуги руху з поздовжнім та поперечним контролем

Окрім елементів, представлених раніше, тут включено команду прискорення та поздовжню швидкість. На основі кривизни розраховується

опорна швидкість, і автономний автомобіль дотримується її. Оскільки швидкість не є постійною, як раніше, при поперечній кривизні, швидкість вища, ніж раніше. В результаті цього кут повороту керма знаходиться в діапазоні $[-0,4 + 0,5]$.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Вимоги охорони праці під час роботи з електроустаткуванням

Загальні положення

Інструкція з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування розроблена відповідно до Закону України «Про охорону праці» (Постанова ВР України від 14.10.1992 № 2694-XII) в редакції від 20.01.2018 р, на основі «Положення про розробку інструкцій з охорони праці», затвердженого Наказом Комітету по нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 29 січня 1998 року № 9 в редакції від 01 вересня 2017 року, з урахуванням «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів», затвердженими наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 р. № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 13.02.2012 р. №91, «Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів», затверджених наказом Держнаглядохоронпраці України 09.01.1998 р. № 4.

Всі положення даної інструкції з охорони праці поширюються на електриків освітньої установи, які виконують роботи з ремонту та обслуговування електроустаткування.

До самостійного виконання робіт з ремонту та обслуговування електричного обладнання допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання за фахом, а також:

- медичний огляд і не мають протипоказань за станом здоров'я до виконання даної роботи;

- вступний і первинний на робочому місці інструктажі з охорони праці;

навчання безпечним методам і прийомам праці;
перевірку знань правил улаштування електроустановок, правил безпеки при експлуатації електроустановок, вимог охорони праці;
при ремонті і обслуговуванні електрообладнання напругою до 1000В мають групу з електробезпеки не нижче III, а понад 1000В - не нижче IV.

Електрику необхідно знати і виконувати вимоги інструкції з охорони праці при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, інструкцій по роботі з ручним інструментом, електричним інструментом і драбинами.

Електрику при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування слід дотримуватися вимог Правил безпечної експлуатації електричних установок споживачів і Правил технічної експлуатації електричних установок споживачів, і мати відповідну групу з електробезпеки згідно з вимогами цих Правил.

Виконуючи роботи з ремонту та обслуговування електричного обладнання, може спостерігатися вплив нижчеперелічених шкідливих і небезпечних виробничих факторів:

падіння з висоти;
ураження електричним струмом;
підвищена напруженість електричного поля;
підвищена запиленість повітря робочої зони;
підвищений рівень вібрації;
недостатня освітленість робочої зони;
фізичні перевантаження;
нервово-психічні перевантаження.

Електрику при виконанні ремонту і обслуговування електроустаткування необхідно використовувати наведені нижче ЗІЗ:

напівкомбінезон бавовняний - на 12 місяців;

- рукавички на - 3 місяці;
- черевики шкіряні на - 24 місяці;
- калоші діелектричні - чергові;
- рукавиці діелектричні - чергові;
- килимки діелектричні - чергові.

Електрик при ремонті і обслуговуванні електрообладнання зобов'язаний:

- тримати у чистоті і порядку своє робоче місце;
- дотримуватися Правил внутрішнього трудового розпорядку;
- вміти застосовувати засоби індивідуального, колективного захисту, засоби пожежогасіння;
- вміти надавати першу допомогу потерпілим від нещасних випадків;
- знати і виконувати всі вимоги нормативних актів з охорони праці, правил протипожежного захисту та виробничої санітарії.
- негайно повідомляти своєму безпосередньому керівнику про будь-який нещасний випадок, що трапився на виробництві, про ознаки професійного захворювання, а також про ситуацію, яка створює загрозу життю і здоров'ю людей;
- знати терміни випробування захисних засобів і пристосувань, правила експлуатації, догляду та користування ними. Не дозволяється використовувати захисні засоби і пристосування з простроченим терміном перевірки;
- виконувати тільки доручену роботу;
- дотримуватися вимог інструкцій з експлуатації обладнання;
- знати, де знаходяться засоби надання допомоги, первинні засоби пожежогасіння, головний і запасні виходи, шляхи евакуації в разі аварії або пожежі;

знати номери телефонів медичної установи (103) і пожежної охорони (101).

Електрик може відмовитися від виконання дорученої йому роботи, якщо виникла виробнича ситуація, яка становить загрозу для його життя і здоров'я оточуючих, або для навколишнього середовища, і доповісти про це своєму прямому керівнику.

На робочому місці заборонено курити, вживати алкогольні напої та інші речовини, які надають наркотичну дію на організм людини.

З метою запобігання отримання травм і виникнення травмонебезпечних ситуацій слід дотримуватися нижчеперелічених вимог: не можна залучати до роботи сторонніх осіб;

не починати роботу в разі відсутності умов для її безпечного виконання;

виконувати роботу тільки на справному обладнанні, зі справними пристроями та інструментом;

виявивши несправність терміново доповісти безпосередньому керівнику або усунути їх власними силами, якщо це відноситься до посадових обов'язків;

не торкатися неізольованих або пошкоджених проводів;

не виконувати роботу, яка не входить до професійних обов'язків.

Вміти надавати першу допомогу при кровотечах, переломах, опіках, ураженнях електричним струмом, раптовому захворюванні або отруєнні.

Дотримуватися правил особистої гігієни:

верхній одяг, головний убір і інші особисті речі слід залишати в гардеробі;

працювати в чистому спецодязі;

приймати їжу в призначеному для цього місці.

Вміти правильно користуватися ЗІЗ та засобами колективного захисту, первинними засобами пожежогасіння, протипожежним інвентарем, знати, де вони знаходяться.

Особи, які порушили цю інструкцію з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, несуть дисциплінарну, адміністративну, матеріальну і кримінальну відповідальність відповідно до чинного законодавства України.

Вимоги безпеки перед початком роботи

Одягти спецодяг, провести огляд і підготовку робочого місця, прибрати зайві предмети.

Видалити із зони проведення робіт сторонніх осіб і звільнити робоче місце від сторонніх матеріалів та інших предметів, обгородити робочу зону і встановити знаки безпеки.

Переконатися в достатньому освітленні робочого місця, відсутність електричної напруги на відремонтованому обладнанні.

Оглянути на справність вимикачі, розетки електричної мережі, електровілок, електричних проводів, з'єднувальних кабелів, переконатися в наявності і справності ЗІЗ (засобів індивідуального захисту) і попереджувальних пристроїв (рукавичок діелектричних, окулярів захисних, калош, килимків і т. п.).

Виконуючи роботи з інструментом необхідно упевнитися в його справності, в відсутності механічних пошкоджень ізоляційного покриття і в своєчасності проходження випробувань інструменту.

Провести перевірку робочого місця на відповідність вимогам пожежної безпеки, на достатність освітлення робочого місця.

Виявивши недоліки і порушення з питань електричної і пожежної безпеки, негайно доповісти своєму безпосередньому керівнику.

6.2 Вимоги безпеки під час виконання робіт

Виконуючи посадові обов'язки, електрик зобов'язаний мати при собі посвідчення перевірки знань з питань охорони праці. За відсутності посвідчення або наявності посвідчення з терміном перевірки, працівник не отримує допуск до роботи.

Роботи в електричних установках щодо заходів безпеки поділяються на 3 категорії:

- зі зняттям напруги;
- без зняття напруги на струмопровідних частинах або біля них;
- без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою.

Працівники, які виконують спеціальні види робіт, до яких висуваються додаткові вимоги безпеки, повинні бути навчені безпечному проведенню таких робіт і мати про це відповідний запис в посвідченні про перевірку знань.

Працівникові, який обслуговує закріплені за ним електричні установки напругою до 1000 В одноосібно, необхідно мати III групу з електробезпеки.

Виконуючи роботи в електричних установках потрібно проводити організаційні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

- оформляти роботи нарядом-допуском, розпорядженням відповідно до переліку робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації;

- проводити підготовку робочих місць;
- допуск до роботи;
- здійснювати контроль над виконанням робіт;
- переводити на інше робоче місце;

установлювати перерви в роботі та її закінчення.

Для підготовки робочого місця до роботи, яка вимагає зняття напруги, необхідно застосувати, в певному порядку, наведені нижче технічні заходи:

виконати необхідні відключення і вжити всіх заходів, що виключають помилкове або самовільне включення комутаційної апаратури;

розвісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційною апаратурою;

провести перевірку на відсутність напруги на струмопровідних частинах, які повинні бути заземлені для захисту людей від ураження електричним струмом;

встановити заземлення (включити заземлюючі ножі, застосувати переносні заземлення);

встановити огорожі, якщо необхідно, близько робочих місць або струмоведучих частин, що залишилися під напругою, а також вивісити на даних огорожах плакати безпеки.

в залежності від місцевих умов, струмовідні частини обгородити до чи після їх заземлення.

Працювати без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу них слід як мінімум двом працівникам, одному з них, керівнику робіт, необхідно мати групу IV; іншим групу III з обов'язковим оформленням роботи нарядом-допуском або розпорядженням.

При знятті і встановленні запобіжників під напругою в електроустановках напругою до 1000 В слід заздалегідь відключити всі навантаження, які підключені до зазначених запобіжників; використовувати при цьому ізолюючі кліщі або діелектричні рукавички, а якщо є відкриті плавкі вставки, то і захисні окуляри.

Роботу з використанням драбин потрібно проводити вдвох, один з працівників повинен перебувати знизу. Стояти на ящиках або інших предметах забороняється. При установці приставних драбин на балках,

елементах металевих конструкцій і т. п. слід надійно закріпити верхню і нижню частину драбини на конструкціях.

Під час обслуговування та ремонту електричних установок користуватися металевими драбинами забороняється.

6.3 Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування

Відключити (від'єднати) необхідне електрообладнання, електроінструмент від мережі.

Навести порядок на робочому місці, прибрати в спеціальні місця деталі, матеріал, сміття і відходи.

Прибрати у відведене місце весь інструмент і пристосування.

Зняти і прибрати спецодяг, ЗІЗ, ретельно помити руки.

Провести огляд робочого місця на відповідність його всім вимогам протипожежного захисту.

Повідомити своєму безпосередньому керівнику про недоліки і несправності, які були під час виконання роботи. Зафіксувати це в оперативному журналі.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пожежі:

вимкнути електричне обладнання, припливно-витяжну вентиляцію, якщо вона є;

повідомити в пожежну частину за телефоном 101 і доповісти про це своєму керівнику, а при його відсутності іншій посадовій особі;

приступити до ліквідації осередка загоряння, застосовуючи передбачені для цього засоби пожежогасіння. Виконувати гасіння електричного обладнання, що знаходиться під напругою, можна тільки

вуглекислотними вогнегасниками типу ОУ або піском. Гасити їх водою або пінним вогнегасником забороняється.

Електрик повинен пам'ятати, що при раптовому відключенні напруги, вона може бути подана знову без попередження.

Слід швидко відключити механізми і пристрої:

- в разі раптового відключення електроенергії,;
- якщо подальша їх робота загрожує безпеці працівників;
- в разі відчуття дії електричного струму при торканні металевих частин пускової апаратури;
- в разі іскріння;
- при найменших ознаках загоряння, появи диму, запаху гару;
- якщо з'явився незнайомий шум.

У разі короткого замикання в мережі електроживлення необхідно знеструмити обладнання і повідомити своєму прямому керівнику.

Якщо сталося ураження електричним струмом, слід звільнити потерпілого від дії електричного струму, для чого відключити електричну мережу або від'єднати потерпілого від струмопровідних частин за допомогою діелектричних захисних засобів та інших ізолюючих речей і предметів (сухий одяг, суха жердина, прогумований матеріал і т. п.), або перерізати (перерубати) провід будь-яким інструментом з ізолюючою рукояткою, обережно, без додаткового нанесення травм потерпілому. До прибуття медпрацівника необхідно надати потерпілому першу допомогу.

При нещасних випадках (травмуванні людини) негайно повідомити про це безпосереднього керівника.

6.4 Розрахунок захисного заземлення

Захисне заземлення забезпечує зниження напруги дотику при замиканні на корпус до відносно безпечних значень шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання, вирівнювання потенціалів підвищенням потенціалів місця, на якому стоїть людина, до значень, що близькі до потенціалу заземлених конструктивних частин обладнання.

Розрахунок захисного заземлення має на меті визначення основних параметрів заземлення – кількість, розміри та порядок розміщення одиночних заземлювачів та заземлюючих провідників, при яких напруга дотику та кроку в період замикання фази на заземлений корпус не перевищує допустимих значень.

Розрахунок захисного заземлення здійснюється для випадку розташування заземлювача в однорідній землі. При цьому враховується опір верхнього шару землі (шар сезонних змін), який обумовлений замерзанням або засухою ґрунту. Розрахунок, який заснований на коефіцієнтах використання провідності заземлювача називається способом коефіцієнтів використання. Його виконують, як при простих, так і при складних конструкціях групових заземлювачів.

Загальні вимоги електробезпеки повинні відповідати ДСТУ 7237:2011. Для захисту від уражень електричним струмом використовують захисне заземлення. Воно повинно захищати людей від уражень електричним струмом у випадку дотику до металевих неструмопровідних частин, які можуть опинитись під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, це досягається з'єднанням металевих частин електроустановок з землею, або її еквівалентом.

Згідно з класифікацією приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом (ПУЕ 1.1.6.), приміщення в якому проводяться всі роботи відноситься до першого класу (без підвищеної небезпеки). Під час

роботи використовуються електроустановки з напругою живлення 36 В, 220 В, та 360 В. Опір контура заземлення повинен мати не більше 4 Ом.

Розрахунок проводять за допомогою методу коефіцієнта використання (екранування) електродів. Коефіцієнт використання групового заземлювача η – це відношення діючої провідності цього заземлювача до найбільш можливої його провідності за нескінченно великих відстаней між його електродами.

При розрахунку заземлювачів в однорідній землі способом коефіцієнтів використання значення опору R захисного заземлення визначаємо в наступному порядку:

обчислюємо опір пристрою заземлення R_z . Згідно правил улаштування електроустановок (ПУЕ) найбільш припустимі значення R_z , складають для установок до 1000 В:

10 Ом при сумарній потужності генераторів або трансформаторів, що живлять дану мережу, не більше 100 кВА;

4 Ом у всіх інших випадках.

- визначаємо необхідний опір штучного заземлювача $R_{ш}$:

$$R_{ш} = \frac{R_e \cdot R_z}{R_e - R_z}, \quad (4.1)$$

де R_e – опір розтікання природного заземлювача, Ом; R_z – необхідний опір заземлюючого пристрою, Ом.

- обчислюємо кількість вертикальних і довжину горизонтальних електродів:

$$n = \frac{4 \cdot \sqrt{S}}{a'}, \quad (4.2)$$

де n – кількість вертикальних електродів, штук; S – площа цеху, m^2 ; a' – задана відстань між електродами, м.

$$l_r = 2a + 2b, \quad (4.3)$$

де l_r – сумарна довжина горизонтальних електродів, м; a – ширина сторони цеху, м; b – довжина сторони цеху, м.

- розраховуємо опори розтікання вертикального R_v та горизонтального R_g електродів:

$$R_v = \frac{\rho_{роз,в}}{2 \cdot \pi \cdot l_v} \left(\ln \frac{2l_v}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_v}{4t - l_v} \right), \quad (4.4)$$

де $\rho_{роз,в}$ – розрахунковий питомий опір землі для вертикального електрода, Ом·м;

l_v – довжина вертикальних стрижневих електродів, м; d – діаметр електрода, мм;

t – глибина занурення в землю верхнього кінця електрода, м;

$$R_g = \frac{\rho_{роз,г}}{2 \cdot \pi \cdot l_g} \cdot \ln \frac{2l_g}{0,5 \cdot b' \cdot t}, \quad (4.5)$$

де $\rho_{роз,г}$ – розрахунковий питомий опір для горизонтального електрода, Ом·м;

l_g – довжина горизонтальних електродів, м; b' – товщина горизонтального електрода, м.

- за даними таблиці 4.1 та таблиці 4.2 визначаємо коефіцієнти використання для вертикальних та горизонтальних електродів η_v та η_g та з їх врахуванням обчислюємо розрахунковий опір заземлювача за виразом:

$$R_z = \frac{R_v \cdot R_g}{R_v \cdot \eta_g + R_g \cdot \eta_v \cdot n}, \quad (4.6)$$

Для розрахунку заземлювача задаємось такими вихідними даними: виробничий цех площею $S=5000$ м² і з понижуючою підстанцією 10/0,4 кВ. Заземлювач передбачається виконати з вертикальних стрижневих електродів довжиною $l_v=5$ м, діаметром $d=12$ мм і відстанню між ними $a'=5$ м та горизонтальних електродів (сталеві смуги перетином 440 мм) на глибині $t=0,8$ м. Розрахункова величина питомого опору ґрунту у місці спорудження захисного заземлення береться з таблиці 6.3 (для чорнозема $c=20$ Ом/м). Коефіцієнти вертикальної прокладки K_v і горизонтальної прокладки K_g приймаються з таблиці 6.4 (для третього кліматичного району $K_v=1,3$, $K_g=2,5$).

Талиця 6.1 – Коефіцієнт використання горизонтального стрічкового електрода, що з'єднує вертикальні електроди (труби, кутики і ін.) групового заземлювача

Відношення відстані між вертикальним і електродами до їх довжин	Число вертикальних електродів							
	2	4	6	10	20	40	60	100
Вертикальні електроди розміщені в ряд								
1.	0,8 5	0,7 7	0,7 2	0,6 2	0,4 2	-	-	-
2.	0,9 4	0,8 0	0,8 4	0,7 5	0,5	-	-	-
3.	0,9 6	0,9 2	0,8 8	0,8 2	0,6 8	-	-	-
Вертикальні електроди розміщені по контуру								
1.	-	0,4 5	0,4 0	0,3 4	0,2 7	0,2 2	0,2 0	0,1 9
2.	-	0,5 5	0,4 8	0,4 0	0,3 2	0,2 9	0,2 7	0,2 3
3.	-	0,7 0	0,6 4	0,5 6	0,4 5	0,3 9	0,3 6	0,3 3

Талиця 6.2 – Коефіцієнт використання вертикальних електродів групового заземлювача (труб, кутиків, і т. ін.) без урахування впливу стрічки зв'язку

Число заземлювачів	Число вертикальних електродів					
	1.	2.	3.	1.	2.	3.
	Електроди, розміщені в ряд			Електроди, розміщені по контуру		
2	0,85	0,91	0,94	-	-	-
4	0,73	0,83	0,89	0,69	0,78	0,85
6	0,65	0,77	0,85	0,61	0,73	0,80
10	0,59	0,74	0,81	0,56	0,68	0,76
20	0,48	0,67	0,76	0,47	0,63	0,71
40	-	-	-	0,41	0,58	0,66
60	-	-	-	0,39	0,55	0,64
100	-	-	-	0,36	0,52	0,62

Таблиця 6.3 – Розрахункові значення питомих електричних опорів ґрунтів

Ґрунт	Значення, які рекомендуються для розрахунків, Ом/м
Пісок	700
Супісок	300
Суглинок	100
Глина	40
Чорнозем	20
Торф	20

Таблиця 6.4 – Значення підвищувальних коефіцієнтів K_r , K_v за кліматичними зонами

Кліматична зона	Тип заземлювачів	
	Горизонтально прокладені заземлювачі (смугові та ін.) при глибині від поверхні ґрунту $t=0,8$ м, K_r	Стрижневі вертикально встановлені заземлювачі при глибині від поверхні землі $t=0,5-0,8$ м, K_v
I	4,5–7	1,8–2
II	3,5–4,5	1,6–1,8
III	2,5–4	1,4–1,6
IV	1,5–2	1,2–1,4

Розрахункові питомі опори ґрунту для вертикальних і горизонтальних заземлювачів визначаються відповідно так:

$$\rho_{роз.в} = K_v \cdot \rho, \text{ Ом/м}, \quad (6.7)$$

$$\rho_{роз.г} = K_r \cdot \rho, \text{ Ом/м} \quad (6.8)$$

Таким чином за формулами (6.7), (6.8), для чорнозему:

$$\rho_{роз.в} = 1,3 \cdot 20 = 26, \text{ Ом/м};$$

$$\rho_{роз.г} = 2,5 \cdot 20 = 50, \text{ Ом/м}.$$

У якості природного заземлювача використовуємо металеву технологічну конструкцію з опором розтікання природного заземлювача

$$R_e = 15 \text{ Ом}.$$

Здійснюємо розрахунок у відповідності з зазначеною послідовністю:

- згідно ПУЕ необхідний опір заземлюючого пристрою складає:

$$R_3 = 4 \text{ Ом};$$

за формулою (6.1) визначимо необхідний опір штучного заземлювача $R_{ш}$:

$$R_{ш} = \frac{15 \cdot 4}{15 - 4} = 5,5 \text{ Ом};$$

за формулами (4.2), (4.3) обчислюємо кількість вертикальних та довжин горизонтальних електродів:

$$n = \frac{4 \cdot \sqrt{5000}}{5} = 5 \text{ штук},$$

$$l_r = 2 \cdot 50 + 2 \cdot 100 = 300 \text{ м};$$

за формулами (4.4), (4.5) розраховуємо опори розтікання вертикального R_v та горизонтального R_h електродів:

$$R_v = \frac{26}{2 \cdot \pi \cdot 5} \left(\ln \frac{2 \cdot 5}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 3,3 + 5}{4 \cdot 3,3 - 5} \right) = 5,7 \text{ Ом},$$

$$R_h = \frac{50}{2 \cdot \pi \cdot 300} \cdot \ln \frac{2 \cdot 300}{0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,8} = 0,3 \text{ Ом};$$

за даними таблиць (4.10, (4.11) обираємо коефіцієнти використання для вертикальних та горизонтальних електродів $K_v=0,4$ та $K_h=0,21$;

обчислюємо розрахунковий опір заземлювача R за формулою (4.6):

$$R_r = \frac{5,7 \cdot 0,3}{5,7 \cdot 0,21 + 0,3 \cdot 0,4 \cdot 56} = 0,22 \text{ Ом}.$$

Таким чином, проєктований заземлювач є контурним, складається з 56 вертикальних стрижневих електродів довжиною 5 м і діаметром 12 мм та горизонтального електрода у вигляді сталеві смуги довжиною 300 м, перетином 440 мм², занурених у землю на 0,8.

ВИСНОВКИ

Робота була зосереджена на дослідженні моделі автономного автомобіля, а також кермування та керування швидкістю автономних транспортних засобів. Було розглянуто різні рівні динамічної моделі транспортного засобу, такі як кінематична модель та модель велосипеда з лінійною або нелінійною моделями шин.

Контролер був розділений на дві частини: перша — поздовжній контролер, що відповідає зміні швидкості, а інший — поперечний, який головним чином пов'язаний з кутом повороту керма. Поперечний контролер базується на теорії MPC, а поздовжній — на теорії PID. Весь контролер, розроблений у Matlab Simulink, показав хороші параметри роботи у двох напрямках регулювання, щоб слідувати бажаному шляху. Для перевірки було згенеровано різні сценарії за допомогою інструментарію автономного водіння в Matlab.

Щоб отримати більш достовірні дані про стан транспортного засобу було також використано програмне забезпечення Carsim у поєднанні з Matlab, що дозволило оцінити роботу розробленого контролера для керування автономним транспортним засобом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kühne F. Model Predictive Control of a Mobile Robot Using linearization. APS/ECM.
2. Rafaila R. C. Nonlinear Model Predictive Control of Autonomous vehicle Steering. 2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), October 14-16, Cheile Gradistei, Romania. 2015.
3. Brown M. Safe driving envelopes for path tracking in autonomous vehicles. Control Engineering Practice. 2017. Vol. 61. P. 307–316.
4. Goh J. Y. Simultaneous Stabilization and Tracking of Basic Automobile Drifting trajectories. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Gothenburg, Sweden, June 19-22, 2016. 2016.
5. Liu Jiechao. The role of model fidelity in model predictive control based hazard avoidance in unmanned ground vehicles using lidar sensors : [thesis]. Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor.
6. Peters S. C. Differential flatness of a front-steered vehicle with tire force control. 2011 IEEE/RSJ International Conference on intelligent Robots and Systems, September 25-30, 2011. San Francisco, CA, USA. 2011.
7. Skjetne R. Robust output maneuvering for a class of nonlinear systems. Automatic. 2004. Vol. 40, no. 3. P. 373–383.
8. Aguiar P. Logic-based switching control for trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles its parametric modeling uncertainty. Presented at the 2004 Amer. Control Conf., Boston, MA, Jun. 2004. 2004.
9. Al-Hiddabi S. Tracking and maneuver regulation control for nonlinear nonminimum phase systems: Application to flight control. IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2002. Vol. 10, no. 6. P. 780–792.
10. Aguiar A. P. Path following reference-tracking? An answer relaxing the limits to performance. 5th IFAC/EURON Symp. Intelligent Autonomous Vehicles, Lisbon, Portugal, Jul. 2004. 2004.

11. Laurence Vincent A. Path-Tracking for Autonomous Vehicles at the Limit of Friction. 2017 American Control Conference, May 24–26, 2017, Seattle, USA. 2017.
12. Chatzikomis C. I. A path-following driver model with longitudinal and lateral control of vehicle's motion. *Forsch Ingenieurwes.* 2009. Vol. 73. P. 257–266.
13. MacAdam C. C. Understanding and modeling the human driver. *Vehicle System Dynamic.* 2003. Vol. 40. P. 101–134.
14. Plochl M. Driver models in automobile dynamics application. *Vehicle System Dynamic.* 2007. Vol. 45. P. 699–741.
15. Marino R. A Nested PID Steering Control for Lane Keeping in Vision Based Autonomous Vehicles. 2009 American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, June 10-12, 2009. 2009.
16. Kang C. M. Comparative Evaluation of Dynamic and Kinematic Vehicle Models. 53rd IEEE Conference on Decision and Control, December 15-17, 2014. Los Angeles, California, USA. 2014.
17. Handbook of Intelligent Vehicle / ed. A. Eskandarian. Springer-Verlag, 2012.
18. Ulsoy A. G. Automotive Control Systems. Cambridge, 2012.
19. Lee S.-H. Multirate active steering control for autonomous vehicle lateral maneuvering. *Proceeding of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, June 3-7, 2012. 2012. P. 772–777.
20. Lee J. H. Predictive control of vehicle trajectory by using a coupled vector with the vehicle velocity and sideslip angle. *IJAT.* 2008.
21. Gu D. Neural predictive control for a carlike mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems.* 2002. Vol. 39, no. 2. P. 73–86.
22. Pacejka H. B. Tire and Vehicle Dynamics. Elsevier – Butterworth Heinemann, 2004.
23. Smith N. D. Understanding Parameters Influencing Tire Modeling. Colorado State University, 2004. Formula SAE Platform.
24. Sharp R. S. et al. A mathematical model for driver steering control, with design, tuning and performance results. *Vehicle Sys Dynamic.* 2000. Vol. 33. P. 289–326.

25. Stanger T. A Model Predictive Cooperative Adaptive Cruise Control Approach. 2013 American Control Conference (ACC), Washington, DC, USA, June 17-19, 2013. 2013.
26. Введення в комп'ютерну графіку та дизайн: Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"/Укладачі: О.В. Тотосько, П.Д. Стухляк, А.Г. Микитишин, В.В. Левицький, Р.З. Золотий - Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023 - 304с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41166>.
27. Основи наукових досліджень і теорія експерименту : Навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / укл. Ю. Б. Капаціла, П. О. Марущак, В. Б. Савків, О. П. Шовкун. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. 186 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/40843>
28. Коноваленко І. В. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0 : навч. посіб. / І. В. Коноваленко, П. О. Марущак. – Тернопіль : В. А. Паляниця, 2020 – 320 с. <http://library.megu.edu.ua:8180/jspui/handle/123456789/4115>
29. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>
30. Капаціла Ю.Б., Савків В.Б. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 60 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48495>
31. Капаціла Ю.Б., Шовкун О.П. Дослідження релейного електронного регулятора температури. /Методичні вказівки до лабораторної роботи з курсу «Приводи та автоматика мехатронних систем» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль: ТНТУ. 2025. 15 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/50560>.

32. Козбур І.Р., «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>
33. Капаціла Ю.Б., Марущак П.О., Савків В.Б. Методичні вказівки з виконання курсової роботи з дисципліни «Основи наукових досліджень» для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль: ТНТУ, 2023. 32 с
34. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1551>
35. Методичні вказівки по роботі з програмним симулятором "AVR simulator IDE" з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 21 с.
36. Моделювання нелінійних систем керування у пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2019. - 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28057>
37. Моделювання систем керування в пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. - 23 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28056>
38. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Multisim. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу

"Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо . - Тернопіль : ТНТУ Імені Івана Пулюя, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26404>

39. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Proteus VSM. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26397>

40. Методичні вказівки до курсового проектування з курсу "Проектування систем автоматизації" / Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Пісьціо В.П. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 128 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48646>

41. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка”. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. – 53 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44635>

42. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. -26 с.

43. Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67 с.

44. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.

45. Навчально-методичний посібник до практичних заняття з дисципліни «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» для студентів освітнього ступеня „бакалавр" усіх спеціальностей та форм навчання / Укладачі : О. Я. Гурик, І. Б. Окіпний, В. С. Сенчишин, С. Ю. Мариненко, О. І. Король.

- Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. 123 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48496>
46. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.
47. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.
48. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
49. Буров Є., Митник М. Комп'ютерні мережі. (у 2-х томах). Львів, Магнолія, 2018.
50. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем. Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А. Г. Микитишин, М. М. Митник, О. С. Голотенко, В. В. Карташов. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42625>
51. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>