

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет літакобудування

Кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури

## Пояснювальна записка до дипломної роботи

(тип кваліфікаційної роботи)

магістр

(освітній ступінь)

на тему «Модель системи керування швидкістю електромобіля»

ХАІ.107.163т.24В.274.1801053.ПЗ

Виконав: здобувач (ка) 2 курсу групи № 163т

Галузь знань 27 Транспорт

(код та найменування)

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»

(код та найменування)

Освітня програма Автомобілі та автомобільне  
господарство

(найменування)

Топчійов Д.С.

(прізвище та ініціали здобувача (ки))

Керівник: Доля К.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент: Григорович А.М.

(прізвище та ініціали)

Харків – 2024

Міністерство освіти і науки України  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет Літакобудування

(повне найменування)

Кафедра № 107 «Автомобілів та транспортної інфраструктури»

(повне найменування)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 27 Транспорт

(код та найменування)

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»

(код та найменування)

Освітня програма Автомобілі та автомобільне господарство

(найменування)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**В.о. завідувач кафедри**

Наталія КОБРИНА

(підпис)

(ініціали та прізвище)

«20» січня 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Топчійов Дмитро Сергійович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Автоматизована система керування швидкістю електромобіля»

керівник кваліфікаційної роботи к.т.н., доцент Кобріна Наталія Віталіївна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету №11530–уч від «31» «10» 2023 року

2. Термін подання здобувачем кваліфікаційної роботи 19.01.2024 року

3. Вихідні дані до роботи Електронні ресурси з проектування інноваційної матеріально–технічної бази. Довідкова література з питань охорони праці, Наукові джерела з розрахунку вартості основних виробничих фондів.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати) Дослідження методів технічного контролю ПАРАжирських транспортних засобів при техобслуговуванні в умовах авторемонтного виробництва, а саме вибір та знаходження найбільш вигідної пропорції відношення не інструментальних та

інструментальних методів технічного контролю ПАРАжирських транспортних засобів.

5. Перелік графічного матеріалу презентація у вигляді слайдів в кількості 19 шт.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітичний розділ	к.т.н., доцент Кобріна Н.В.	10.10.2023	31.10.2024
Практичний розділ	к.т.н., доцент Кобріна Н.В.	31.11.2023	10.01.2024

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ Наталія КОБРИНА  
(підпис) (ініціали та прізвище)

« 16 » січня 2024р.

7. Дата видачі завдання « 10 » жовтня 2024 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Аналітична частина	31.10.23	
2	Практична частина	25.11.23	
3	Оформлення пояснювальної записки	10.12.23	
4	Подання дипломної роботи до кафедри	10.01.23	

Здобувач \_\_\_\_\_ Топчийов Д.С.  
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Кобріна Н. В.  
(підпис) (ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Проект містить 79 с. тексту, 29 рисунків, 1 таблиця, посилання на 22 літературні джерела.

Ключові слова: електромобіль, безпілотний автомобіль, система керування, система автопілот, швидкість руху, електродвигун.

Об'єктом дослідження є електромобіль.

Метою дослідження є забезпечення комфортності руху електромобіля при змінних умовах дорожньої обстановки.

У дипломному проекті розроблено цифрову модель системи керування швидкістю електромобіля з низьким ступенем мотиваційного сприйняття дорожньої ситуації. Система забезпечує комфортність руху електромобіля при змінних умовах дорожньої обстановки за рахунок стабілізації швидкості руху. Розроблено структурну та функціональну схеми, розроблено математичну модель. Для забезпечення заданої швидкості руху розроблено цифровий регулятор за методом бажаних передавальних функцій замкнутої системи.

Отримані результати можуть бути корисними при автоматизації систем керування електромобілем та при подальшому розвитку безпілотних автомобілів.

## ANOTATION

The project contains 79 p. text, 29 figures, 1 table, references to 22 literature sources.

Keywords: electriccar, self-driving vehicle, control system, autopilot system, speed, electric motor.

The object is an electric car.

The method of maintenance is the guaranteed comfort of the electric car in depends of road conditions.

In the diploma project the digital model of control system of speed of the electric car with low degree of motivational perception of a road situation is developed. The system provides comfort of movement of the electric car at changing conditions of a road situation due to stabilization of speed of movement. The structural and functional schemes are developed, the mathematical model is developed. To ensure a given speed, a digital controller has been developed by the method of the desired transfer functions of a closed system.

The obtained results can be useful in the automation of electric vehicle control systems and in the further development of unmanned vehicles.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ .....	10
1.1 Загальні відомості.....	10
1.2 Огляд існуючих рішень побудови системи керування електромобілем...15	
2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.....	22
2.1 Опис роботи та аналіз основних елементів структурної схема автоматизованої системи керування швидкістю електромобіля .....	22
3 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.....	28
4 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ .....	32
4.1 Виведення математичної моделі об'єкту управління.....	32
4.2 Виведення передавальної функції автоматизованої системи керування швидкістю електромобіля .....	33
4.3 Розроблення моделі досліджуваної системи в прикладному пакеті MathLabSimulink.....	39
4.4 Розроблення цифрової моделі досліджуваної моделі. ....	40
5 АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ І ЯКОСТІ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.....	46
5.1 Аналіз стійкості системи .....	46
5.2 Аналіз якості системи.....	50

6. СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА .....	54
6.1 Синтез цифрового регулятора методом вибору бажаних передавальних функцій .....	54
6.2 Синтез цифрового ПІД-регулятора .....	58
7. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА .....	62
7.1 Метод безпосередньої декомпозиції.....	62
7.2 Дослідження розробленого цифрового регулятора за допомогою мови програмування ST в середовищі CodeSyS .....	64
8. Економічна частина.....	66
ВИСНОВОК.....	76
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77

## ВСТУП

Нині практично 80% світового автомобільного ринку прямує до заборони вуглеводного пального і переходу на електромобілі та гібриди. Революція у світі машинобудування відбулась лише тоді, коли відбувся старт продажів першого комерційного преміального седана Tesla Model S. Користувачі високо оцінили безшумний, швидкий і комфортний автомобіль. Однак не лише екологічність приваблює до себе користувачів. Система автопілот, яка допомагає водієві на дорозі, є новаторською та прогресивною не лише через технологічні рішення, а й через доведену безпечність такого автотранспорту. Система допомагає регулювати швидкість, самостійно тримає смугу та дотримується усіх правил дорожнього руху.

Мета даного проекту – забезпечення комфортності руху електромобіля при змінних умовах дорожньої обстановки.

Ця система має забезпечити плавну зміну швидкості руху зважаючи на дорожні умови. Система може використовуватись в подальшому для удосконалення систем авто пілотування та для систем безпілотних транспортних засобів.

Для виконання поставленої мети були поставлені та виконані наступні задачі:

- розроблення математичної цифрової моделі об'єкта керування;
- аналіз стійкості та показників якості системи;
- синтез цифрового регулятора;
- розробка програми цифрового регулятора;
- експериментальні дослідження ефективності розробленої системи;

В роботі були використані наступні методи дослідження:

- z-перетворення, для отримання цифрової системи управління швидкістю електромобіля;
- синтез цифрового регулятора, застосовуючи метод заснований на



виборі бажаних передавальних функцій та методів розроблення ПД регуляторів;

– програмування регулятора за допомогою метода безпосередньої декомпозиції.

Об'єкт дослідження—електромобіль.

Предмет дослідження—автоматизована система керування швидкістю електромобіля базуючись на даних навколишнього світу.

# 1 АНАЛІЗ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

## 1.1 Загальні відомості

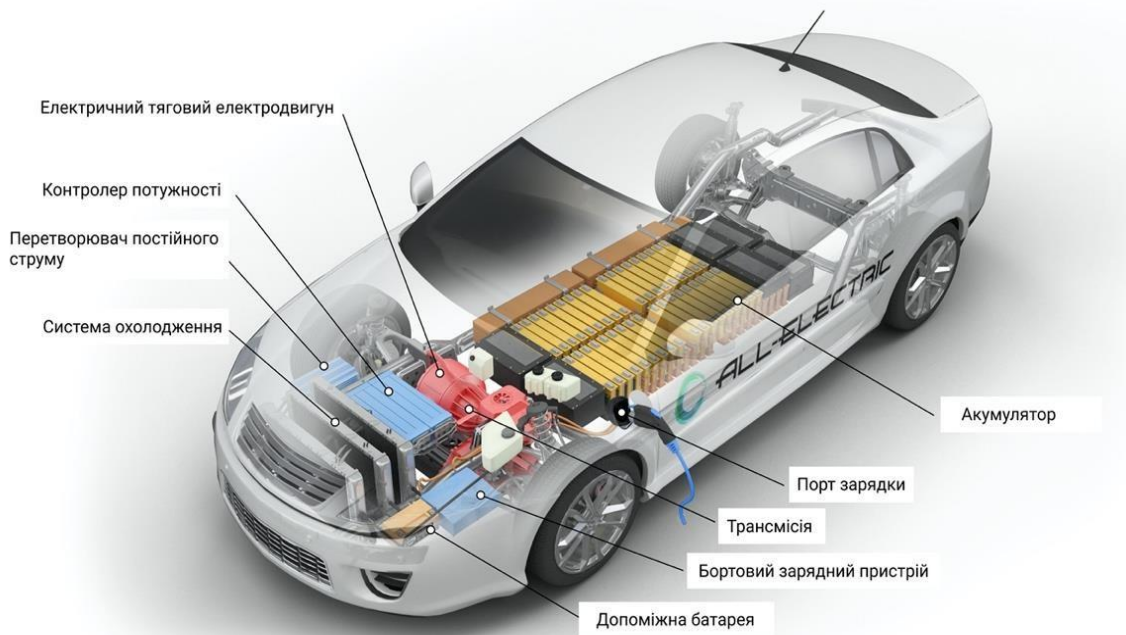
В останні роки автомобільна промисловість протерпіла більше змін чим за останнє десятиліття. На сьогодні світова промисловість в пошуках альтернативних джерел енергії на заміну вуглеводному паливу. І електромобіль є одним з найкращих варіантів.

Електромобіль – це автомобіль, який працює на електричному двигуні. Так, зараз електромобілі, які поки є лише приватним видом транспорту, використовуються для перевезення людей у містах, лісових зонах та зонах відпочинку. Тобто використовується в місцях, де питання екологічного використання транспортних засобів стоїть дуже гостро.

Україна увійшла у топ-5 країн за динамікою розвитку ринку електромобілів, поступившись Норвегії, Швеції та Ісландії. За останні дев'ять років загальна кількість електромобілів в Україні з нуля досягла позначки у більше ніж 10000 одиниць [1].

Як було зазначено вище, усі електромобілі мають електродвигун замість двигуна внутрішнього згорання. Електромобіль використовує великий тяговий акумулятор для живлення двигуна і він має бути підключеним до зарядної станції чи до розетки. Також, так як він працює на електроенергії то в конструкції він не має таких типових компонентів для рідкого пального як паливна помпа, магістраль та бак. Типова структура електромобіля представлена на рисунку 1.1

## Електромобіль



Малюнок 1.1 – Схема розміщення ключових елементів електромобіля [2]

У електромобілі допоміжна акумуляторна батарея забезпечує електроенергією допоміжні системи автомобіля. Порт зарядки дозволяє під'єднати автомобіль до зовнішнього джерела живлення для зарядки тягової акумуляторної батареї.

Перетворювач постійного струму перетворює постійний струм високої напруги з тягової акумуляторної батареї в постійний струм низької напруги, необхідний для запуску допоміжних систем автомобіля і зарядки допоміжної акумуляторної батареї.

Використовуючи живлення від тягової акумуляторної батареї, електричний тяговий електродвигун управляє колесами автомобіля. У деяких автомобілях використовуються мотор-генератори, що виконують як функції приводу, так і функції регенерації.

Бортовий зарядний пристрій приймає на вхід змінний електричний струм,

який надходить через порт зарядки, і перетворює його в постійний струм для зарядки тягової акумуляторної батареї. Під час зарядки зарядний пристрій стежить за такими характеристиками акумулятора, як напруга, струм, температура і стан заряду.

Контролер потужності управляє потоком електричної енергії, що передається від акумулятора, контролює швидкість електродвигуна і крутильний момент, який він виробляє.

Система охолодження підтримує необхідний діапазон робочих температур електродвигуна, силової електроніки та інших компонентів.

Акумулятор зберігає електроенергію для двигуна.

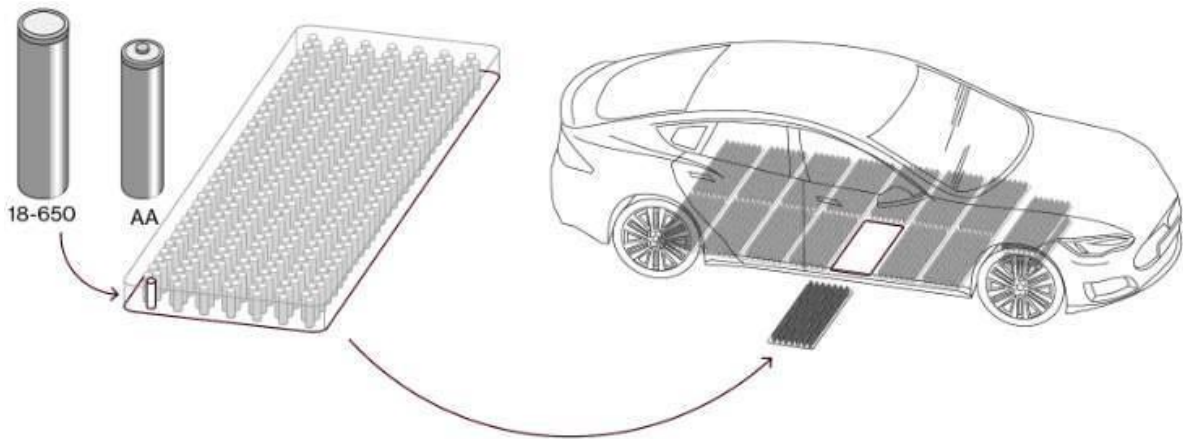
Трансмсія передає механічну потужність від двигуна до приводу коліс.

Основними перевагами електромобілів є:

- зниження витрат на транспортування вантажів і пасажирів – заряджати автомобіль електроенергією значно дешевше ніж заправляти бензином чи газом;
- більше ефективне використання пропускної здатності доріг шляхом централізованого управління транспортним потоком;
- довготривалий термін користування – повна деградація батареї в електромобілі відбувається значно пізніше чимламаєтьсядвигунвнутрішнього згорання;
- розширення можливостей використання автомобіля для людей з обмеженими можливостями;
- при використанні системи автопілот – мінімізація ДТП і числа людських жертв в них;
- для безпілотних автомобілів можливість перевезення вантажів в небезпечних зонах, під час природних і техногенних катастроф або військових дій;
- фінансові пільги для стимулювання розвитку галузі електричного транспорту—вбагатьохкраїнахсвітунадорогахдляелектромобіліввиділяють окрему смугу чи дають певні знижки при покупці. В Україні також є такий законопроект [3].

Не зважаючи на велику кількість позитивних моментів у користування електромобілів, існує ряд певних недоліків, які з часом мають бути виправленими.

Одним з основних недоліків є висока ціна на електромобілі. Перш за все, для того щоб забезпечити електромобіль енергією для певного запасу ходу використовуються недешеві літій – іонні акумулятори, яких для забезпечення та підтримання достатнього рівня енергії для всіх систем електромобіля потрібно дуже багато. Наприклад, для забезпечення енергією електромобіль Tesla Model S використовуються 15 блоків, в яких 6 груп по 74 маленьких елементів у вигляді циліндричних капсул – літій-іонних осередків Panasonic 18650 вагою 46 грамів. Розташування осередків та блоків зображено на рисунку 1.2.



Малюнок 1.2 – Використання літій-іонних осередків Panasonic 18650 в автомобілі Tesla Model S [4]

По-друге, для розробки нових технологій потрібно дуже багато коштів. Що також включається в первинну ціну на автомобіль. Також недоліками для користування електромобілем в Україні є відсутність офіційних дилерських центрів та точок обслуговування електромобілів.

Але все ж в електромобілях є безперечно більше позитивних моментів ніж у автомобілів на двигуні внутрішнього згорання:

- електродвигуни мають більший коефіцієнт корисної дії (ККД) до 90-

95%, в порівнянні з 22-42% у ДВС;

- електромобілю непотрібні такі елементи звичайного автомобіля як коробка передач, карданна передача, диференціал;
- електромобіль дуже швидко розганяється (доказом цього є випробування на 100 км, які всі електромобілі проходять в середньому за 5-7с) і може довго тримати високу швидкість;
- за допомогою рекуперативного гальмування можна підряджати акумулятор;
- простота техобслуговування і великий пробіг між сервісними техоглядами, а отже повільніший час зносу деталей.

З огляду на переваги електромобіля швидко зростає кількість компаній які займаються його розробкою. В 2011 році розвитком електромобілів займались лише компанії Tesla, Renault, Mitsubishi і Nissan. Але уже сьогодні 90% автовиробників представляють свої модельні ряди електромобілів на одному рівні з автомобілями на двигуні внутрішнього згорання. А комерційні компанії такі як Google, Waymo, Artiv та Яндекс займаються розробкою безпілотних автомобілів на базі електромобілів.

На сьогодні активною розробкою електромобілів займаються компанії – Ford (Ford Ecostar – максимальна швидкість 180 км/год, максимальний пробіг на одній зарядці 70-80 км); Volkswagen (електричні версії моделей Golf, Jetta та модель City Stromer максимальна швидкість 100 км/год, максимальний пробіг на одній зарядці 50-90 км); Renault (Clio Electrique максимальна швидкість 100 км/год, максимальний пробіг на одній зарядці 100 км); Porsche (Taycan – максимальна швидкість 260 км/год, максимальний пробіг на одній зарядці 450 км); BMW (i8 Roadster – максимальна швидкість 250 км/год, максимальний пробіг на одній зарядці – 440 км) [5-8].

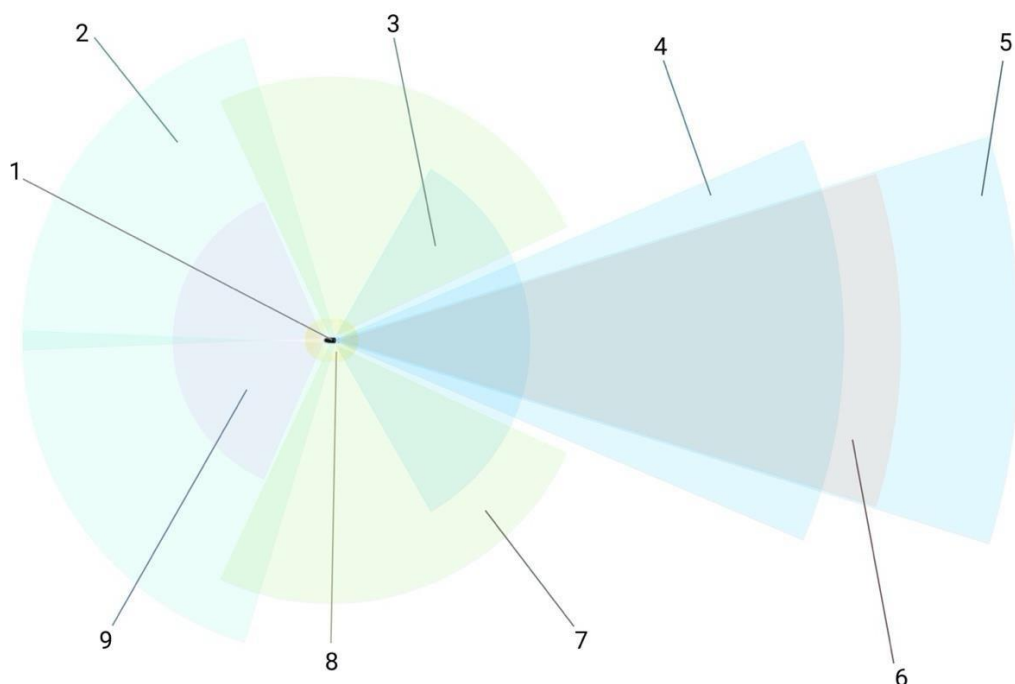
Однак нині електромобілі стали звичною ситуацією на дорогах. Вони вирішують завдання поліпшення екологічного стану, але не можуть зменшити кількість ДТП на дорогах зроблених через людський фактор. Недотримання швидкісного режиму чи неуважність на дорозі можуть забрати багато життів. Для розв'язання цієї проблеми все частіше і частіше в електромобілях

використовують систему автопілот для уникнення небезпечних ситуацій на дорозі.

## 1.2 Огляд існуючих рішень побудови системи керування електромобілем

Для вирішення проблеми великої кількості ДТП на дорозі було створено систему автопілот, яка базується на обчисленні стану автомобіля в просторі та прийнятті рішень щодо не критичних ситуацій (таких як дотримання смуги, рух з постійною швидкістю, тощо).

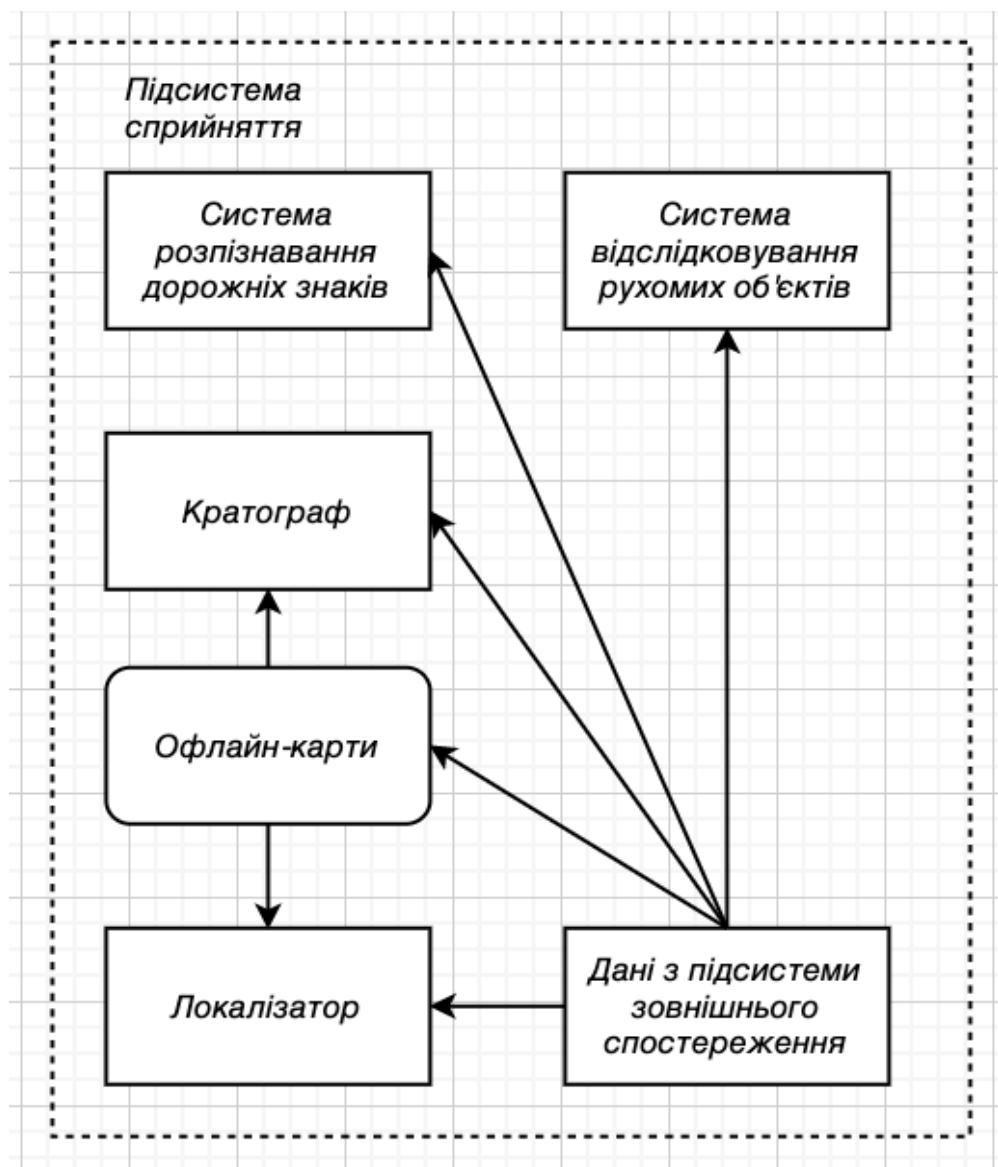
Технології безпілотного автомобіля, які використовуються в електромобілях з системою автопілот, дозволяють симулювати присутність людини на рівні прийняття рішень про вибір швидкості або руління. Цей вибір забезпечується завдяки набору камер, лідарів, радарів, сенсорів та інших систем визначення положення у просторі. Розташування цих систем зображено на рисунку 1.3.



Малюнок 1.3 – Розташування систем визначення положення у просторі та радіус їх дії на прикладі електромобіля Tesla (1 – електромобіль; 2 – бічні камери заднього виду (максимальна дистанція – 100 м);

- 3 – передня ширококутна камера (максимальна дистанція – 60 м);
- 4 – основна ширококутна камера (максимальна дистанція – 150 м);
- 5 – передня вузькокутна камера (максимальна дистанція – 250 м);
- 6 – радар (максимальна дистанція – 160 м);
- 7 – бічні камери з видом уперед (максимальна дистанція – 80 м);
- 8 – сонари (максимальна дистанція – 8 м);
- 9 – камери заднього виду (максимальна дистанція – 50 м) [9]

Дані з системи визначення положення у просторі потрапляють до самої системи автопілот. Типову архітектуру системи автопілотування в електромобілях можна побачити на рисунку 1.4 та розгорнутий вигляд на кресленику ІА61.050БАК Д2.





## Малюнок 1.4 – Типова ієрархічна архітектура підсистеми прийняття рішень в системі автопілотування в електромобілях

Для того, щоб орієнтувати автомобіль у навколишньому середовищі, підсистема прийняття рішень повинна знати, де в ній знаходиться безпілотний автомобіль.

Підсистема Локалізатор (рисунок 1.4) відповідає за оцінку стану автомобіля (лінійні швидкості, кутові швидкості тощо) стосовно статичних карт середовища. Ці статичні карти або офлайн-карти (рисунок 1.4) обчислюються автоматично перед автономною роботою, як правило, використовуючи датчики самого автомобіля. Автомобіль може використовувати більше однієї офлайн-карти, наприклад топографічні, ландшафтні, супутникові тощо [10].

Інформація про правила та положення щодо того, як автомобіль, має рухатися дорогами та автомагістралями (напрямок руху, максимальна швидкість, розмежування смуг тощо) також є необхідною для повноцінної роботи підсистеми прийняття рішень. Ця інформація зазвичай вбудовується в навігаційні карти, які представляють цю інформацію використовуючи геометричні та топологічні властивості карт [10].

Підсистема Картограф (рисунок 1.4) отримує на вхід офлайн-карту та стан безпілотного автомобіля у просторі і генерує на вихід онлайн-карту, яка є злиттям інформації з офлайн-карти, заповненої топографічної карти (дані для якої беруться з датчиків) та стану автомобіля у середовищі.

Також, для системи автопілот дуже важливою є інформація про положення та швидкість руху перешкод. Для цього підсистема відслідковування рухомих об'єктів (Moving Objects Tracker, MOT) (рисунок 1.4) отримує офлайн-карту і стан автомобіля в просторі, обраховує швидкість та положення найближчих перешкод (пішоходів, велосипедистів, тварин, тощо) і корегує онлайн-карту для подальшого безпечного руху автомобіля на дорозі [10].

За допомогою точної та синхронної роботи системи автопілот, обчислення стану автомобіля відбувається дуже швидко і у випадку створення непередбачуваної ситуації автомобіль швидко відреагує.

Для того щоб виявити наскільки добре працюють автопілоти різних компаній некомерційна компанія Страховий інститут безпеки дорожнього руху провів тестування деяких моделей з системою автопілот.

В тестах брали участь 2017 BMW5 Series (Driving Assistant Plus), 2017 Mercedes-Benz E-Class (Drive Pilot), 2018 Tesla Model 3 (Autopilot 8.1), 2016 Tesla Model S (Autopilot 7.1) і 2018 Volvo S 90 (Pilot Assist)[11].

Початкове тестування відбувалось з нерухомою машиною на дорозі. Всі учасники тестування, котрі рухались зі швидкістю 50 км/год показали гарні результати і вчасно змогли зупинитись, що означає що система лідарів і розпізнавання нерухомих об'єктів у всіх версіях автопілоту працює відмінно.

Далі були випробування з рухомою машиною на дорозі та при поворотах з різною кривиною, де всі показали гарні результати і змогли підлаштуватись та витримати потрібну дистанцію до машини попереду, а також правильно пройти поворот.

Було відтворено ситуацію при якій автомобіль, який їде попереду машини, що тестується, різко змінював смугу, і на трасі з'являлась перешкода. В рамках цього тесту Tesla Model 3 показала себе дуже добре і їй вдалось уникнути ДТП, в той час коли інші машини вимагали уваги водія для проходження цього випробування.

Було проведено також ряд тестів на дорогах громадського користування під час руху інших учасників дорожнього руху та на автомагістралях. Це дало можливість зрозуміти наскільки системи автопілотування добре виконують свою місію в місті та за ним. Результати тестування щодо того як електромобіль поводить себе на дорогах приведено в таблиці 1.1. Критеріями були наступні параметри: кількість разів коли електромобіль перетинав смугу, торкався смуги, система відключалась чи автомобіль повністю лишався в межах смуги. Тестування проводили як на прямій дорозі без поворотів, так і на горбистій місцевості з поворотами.

Таблиця 1.1 – Порівняння поведінки системи автопілот у різних автомобілях

Автомобіль	Кількість разів коли під час роботи системи автопілот автомобіль			
	пересікав смугу		торкався смуги	
	при русі по кривій	на пагорбі	при русі по кривій	на пагорбі
BMW 5 Series	3	6	1	1
Mercedes-Benz E-Class	2	1	5	1
Tesla Model 3	0	0	0	1
Tesla Model S	1	12	0	1
Volvo S90	8	2	0	1

Продовження таблиці 1.1

Автомобіль	Кількість разів коли під час роботи системи автопілот автомобіль			
	система відключилась		залишилась в межах смуги	
	при русі по кривій	на пагорбі	при русі по кривій	на пагорбі
BMW 5 Series	9	7	3	0
Mercedes-Benz E-Class	1	1	9	15
Tesla Model 3	0	0	18	17
Tesla Model S	0	0	17	5
Volvo S90	0	4	9	9

Найкраще у випробуваннях показав себе автомобіль Tesla Model 3 (в таблиці виділено та зафарбовано), в той час коли в інших учасників виникали труднощі і вони потребували присутності людини для вирішення складних задач.

Таким чином, на сьогоднішній момент тема розробки систем автопілотування в електромобілях є своєчасною та актуальною. Тому для подальшої роботи над дипломним проектом я обрав електромобіль від компанії Tesla, який на цей момент часу є одним за найпопулярніших та найбезпечніших варіантів електромобілів з системою автопілот.

## 2. РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Структурна схема автоматизованої системи керування швидкістю електромобіля представлений на Схемі електричній структурній ІА61.050БАК.005 Э1.

### 2.1 Опис роботи та аналіз основних елементів структурної схема автоматизованої системи керування швидкістю електромобіля

Система має такі ключові елементи як: блок підсистеми автономного керування електромобілем, блок підсистеми ручного керування, кнопка увімкнення, бортовий комп'ютер, електродвигун, блок акумулятора та блок ходової частини.

Роздивимось роботу кожного елемента окремо:

Блок акумулятора містить основний акумулятор, який живить електродвигун, роз'єм для зарядки, допоміжну акумуляторну батарею, яка слугує для живлення допоміжних систем, та сам зарядний пристрій. Роз'єм зарядки, допоміжна акумуляторна батарея та зарядний пристрій згруповані в блок живлення для зручності. Також наявний контролер живлення який контролює подачу струму на двигун, рівень заряду в акумуляторі та інші.

За допомогою кнопки увімкнення електромобіля подається струм на електродвигун і електромобіль готовий до початку руху.

Найчастіше в електромобілях ставлять синхронні електродвигуни – безколекторні машини, в яких відношення частоти обертання ротора до частоти струму в ланцюгу машини не залежить від навантаження. Статистика показує, що виробники електромобілів ставлять два електродвигуни – по одному на задню та передню осі автомобіля. Як, наприклад, в Porsche Taycan. Він має 2 синхронні двигуни змінного струму на передній та задній осі. Але також

використовують асинхронні електродвигуни. Частіше усього трьохфазні, як у Tesla Model X. [12]

Блок підсистеми автономного керування електромобілем містить в собі блок датчиків, а також систему автопілотування.

Датчики захоплюють зображення навколишнього середовища, в якому знаходиться електромобіль і передають масив даних в підсистему керування напрямом швидкістю. Після підрахунку траєкторії руху, система дає сигнал на двигун збільшити або зменшити оберти для збільшення чи зменшення швидкості автомобіля.

За необхідності система побудує траєкторію для маневру руху на випередження, якщо не буде ніяких завад. В цьому випадку система дасть сигнал на електродвигун збільшити оберти, для того аби набрати більшу швидкість, та дасть сигнал на систему рульового керування для зміни маршруту.

У випадку непередбачуваної ситуації (наприклад перешкода, яку не помітили датчики, чи велосипедист який їде не по правилах) система почне сигналізувати про необхідність втручання людини у роботу автопілота для вирішення ситуації.

Через те, що автопілот не є автоматизованою системою 5 рівня, представники компаній не рекомендують водіям прибирати руки з руля, для того щоб швидко відреагувати на непередбачувану ситуацію. Так, для індикації того що руки водія знаходяться на рулі використовують датчики які «вшиті» в оболонку руля і у випадку якщо водій прибирає руки довше ніж на 30 с система зробить голосове оповіщення, а у випадку якщо водій прибирає руки більше ніж на 45 с то система ще раз робить сповіщення, шукає безпечне місце в якому можна зупинитись, обережно зупиняється і примусово вимикає електромобіль з автопілотом [13].

Блок підсистеми ручного керування електромобілем містить в собі гальмівну систему та систему рульового керування.

В гальмівній системі електроавтомобілів використовують систему рекуперативного гальмування, що дозволяє під час процесу гальмування додатково заряджати акумулятори електромобіля [14].

Роботу рекуперативної системи гальмування можна описати наступним чином:

- при гальмуванні силовий апарат електромобіля відмикається від акумулятора і переходить в генераторний режим, тим самим самостійно виробляючи енергію;
- в такому режимі на обмотках статора і ротора виникають протилежні токи;
- на валу електромобіля виникає гальмівний момент який і забезпечує гальмування транспортного засобу;
- одночасно з цим кінетична енергія машини перетворюється в тепло та електроенергію;
- після чого електрична енергія поступає в акумулятор, тим самим заряджаючи його.

Як результат – чим частіше електромобіль гальмує тим частіше заряджається акумулятор.



Малюнок 2.1 – Принцип роботи рекуперативної системи в електромобілі.



Використання такої системи неможна назвати достатньо ефективним. Виробники хоч і називають ККД в 60-70%, але при подальшому перерахунку стає зрозуміло що 20-30% втрачаються одразу ж на перетворення кінетичної енергії в електроенергію.

При використанні такої системи в місті, коли необхідно здійснювати коротке гальмування, користі майже немає, через те що електрокар достатньо легкий і при їзді на рівній поверхні він вивільнює не дуже велику кінетичну енергію. Але варто змінити ландшафт (наприклад, горбиста місцевість, де водію необхідно гальмувати при спуску) і показники рекуперативної системи значно зростуть. Інколи, система може додати ще 20-30% до ходу автомобіля.

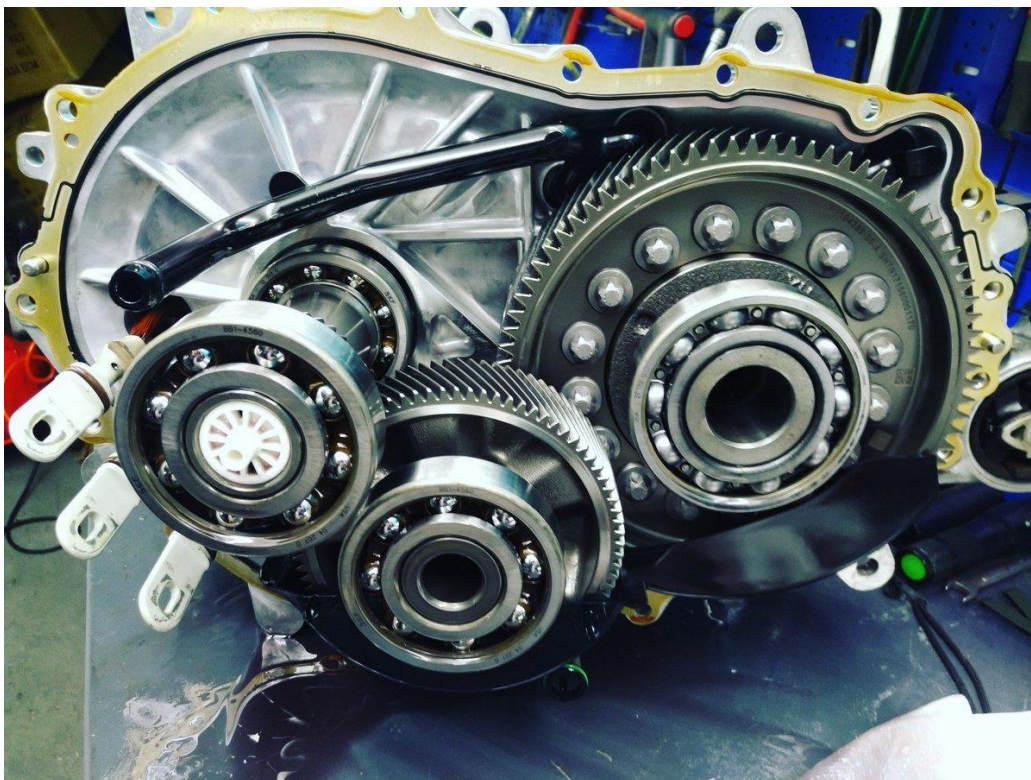
Система рульового керування складається з рульового колеса – власне кермо, рульової колонки, яка зв'язує рульове колесо з рульовим механізмом, сам рульовий механізм, який передає заданий вплив на привод, і рульовий привод, який відповідає за зв'язок рульового впливу на колеса.

Більшість сучасних автомобілів мають також гідравлічний підсилювач рульового управління – гідропідсилювач руля, який створює додаткове зусилля при повороті руля. Різновидом гідропідсилювача є електрогідросилуєвач рульового управління. В такому підсилювачі гідропомпа має привод до електродвигуна.

А з розквітом електромобілів все ширше застосовують електричний підсилювач рульового управління – електропідсилювач руля. В такому випадку, крутильний момент від електродвигуна може передаватись напяму на вал руля або зубчасту рейку, а електроніка дозволяє використовувати електропідсилювач для автоматичного керування автомобілем, як в системі автоматичного паркування.

В блоці ходової частини варто приділити увагу одношвидкісній трансмісії. Механічна характеристика електродвигуна, а саме залежність частоти обертання валу, від обертального моменту, який він розвиває, має нелінійну форму. Але, на відміну від двигуна внутрішнього згорання, навіть при повній зупинці ротора електродвигун видає дуже високий момент, майже максимальний. Це розв'язує задачу руху автомобіля з місця і регулювання оборотів

в режимі з постійною швидкістю. Простота електромобіля полягає в тому, що необхідно просто підтримувати максимально високий момент на оборотах згідно з механічною характеристикою двигуна (ця величина визначається завдяки тестам проведених на еталонному двигуні). Дане регулюванні відбувається завдяки зміні частоти струму на обмотках. Саме тому в електрокарів трансмісія має спрощений вид. В іншому випадку, звичайна ж трансмісія додала б ваги, тертя і неефективність системі. Ось чому найчастіше в електромобілях ставлять одношвидкісні трансмісії (single-speed). Як приклад, одношвидкісна трансмісія 9.73:1 в Tesla Model S та Tesla Model X (рисунок 2.2).



Малюнок 2.2 - Одношвидкісна трансмісія 9.73:1 в Tesla Model S та Model X

Також в електромобілях встановлено бортовий комп'ютер, який слідкує за станом систем та контролює основні функціональні компоненти в електромобілі. Також за допомогою бортового комп'ютера можна здійснювати пошук в інтернеті, прослуховування та перегляд музики та відео, тощо.

Робота електромобіля при ручному керуванні проходить за наступним чином:

- автомобіль вмикається та запускається двигун;
- відбувається внутрішнє тестування основних систем автомобіля на предмет неполадок. При виявленні неполадок виводиться відповідної інформації на панель керування;
- автомобіль готовий до роботи.

Робота електромобіля при автономному керуванні виглядає інакше:

- автомобіль вмикається та запускається двигун;
- відбувається внутрішнє тестування основних систем автомобіля на предмет неполадок. При виявленні неполадок виводиться відповідної інформації на панель керування;
- якщо людина рухається в місцевості де можна увімкнути автопілот автомобіль пропонує це зробити;
- вмикаються всі допоміжні системи (лідари, радары, GPS-датчики, тощо), збираються данні, будується математична модель електромобіля у просторі та будується маршрут до заданої точки (якщо вона є);
- для забезпечення безпечності руху перевіряється наявність рук водія на кермі;
- у випадку непередбачуваної ситуації система робить голосове повідомлення про необхідність втрутитись в роботу системи автопілот.

У всьому іншому робота оператора з електромобілем особливо не відрізняється від роботи з автомобілем на двигуні внутрішнього згоряння.

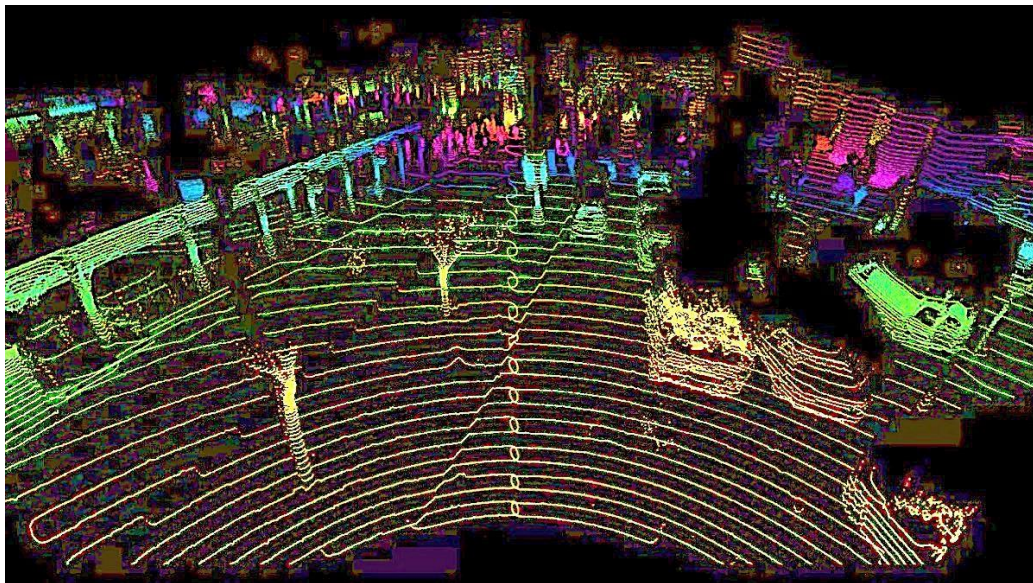
## ЗРОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Функціональна схема електромобіля побудована на базі структурної схеми. Вона представлена на Схемі електричній функціональній ІА61.050БАК.005 Э2.

Блок підсистеми автономного керування автомобілем для зчитування інформації про навколишній світ містить лідари, радары, камери, GPS-датчики, датчики в середині салону та модуль LTE.

Загалом сенсори електромобіля збирають інформацію про навколишні об'єкти, а саме розмір, відстань до автомобіля, швидкість руху, якщо це дорожні знаки—то ідентифікують знак та передають відповідну команду. Також сенсори зчитують інформацію про пішоходів, велосипедистів, інших учасників руху для того аби безпечно пересуватись.

Лідари сканують навколишній світ та створюють модель (карту об'єктів) навколишніх об'єктів, що знаходяться навколо машини. Приклад карти об'єктів побудованої лідаром на автомобілі представлений на рисунку 3.1.



Малюнок 3.1—Карта об'єктів побудована лідаром.

Радари дозволяють майже миттєво і з високою точністю отримати

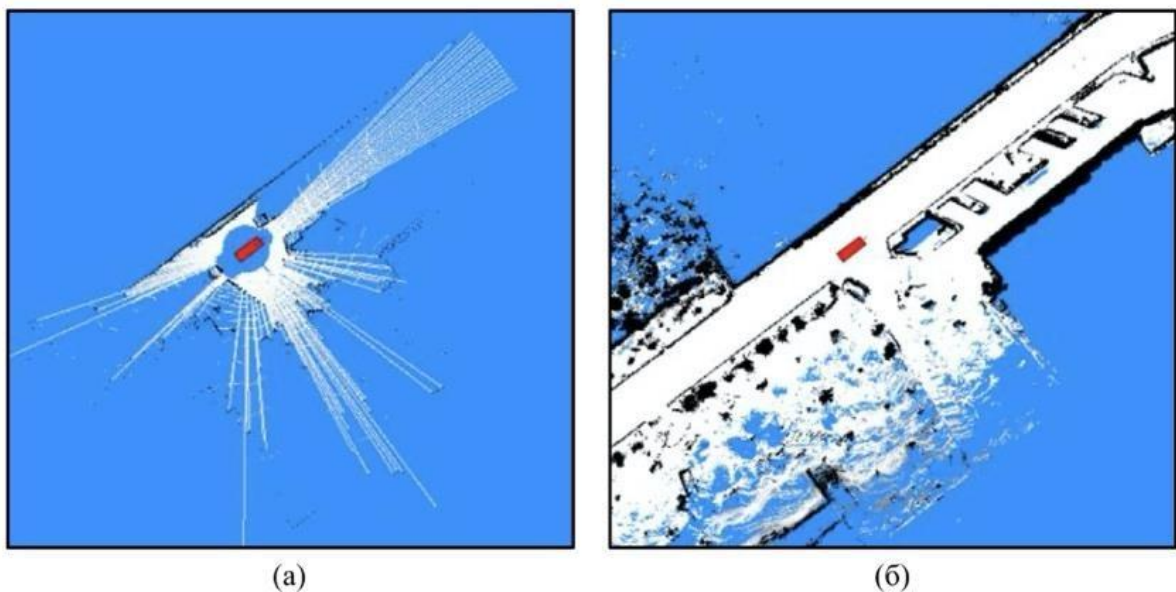


інформацію про відстань до об'єкта та його швидкість. Одним з мінусів радара є те, що доводиться обирати між дальністю дії і областю видимості. Можна отримати данні на великій відстані, але при цьому з маленькою областю видимості. Або навпаки, з великою областю видимості, але поблизу.

Набір камер (вузько кутові та ширококутові) знімає навколишнє оточення для того щоб комп'ютерний зір зміг розпізнати дорожню розмітку, знаки, колір світлофора, визначити поведінку об'єктів.

Також в автомобілях використовують ультразвукові сенсори – сонари – для того щоб розпізнати об'єкти, що знаходяться поблизу машини. Принцип дії дуже простий: випромінює ультразвукову хвилю, ловить відбиту хвилю, обчислює відстань до об'єкта.

GPS-датчики використовуються у поєднанні з високоточною картографією для позиціонування автомобіля у просторі. Як було описано вище використовують як онлайн карти так і офлайн, і за допомогою системи Локалізатор можна отримати положення машини на карті.



Малюнок 3.2 – Карти, побудовані за допомогою датчиків автомобіля:

а) миттєва карта, після першого сканування місцевості. Червоний прямокутник – це автомобіль на карті, чорні пікселі – місцевість з великим відсотком перешкоди, білі пікселі – місцевість на якій не було знайдено перешкод, сірі пікселі –

ймовірно містять перешкоди, а сині комірки це регіони, до яких «не торкнувся» сенсор;

б) офлайн карта, на якій показана найактуальніша інформація про місцевість в якій знаходиться автомобіль [15];



(в)

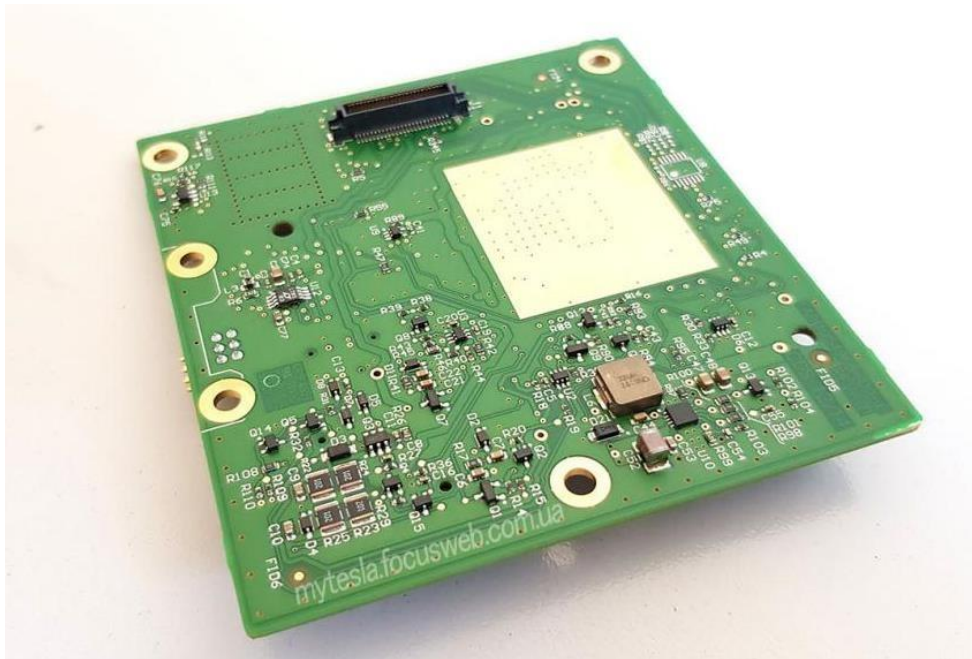
Малюнок 3.3 – Карти, побудовані за допомогою датчиків автомобіля:  
в) онлайн карта, яка створюється накладанням миттєвої карти на офлайн [15]

Датчики в середині автомобіля - це датчики, які вшиті в кермо. Як було описано вище – система автопілотування буде сигналізувати якщо руки водія не знаходяться на кермі [16].

Для передавання даних про швидкість електромобіля в колеса влаштовано тахометр, який передає всі данні в підсистему керування швидкістю та напрямом. Це зроблено для того аби відслідкувати актуальну швидкість електромобіля та обороти ротора для правильної передачі даних.

Модуль LTE відповідає за стабільну роботу Інтернету для забезпечення

оптимальної роботи сервісів, пов'язаних з роботою підсистем локалізації автомобіля у просторі. Також, модуль LTE використовується для пошуку в інтернеті. Модуль який використовують в електромобілях Tesla зображено на рисунку 3.4.



Малюнок 3.4-Модуль LTE

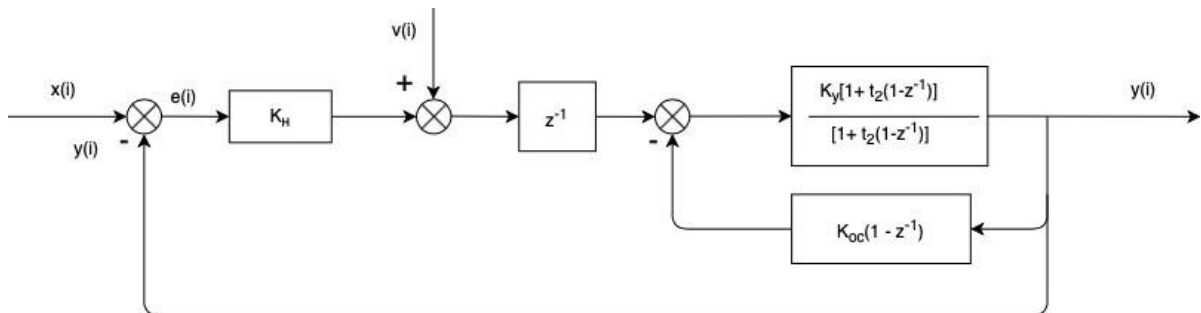
В блоці акумулятора також міститься холодоелемент. Для того щоб уникнути перегріву акумулятора використовують іммерсійне охолодження за допомогою діелектричної рідини. Така технологія активно використовується при охолодженні обчислювальної техніки. Коли акумулятор починає нагрівати рідину, він активно втрачає температуру, тобто охолоджується. Діелектрична речовина починає закипати під впливом температур і забирає зайву енергію. Це дозволяє забезпечити довший строк роботи акумулятора.

## 4 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

### 4.1 Виведення математичної моделі об'єкту управління

Було розглянуто моделі з моделювання ефективності управління автотранспортним засобом по каналу швидкості руху, які відрізняються ступенями мотиваційного сприйняття дорожньої ситуації. З їх числа обрана модель з низьким ступенем мотивації. Це означає, що така модель відповідає ситуації руху надорозі безперешкод, з гарними погодними умовами (прекрасна видимість, без опадів) та без потреби йти на обгін. Рух контролюється дорожніми знаками, розміткою та світлофорами і відбувається з повним дотриманням правил дорожнього руху. [17]

За основу була прийнята модель системи автоматичного регулювання, що формує керуючі дії оператора щодо вибору швидкості руху [17], схема якої представлена на рисунку 4.1.



Малюнок 4.1 - Схема математичної моделі автотранспортного засобу з низьким ступенем мотиваційного сприйняття,

де  $K_n$  - коефіцієнт перетворення вимірювача неузгодженостей;

$K_y$  - коефіцієнт перетворення формуючої ланки;

$K_{oc}$  - коефіцієнт перетворення негативного зворотного зв'язку "по швидкості";

$\tau_1, \tau_2$  - постійні часу дискретних аперіодичної і різницевої ланок першого порядку;



$(1-z^{-1})$ —дискретна різницева ланка;

$1 + \tau_2(1 - z^{-1})$  – різницева ланка 1-го порядку, що характеризує формування динаміки поведінки з урахуванням поведінкової

неузгодженості і швидкості її зміни, а також забезпечує стійкість - працезд

$\frac{1}{1+\tau_1(1-z^{-1})}$  -дискретна аперіодична ланка, що враховує інерційність

оператора.

#### 4.2 Виведення передавальної функції автоматизованої системи керування швидкістю електромобіля

Передавальна функція автомобіля включає час реакції на спрацьовування виконавчих пристроїв автомобіля. У моделі, приведений на рисунку 4.1, пропонується виконати її інерційною ланкою

$$W_A(s) = \frac{K_d}{T_s s + 1} \quad (4.1)$$

В формулі (4.1)  $W_A(s)$  – це передавальна функція автомобіля,  $K_d$  – коефіцієнт підсилення-перетворення,  $T_s$  – постійна часу, що залежить від швидкості руху, типу транспортного засобу, виду приводу, і визначається часом спрацьовування виконавчих механізмів автомобіля.

Для розрахунку постійної часу електромобіля було взято паспортні дані електродвигуна електромобіля Tesla Model X.

Таблиця 4.1 – Паспортні данні двигуна електромобіля Tesla Model X [12]

$P_n$	номінальна потужність, (Вт)	193136
$n_n$	номінальна швидкість обертання, (об/ хв)	18000
$U_n$	номінальна напругу, (В)	320
$I_n$	номінальний струм якоря, (А)	555.27
$R_d$	опір ланцюга обмотки якоря, (Ом)	0.02
$J_d$	момент інерції якоря, (кг·м <sup>2</sup> )	0.06
$\eta_d$	ККД двигуна	92
$J_{oy}$	момент інерції ОУ	931
$J_p$	момент інерції редуктора, (кг·м <sup>2</sup> )	0.0001
$i_p$	Оптимальне передавальне число редуктора	9.73

Послідовно визначаємо наступні величини, необхідні для розрахунку електромеханічної постійної часу обраного електромобіля.

Номінальна кутова швидкість двигуна  $\omega_n$  визначається за формулою:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} \quad (4.2)$$

$$\omega_n = \frac{3.14 \cdot 18000}{30} = 1884 \quad (4.3)$$

н  
30

$M_H$ –номінальний момент двигуна:

$$M_H = 9.55 \frac{P_H}{n_H} \quad (4.4)$$

$$M_H = 9.55 \frac{259000}{18000} = 102.46 \quad (4.5)$$

Коефіцієнт підсилення двигуна  $K_d$  визначається діленням номінальної напруги електродвигуна на номінальну кутову швидкість:

$$K_d = \frac{U_H}{\omega_H} \quad (4.6)$$

$$K_d = \frac{320}{1884} \approx 0.197 = 0.2 \quad (4.7)$$

Формула електромеханічної сталої часу  $T_d$  має вигляд:

$$T_d = \frac{\alpha J_c R_d}{C C_{mc}} \quad (4.8)$$

де  $\alpha=1.2$ – постійний коефіцієнт.

Для полегшення обчислень всі параметри електромеханічної сталої часу було обраховано окремо.

$$C_m = I_H \frac{M_H}{n_H} \quad (4.9)$$

$$C_m = \frac{137.414}{744.63} \approx 0.18454 = 0.185 \quad (4.10)$$

$$C_c = \frac{U_H - 1.2R_d I_H}{\omega_H} \quad (4.11)$$

$$C_c = \frac{320 - 1.2 * 0.02 * 744.63}{1884} \approx 0.16169 = 0.162 \quad (4.12)$$

$J_c$ -сумарний момент інерції

$$J_c = J_d + J_p + l^2 \eta \frac{J_0}{r_d} \quad (4.13)$$

$$J_c = 0.006 + 0.0001 + 9.73 * 0.92 \frac{931}{10.749} = 10.75 \quad (4.14)$$

Таким чином було отримано електромеханічну сталу часу за формулою (4.8):

$$T_d = \frac{1.2 * 10.75 * 0.02}{0.185 * 0.162} \approx 0.226783 = 0.23 \quad (4.15)$$

Беручи до уваги всі розрахунки, передавальна функція автомобіля в моделі системи автоматичного керування швидкістю електромобіля має вигляд:

$$W_A(s) = \frac{0.2}{0.23s + 1} \quad (4.16)$$

Передавальна функція оператора також є інерційною ланкою. Ця ланка характеризує реакцію та сприйняття оператора дороги та дорожніх умов.

Вираховується за допомогою такої передавальної функції

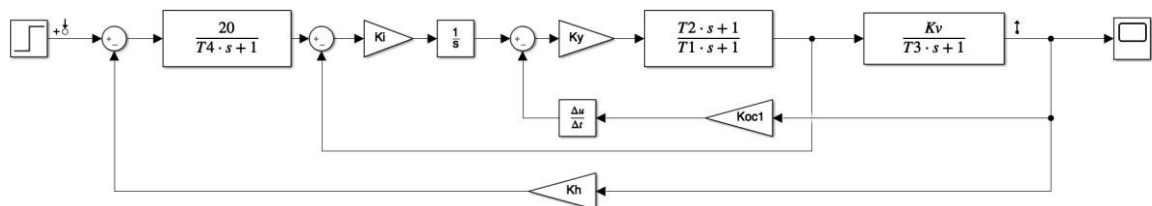
$$W_n(s) = \frac{1}{T_s s + 1} \quad (4.17)$$

де  $W_A(s)$  - передавальна функція інерційної ланки, яка характеризує реакцію оператора на дорогу;

$T_4$ —час реакції оператора на зміну дорожніх умов.

Для вибору оптимального часу спрацьовування автоматизованої системи на зміну дорожніх умов було проаналізовано час сприйняття людиною. Для водія час сприйняття дорожніх умов залежить від часу передачі відчуття від органів чуття в мозок, що в середньому це займає 100-200 мілісекунд (0.1 с – 0.2с), та від часу реакції мозку на це відчуття (в середньому 0.1 с – 0.3 с)[18]. Тому, можна вважати, що реакція на зміну дорожніх умов  $T_4$  лежить в межах (0.3-0.6) с.

В рамках пакета Math Lab Simulink було побудовано модель системи автоматичного регулювання швидкістю електромобіля.



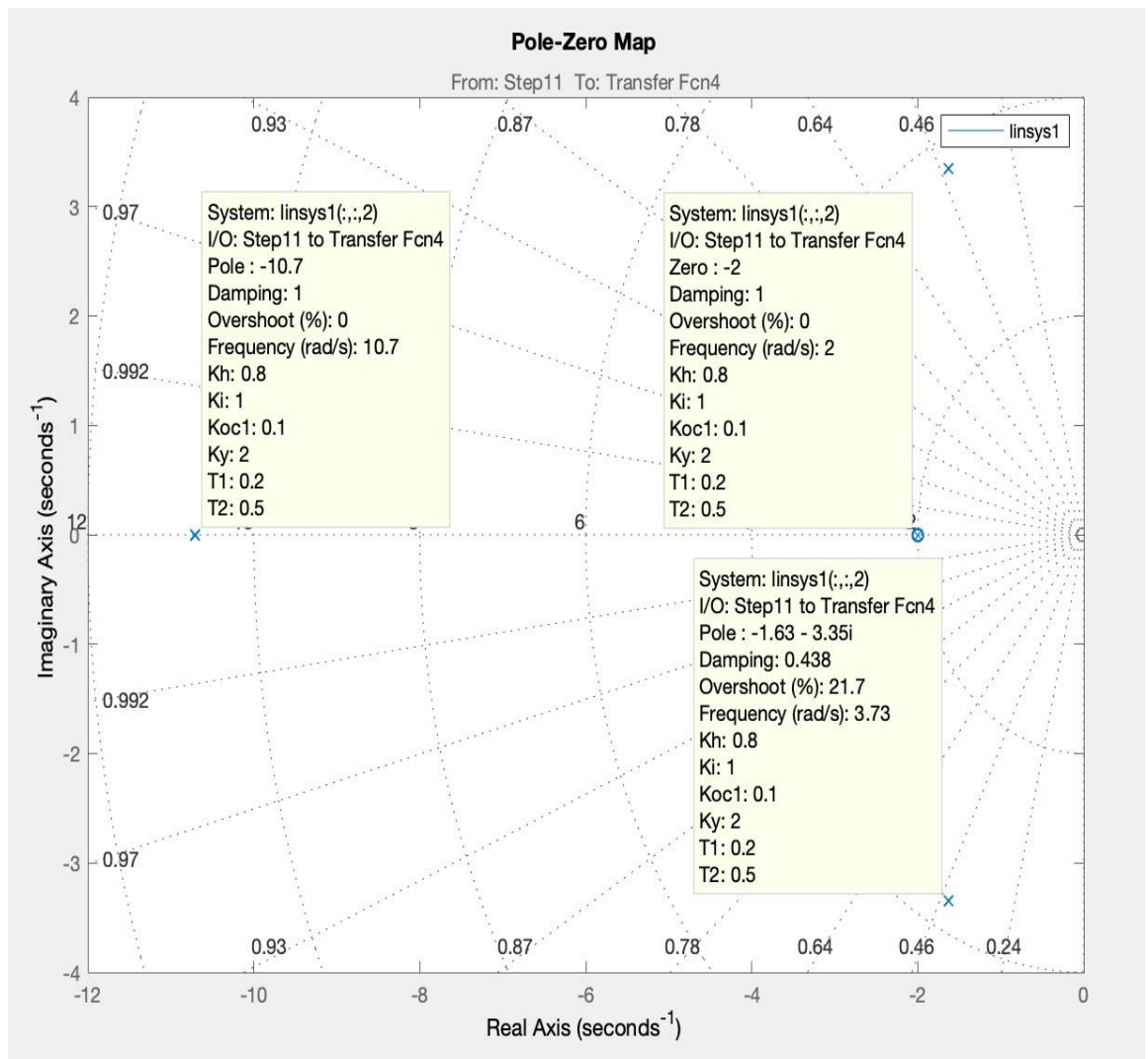
Малюнок 4.2—Модель системи автоматичного регулювання швидкістю електромобіля.

У моделі (рисунок 4.2) прийняті наступні позначення:  $K_i$  - коефіцієнт перетворення вимірювача неузгодженостей;  $K_y$  - коефіцієнт перетворення формуючої ланки;  $1/s$ -інтегруюча ланка першого порядку;  $T_1, T_2, T_4$ -постійні часу, що характеризують поведінкові функції оператора;  $K_{oc1}$  - коефіцієнт негативного зворотного зв'язку «за швидкістю»;  $K_h$  - коефіцієнт негативного зворотного зв'язку загальної системи регулювання.

Інші параметри  $T_1, T_2, T_3$  були обрані з джерела [19]:  $T_1=0.2; T_2=0.5; T_3$

$=0.6; T_4=0.23; K_y=2; K_i=1; K_v=0.2; K_h=0.8; K_{oc1} = 0.1.$

Для спрощення моделі передавальної функції використаємо метод лінеаризації системи. На рисунку 4.3 представлені полюси системи.



Малюнок 4.3 Результати аналізу лінеаризованої моделі в пакеті Mat Lab Linear Anylsis Tool

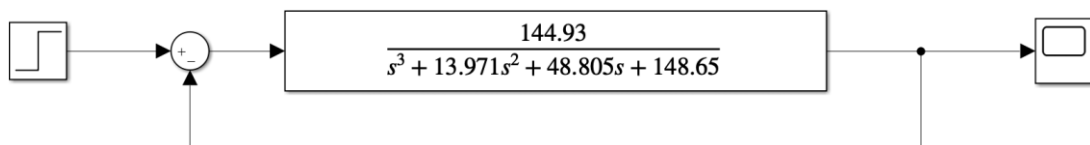
Як видно з діаграми на рисунку 4.3, передавальна функція лінеаризованої моделі має чотири полюси та нуль. Полюси:  $P_1=-2, P_2=-10.7, P_3=-1.63-3.35i, P_4 = -1.63 + 3.35i$ . Нуль:  $O_1 = -2$ .

Передавальна функція лінеаризованої системи безперервної частини має вигляд:

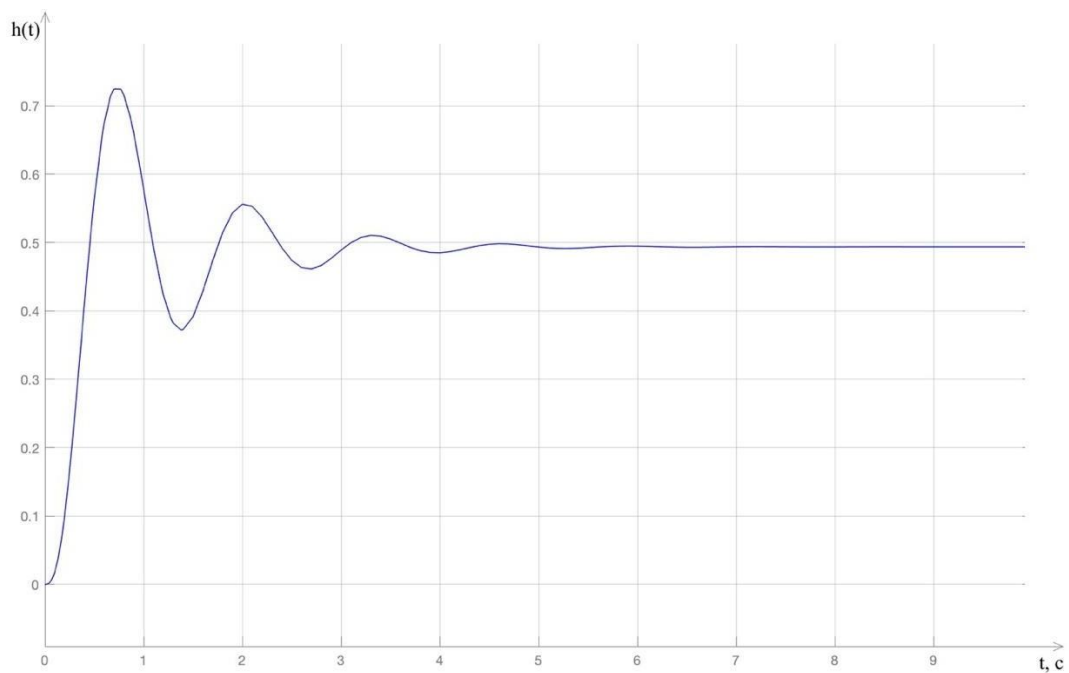
$$\begin{aligned}
 W(s) &= \frac{144.93 \cdot (s + 2)}{(s+2)(s+10.71)(s^2+3.261s+13.88)} \\
 &= \frac{144.93}{(s+10.72)(s^2+3.261s+13.88)} \\
 &= \frac{144.93}{(s+10.72)(s+1.63+3.35i)(s+1.63-3.35i)}
 \end{aligned}
 \tag{4.18}$$

4.3 Розроблення моделі досліджуваної системи в прикладному пакеті MathLabSimulink.

Будуємо лінеаризовану передавальну функцію в MatLab. Побудована модель зображена на рисунку 4.4.



Малюнок 4.4—Модель лінеаризованої системи.



Малюнок 4.5—Графік перехідного процесу.

Для характеристики перехідного процесу використовуються часові характеристики, а саме перерегулювання, час установлення та час перехідного процесу.

Перерегулюванням  $\sigma\%$ , називається максимальне відхилення вихідної величини від сталого значення. Обчислюється за формулою:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{ст}}{h_{ст}} * 100\%, \quad (4.19)$$

де  $h_{max}$  – максимальне відхилення,  $h_{ст}$  – стале значення.

Час установлення  $t_{уст}$  – проміжок часу, за який вихідна величина вперше досягла сталого значення.

Час перехідного процесу  $t_{пп}$  – характеризує швидкість системи. Це час від початку перехідного процесу до того моменту, коли відхилення вихідної величини залишається в межах заданої величини  $2\sigma$  [20, 21].

Як видно з графіку перехідного процесу на рисунку 4.5 система має такі показники якості:

Максимальне відхилення  $h_{max} = 0.7403$ ;

Стале значення  $h_{ст} = 0.4938$ ;

Час установлення  $t_{уст} = 0.453$ с;

Час перехідного процесу  $t_{пп} = 3.6$ с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{0.7403 - 0.4938}{0.4938} * 100\% = 49.67\%$

#### 4.4 Розроблення цифрової моделі досліджуваної моделі.

Обчислимо передавальну функцію приведеної безперервної частини системи керування. Передавальна функція обчислюється наступним чином:



$$1 - e^{-T_0 s} \quad (4.20)$$

$$W_{\text{ПБЧ}}(s) = \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s} W_{\text{БЧ}}(s).$$

$$W_{\text{ПБЧ}}(s) = Z\left\{ \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s} W_{\text{БЧ}}(s) \right\} = Z\left\{ \frac{W_{\text{БЧ}}(s)}{s} \right\} - Z\left\{ \frac{e^{-T_0 s} W_{\text{БЧ}}(s)}{s} \right\} \quad (4.21)$$

Для подальших обчислень треба застосувати теорему про заміщення аргументу в оригіналі.

$$Z\{f(t \pm vT)\} = Z\{e^{\pm vT_0 s} F(s)\} = z^{\pm v} Z\{F(s)\} \quad (4.22)$$

Тоді,

$$Z\left\{ \frac{W_{\text{БЧ}}(s)}{s} \right\} - z^{-1} Z\left\{ \frac{W_{\text{БЧ}}(s)}{s} \right\} = \frac{z - 1}{z} \left\{ \frac{W_{\text{БЧ}}(s)}{s} \right\} \quad (4.23)$$

Розрахунок Z-перетворення аналітично.

$$W_{\text{БЧ}}(z) = \frac{144.93}{(s+10.72)(s+1.63+3.35i)(s+1.63-3.35i)} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{ПБЧ}}(z) &= \frac{z-1}{z} \left\{ \frac{144.93}{s(s+10.72)(s+1.63+3.35i)(s+1.63-3.35i)} \right\} \\ &= 144.93 \frac{z-1}{z} \left\{ \frac{1}{(s+10.72)(s+1.63+3.35i)(s+1.63-3.35i)} \right\} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Для подальшого обчислення за допомогою методів невизначених коефіцієнтів було розкладено передавальну функцію  $W_{\text{ПБЧ}}$  на суму простих дробів:

$$\frac{A}{s} + \frac{B}{(s+10.72)} + \frac{C}{(s+1.63+3.35i)} + \frac{D}{(s+1.63-3.35i)} = \frac{1}{s(s+10.72)(s+1.63+3.35i)(s+1.63-3.35i)} \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} & A(s+10.72)(s+1.63+3.35i)(s+1.63-3.35i) + \\ & + Bs(s+1.63+3.35i)(s+1.63-3.35i) + \\ & + Cs(s+10.72)(s+1.63-3.35i) + \\ & + Ds(s+10.72)(s+1.63+3.35i) = 1 \end{aligned} \quad (4.27)$$

Виконаний математичний розрахунок коефіцієнтів A, B, C і D. Коефіцієнт B:

$$s = -10.72 \quad (4.28)$$

$$B * (-10.72) * (-10.72^2 + 3.261 * -10.72 + 13.88) = 1 \quad (4.29)$$

$$B * (-1003.085) = 1 \quad (4.30)$$

$$B = -0.00099 \quad (4.31)$$

Коефіцієнт A:

$$s = 0 \quad (4.32)$$

$$A(0+10.72)(0^2 + 3.261 * 0 + 13.88) = 1 \quad (4.33)$$

$$A * (148.7936) = 1 \quad (4.34)$$

$$A = 0.00672 \quad (4.35)$$

Коефіцієнт C:

$$s = -1.63 - 3.35i \quad (4.36)$$

$$C(-1.63-3.35i)(-1.63-3.35i+10.72)(-1.63-3.35i+1.63-3.35i) = 1 \quad (4.37)$$

$$C(-1.63-3.35i)(9.09-3.35i)(-6.7i) = 1 \quad (4.38)$$

$$C(-167.4397+174.4626i)=1 \quad (4.39)$$

$$C = \frac{1}{-167.4397+174.4626i} \quad (4.40)$$

Коефіцієнт D:

$$s = -1.63 + 3.35i \quad (4.41)$$

$$D(-1.63+3.35i)(-1.63+3.35i+10.72)(-1.63+3.35i+1.63+3.35i)=1 \quad (4.42)$$

$$D(-1.63+3.35i)(9.09+3.35i)(6.7i)=1 \quad (4.43)$$

$$D(-167.4397-174.4626i)=1 \quad (4.44)$$

$$D = \frac{1}{-167.4397-174.4626i} \quad (4.45)$$

Так як коефіцієнти A, B, C, D відомі, вираз  $W_{\text{ПБЧ}}(z)$  має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{z-1}{z} \left\{ \frac{A}{0.00672} + \frac{144.93}{-0.00099} \right. \\ \left. + \frac{1}{(s+1.63+3.35i)(-167.4397+174.4626i)} \right. \\ \left. + \frac{1}{(s+1.63-3.35i)(-167.4397-174.4626i)} \right\} \end{aligned} \quad (4.46)$$

Виконати z-перетворення користуючись таблицею z-перетворень неможливо, так як вираз має комплексні числа. У цьому випадку z-перетворення було обраховане завдяки вбудованим методам командного рядка MatLab.

Передавальну функцію безперервної частини в командному рядку:

```
>>wfin=tf([144.93],[113.97148.805148.65])
```

wfin=

144.9

$$\frac{144.9}{s^3 + 13.97s^2 + 48.8s + 148.7}$$

Continuous-timetransferfunction.

Тодіз-перетворення:

```
>>wzfin=c2d(wfin,0.1) wzfin
```

=

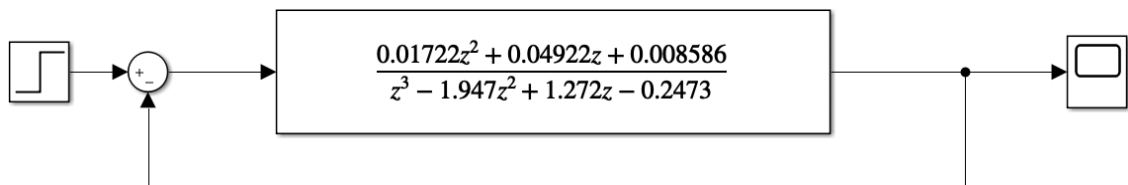
$$\frac{0.01722z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473}$$

Sampletime: 0.1

secondsDiscrete-

timetransferfunction.

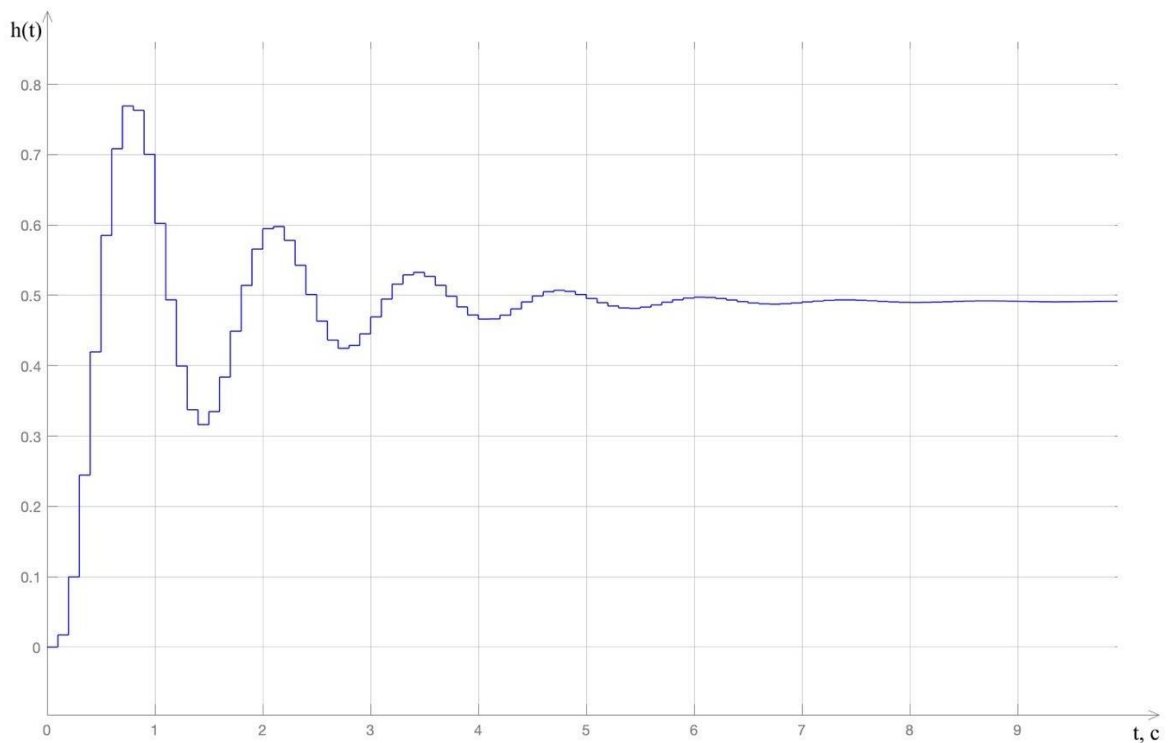
Моделювання цифрової системи за допомогою блоку Discrete Transfer Fcn у пакеті MatLabSimulink зображено на рисунку 4.6.



Малюнок4.6–Модель цифрової системи

Графік перехідного процесу передавальної функції цифрової системи

представлений на рисунку 4.7.



Малюнок 4.7 – Графік переходного процесу цифрової системи.

Показники якості графіка переходного процесу цифрової системи, зображеної на рисунку 4.7:

Максимальне відхилення  $h_{\max} = 0.7691$ ;

Стале значення  $h_{\text{ст}} = 0.4915$ ;

Час установа  $t_{\text{уст}} = 0.6831$

с; Час переходного процесу  $t_{\text{пп}} = 3.6$  с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{0.7691 - 0.4915}{0.4915} * 100\% = 65.34\%$

## 5 АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ І ЯКОСТІ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

### 5.1 Аналіз стійкості системи

Дослідження стійкості цифрової системи за допомогою загального алгоритму.

Загальний алгоритм дослідження стійкості полягає у знаходженні коренів характеристичного рівняння [20]. Для цього необхідно замкнути цифрову систему. Замикання цифрової системи відбувається за формулою, наведеною нижче:

$$W_3(z) = \frac{W_{\text{ПБЧ}}(z)}{1 + W_{\text{ПБЧ}}(z)} \quad (5.1)$$

Розрахунок замкненої системи.

$$\begin{aligned} W_{\text{ПБЧ}}(z) &= \frac{0.01722z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473} \quad (5.2) \\ W_3(z) &= \frac{\frac{0.01722z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473}}{1 + \frac{0.01722z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473}} \\ &= \frac{0.01722z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473} \\ &\quad * \frac{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473}{z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872} \\ &= \frac{0.01722z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872} \end{aligned}$$

Характеристичне рівняння має наступний вигляд:

$$D(z)=z^3-1.92978z^2+1.32122z-0.23872 \quad (5.4)$$

Через те, що характеристичне рівняння третього степеня, розклад його на множники виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} D(z) &= z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872 \\ &= (z - 0.276086)(z^2 - 1.65969z + 0.864658) \\ &= (z - 0.276086)(z - 0.826847 + 0.4254i)(z - 0.826847 - 0.4254i) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Корені рівняння:

$$z_1 = 0.276086 \quad (5.6)$$

$$z_{2,3} = 0.826847 \pm 0.4254i \quad (5.7)$$

Умовою стійкості системи є

$$|z_i| < 1 \quad (5.8)$$

Модуль комплексних коренів.

$$|z_{2,3}| = \sqrt{u^2 + v^2} = \sqrt{0.826847^2 + 0.4254^2} \approx 0.9219861, \quad (5.9)$$

де  $u$  – дійсна частина;  $v$  – уявна частина.

Оскільки

$$|z_1| = 0.276086 < 1, \quad (5.10)$$

та

$$|z_{2,3}|=0.922<1, \quad (5.11)$$

то система стійка.

Перевіримо систему на стійкість, застосовуючи критерій Гурвіца. Для того щоб застосувати критерій Гурвіца необхідно виконати білінійне перетворення. Для цього в характеристичному рівнянні  $D(z)$  виконується наступна підстановка.

$$z = \frac{1+w}{1-w} \quad (5.12)$$

Заміна в характеристичному рівнянні.

$$\left(\frac{1+w^3}{1-w}\right) - 1.92978\left(\frac{1+w^2}{1-w}\right) + 1.32122\left(\frac{1+w}{1-w}\right) - 0.23872 = 0 \quad (5.13)$$

Зведення до спільного множника

$$\frac{(1+w)^3}{w(1-w)^3} - 1.92978 \frac{(1+w)^2(1-w)}{(1-w)^2} + 1.32122 \frac{(1+w)(1-w)^2}{(1-w)} - 0.23872(1-w)^3 = 0 \quad (5.14)$$

$$\frac{(1+w)^3}{(1-w)^3} - \frac{1.92978(1+w)^2(1-w)}{(1-w)^3} + \frac{1.32122(1+w)(1-w)^2}{(1-w)^3} - \frac{0.23872(1-w)^3}{(1-w)^3} = 0 \quad (5.15)$$

Розкриття дужок.



$$4.48972w^3+2.8924w^2+0.46516w+0.15272=0 \quad (5.16)$$

Дане рівняння третього порядку, тому було використано окремий випадок критерію Гурвіца. Для цього рівняння умови стійкості системи мають вигляд:

$$a_0 > 0 \quad (5.17)$$

$$\Delta_1 = a_1 > 0 \quad (5.18)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \quad (5.19)$$

Третій (останній визначник) дає умова . Обчислення умов.

$$a_0 = 4.48972 > 0 \quad (5.20)$$

$$\Delta_1 = a_1 = 2.8924 > 0 \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= 2.8924 * 0.46516 - 4.48972 * 0.15272 = 1.3454 - 0.6856 \\ &= 0.6597 \end{aligned} \quad (5.22)$$

$$\Delta_2 = 0.6597 > 0 \quad (5.23)$$

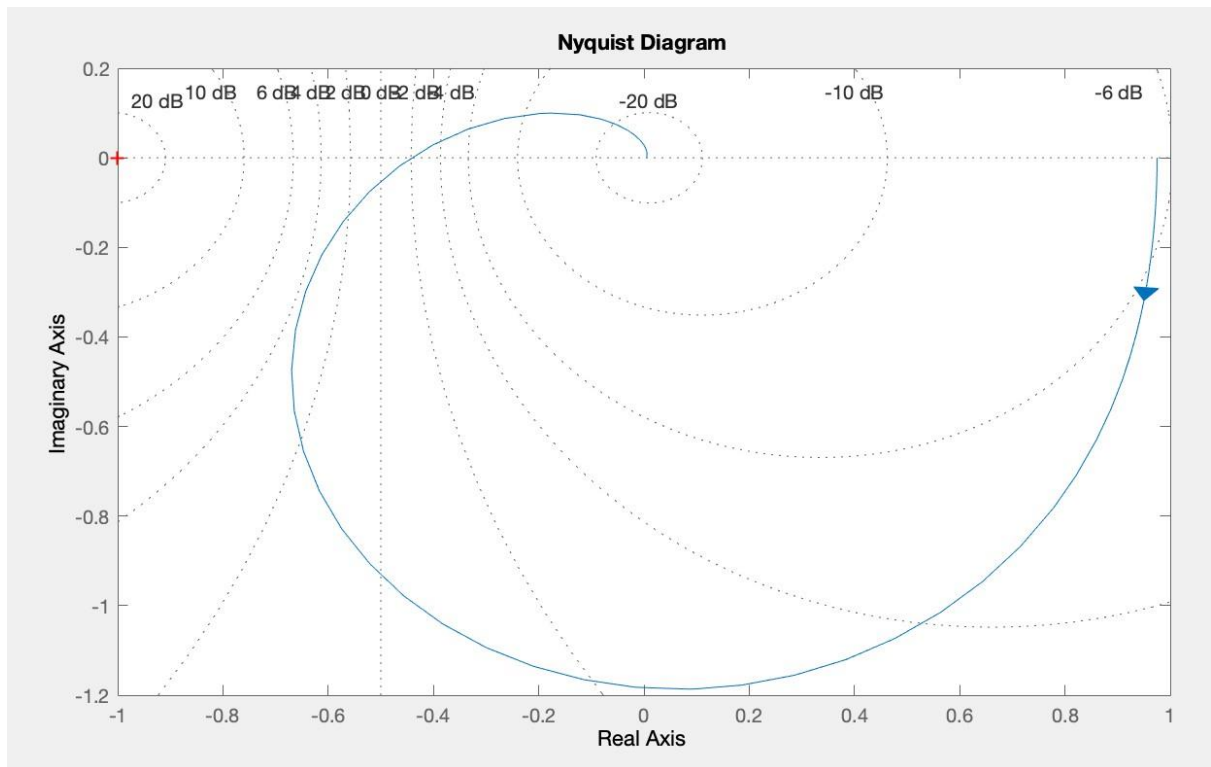
$$a_3 = 0.15272 > 0 \quad (5.24)$$

Оскільки всі умови виконуються то система стійка.

Стійкість системи визначається також за допомогою критерія Найквіста.

За допомогою командного рядка Mat Lab було побудовано АФЧХЦС.

```
>>nyquist(wzfin)
```



Малюнок 5.1 – АФЧХ

Як видно з графіка, кількість полюсів 1, що лежать по заволодиничного радіуса  $l = 0$  ( $z_1 = -0.342011$ ;  $z_{1,2} = -0.824 \pm 0.2812i$ ). То можна зробити висновок що система є стійкою, оскільки АФЧХ розімкнутої системи охоплює точку  $(-1;$

$j_0) \frac{0}{2} = 0$  разів, інакше кажучи не охоплює вказану точку.

## 5.2 Аналіз якості системи

Стала похибка системи визначається за теоремою прокінцеве значення Z-перетворення.

$$\varepsilon_{ст} = \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1)E(z) \quad (5.25)$$

Z-перетворення одиничного стрибка визначається за такими формулами:

$$\xi(t)=1(t) \quad (5.26)$$

$$\Xi(z)=Z\{1(t)\}=\frac{z}{z-1} \quad (5.27)$$

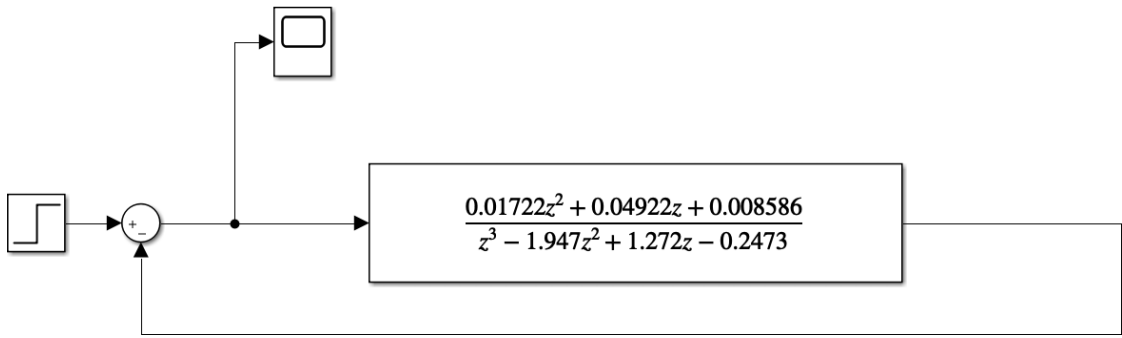
Визначена похибка:

$$\begin{aligned} E(z) &= \Xi(z)(1-W_3(z)) \\ &= \frac{z}{z-1} \left( 1 - \frac{0.01722z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872} \right) \\ &= \frac{z}{z-1} \left( \frac{z^3 - 1.9315z^2 + 1.272z - 0.247305}{z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872} \right) \\ &= \frac{z^4 - 1.9315z^3 + 1.272z^2 - 0.247305z}{(z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872)(z-1)} \end{aligned} \quad (5.28)$$

Отож, стала похибка:

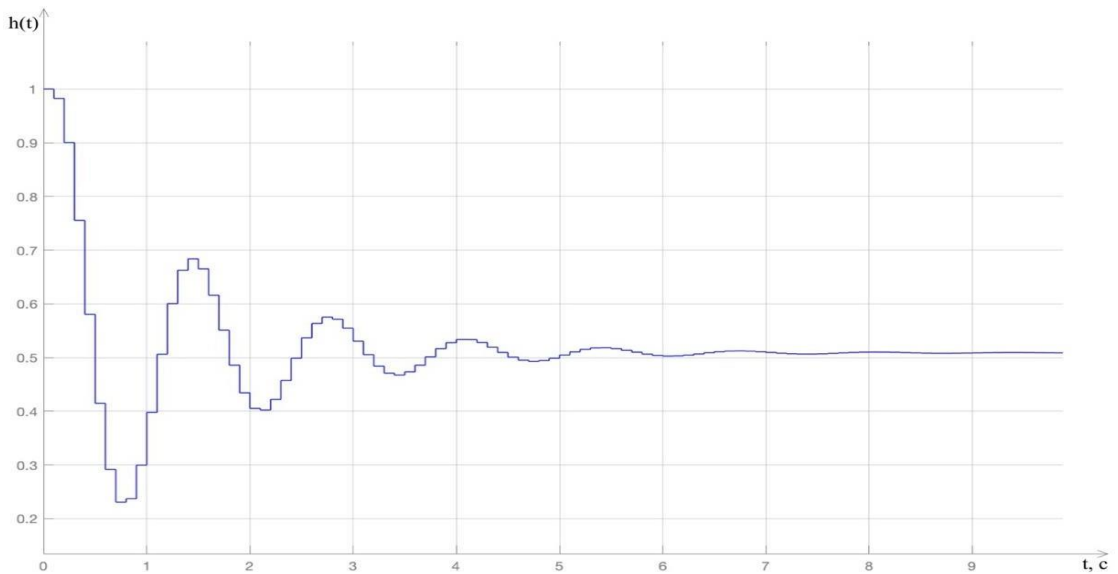
$$\begin{aligned} \varepsilon_{CT} &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)E(z) \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \frac{z^4 - 1.9315z^3 + 1.272z^2 - 0.247305z}{(z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872)(z-1)} \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z^4 - 1.9315z^3 + 1.272z^2 - 0.247305z}{z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872} \\ &= \frac{1 - 1.9315 + 1.272 - 0.247305}{1 - 1.92978 + 1.32122 - 0.23872} \approx 0.51023 \end{aligned} \quad (5.29)$$

Для перевірки правильності розрахунків побудуємо систему в Simulink.

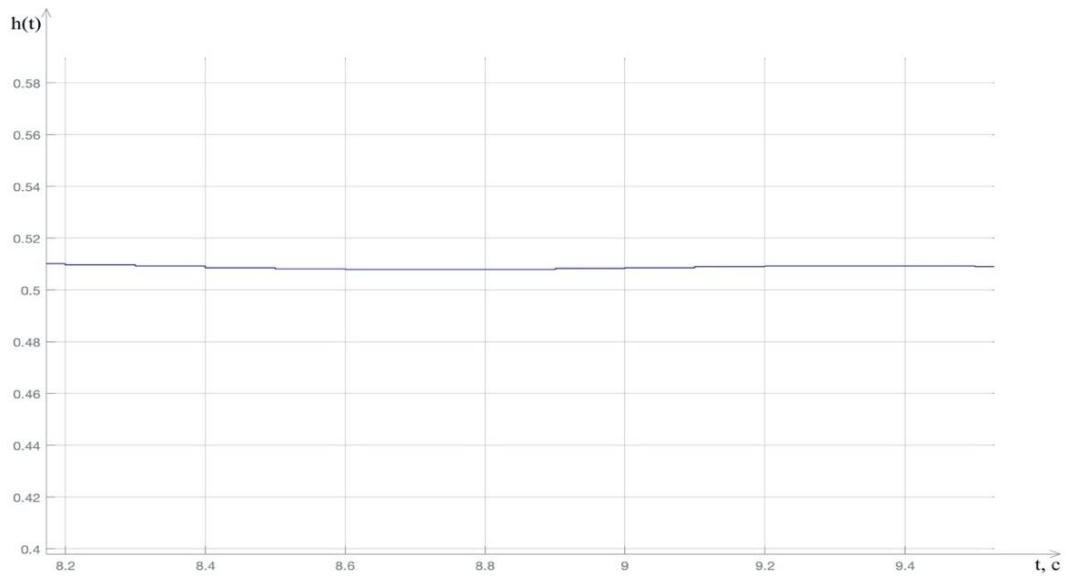


Малюнок 5.2 – Модель системи для визначення сталої похибки.

Графік сталої похибки на одиничний сигнал представлено на рисунку 5.3.



а)



б)

Малюнок 5.3 – Похибка цифрової системи при одиничному стрибку:

а) – графік похибки;

б) – збільшена ділянка графіка, що відповідає сталому значенню.

Таким чином, хоча досліджувана система є стійкою, показники якості не задовольняють вимогам дипломного проекту тому необхідно виконати синтез цифрового регулятора.

## 6 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА

В даному розділі розглядаються 2 методи синтезу цифрового регулятора – метод вибору бажаних передавальних функцій і пропорційно-інтегрально- диференціальний (ПІД) регулятор [20, 21].

### 6.1 Синтез цифрового регулятора методом вибору бажаних передавальних функцій

Розрахунок цифрової системи, заснованої на виборі бажаної передавальної функції. Бажана передавальна функція має вигляд:

$$\Phi(z) = \frac{W_p(z)}{1+W_p(z)} = \frac{D(z)W_{\text{ПБЧ}}(z)}{1+D(z)W_{\text{ПБЧ}}(z)}, \quad (6.1)$$

де  $\Phi(z)$  – передавальна функція замкнутої системи;

$W_p(z)$  – передавальна функція розімкнутої системи;

$W_{\text{ПБЧ}}(z)$  – передавальна функція приведеної безперервної частини;

$W_p(z)$  – передавальна функція цифрового регулятора;

$$\Phi(z) + \Phi(z) * D(z) * W_{\text{ПБЧ}}(z) = D(z) * W_{\text{ПБЧ}}(z), \quad (6.2)$$

$$\Phi(z) = D(z) [W_{\text{ПБЧ}}(z) - \Phi(z) * W_{\text{ПБЧ}}(z)] \quad (6.3)$$

$$D(z) = \frac{\Phi(z)}{W_{\text{ПБЧ}}(z)[1-\Phi(z)]} = \left[ \begin{array}{l} \Phi(z) + \Phi(z) * W_p(z) = W_p(z) \\ W_p(z) = \frac{\Phi(z)}{1-\Phi(z)} \end{array} \right] \quad (6.4)$$
$$= \frac{W_p(z)}{W_{\text{ПБЧ}}(z)}$$

Необхідно, щоб синтезована система мала астатизм першого порядку.

Для цього необхідно щоб передавальна функція мала наступний вигляд:

$$\Phi(z) = \frac{B(z)M_1(z)}{Q(z)}; 1 - \Phi(z) = \frac{(z-1)^r * C^-(z) * N_1(z)}{Q(z)} \quad (6.5)$$

Для цього запишемо передавальну функцію у наступному вигляді:

$$W(z) = \frac{0.01722z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473}, \quad (6.6)$$

$$r_0 = 0; r = 1$$

Виконано факторизацію:

$$C^+(z) = z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473; \quad (6.7)$$

$$B(z) = 0.01722z^2 + 0.04922z + 0.008586; \quad (6.8)$$

Обраний поліном  $Q(z)$ ;

$$Q(z) = (z - 0.5)^3 = z^3 - 1.5z^2 + 0.75z - 0.25 \quad (6.9)$$

Визначено  $M_1, N_1$  за формулою:

$$B(z) * M_1(z) + (z - 1)^r * C_1(z) * N_1(z) = Q(z) \quad (6.10)$$

При цьому  $\|N_1\| \geq \|B\|, \|M_1\| \geq \|C^-\| + r - 1$ . Для нашої передавальної Функції маємо розрахунки:

$$\|N_1\| \geq \|B\| \quad (6.11)$$

$$\|N_1\| \geq 1 \quad (6.12)$$

$$N_1(z) = n_2(z) + n_1(z) + n_0(z) \quad (6.13)$$

$$\|M_1\| \geq \|C_1^{-1}\| + r - 1 \quad (6.14)$$

$$\|M_1\| = 0 + 1 - 1 = 0 \quad (6.15)$$

$$\|M_1\| = m_0 \quad (6.16)$$

$$B(z) * M_1(z) + (z+1)^r * C_1(z) * N_1(z) = Q(z) \quad (6.17)$$

$$(0.01722 z^2 + 0.04922z + 0.008586) * m_0 + (z-1) * (n_2 * z^2 \quad (6.18)$$

$$+ n_1 * z + n_0) = z^3 - 1.5z^2 + 0.75z - 0.25$$

$$\begin{array}{rcl} z^3 & n_2 = 1 & \\ z^2 & 0.01722 * m_0 + n_1 - n_2 = -1.5 & \\ z^1 & 0.04922 * m_0 + n_0 - n_1 = 0.75 & \\ z^0 & 0.008586 * m_0 - n_0 = -0.125 & \end{array} \quad (6.19)$$

$$n_2 = 1 \quad (6.20)$$

$$n_1 = -0.5 - 0.01722 * m_0 \quad (6.21)$$

$$n_0 = 0.25 - 0.06644 * m_0 \quad (6.22)$$

$$m_0 = 1.666 \quad (6.23)$$

$$n_2 = 1 \quad (6.24)$$

$$n_1 = -0.5024 \quad (6.25)$$

$$n_0 = 0.1394 \quad (6.26)$$

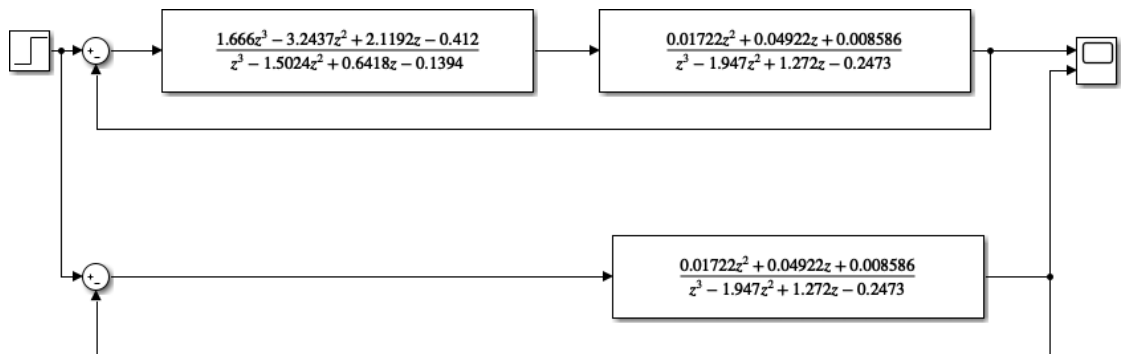
$$m_0 = 1.666 \quad (6.27)$$

Формула з бчисленими параметрами має вигляд:

$$\begin{aligned} D(z) &= \frac{(z-1)^{r_0-1} * C_1^+(z) * M_1(z)}{N_1(z)} \\ &= \frac{(z-1)^{-1} * (z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473) * 1.666}{z^2 - 0.5024z + 0.1394} \quad (6.28) \\ &= \frac{1.666z^3 - 3.2437z^2 + 2.1191z - 0.412}{z^3 - 1.5024z^2 + 0.6418z - 0.1394} \end{aligned}$$

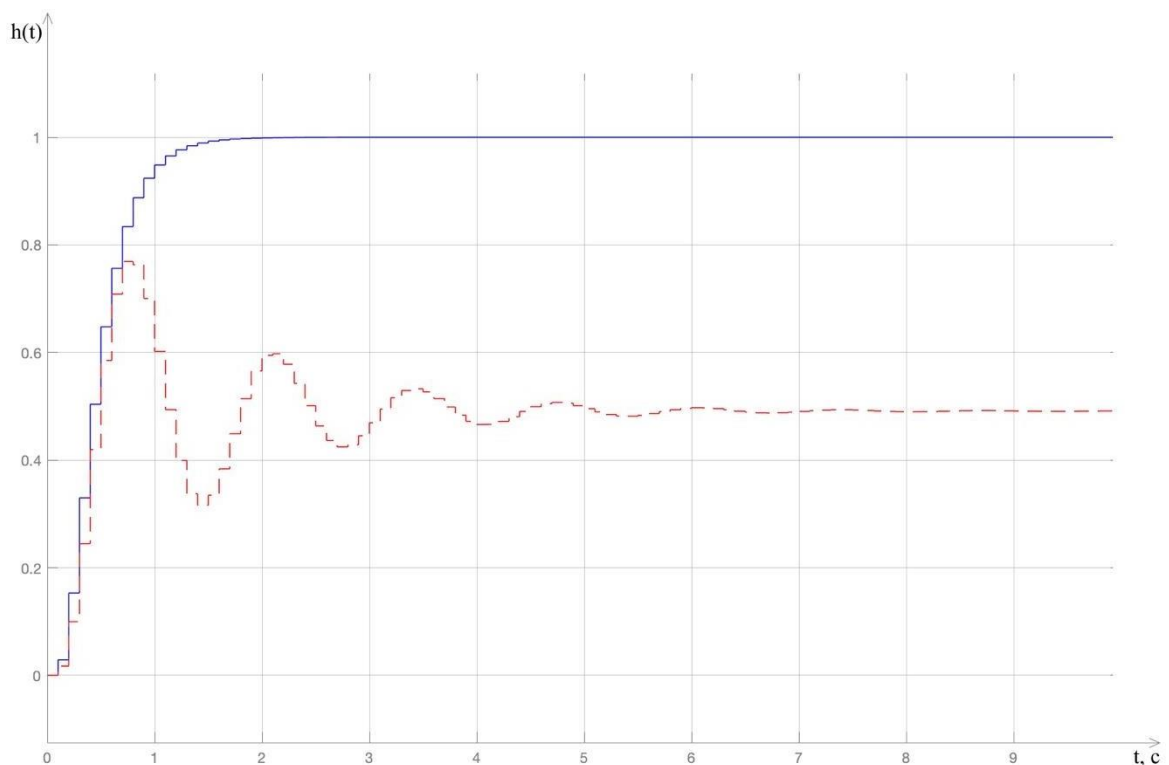


Регулятор, за методом вибору бажаних передавальних функцій вMatLabSimulink зображений на рисунку 6.1.



Малюнок 6.1 – Модель системи з цифровим регулятором та без.

Графік перехідного процесу зображений на рисунку 6.2.



Малюнок 6.2 – Графік перехідного процесу з регулятором (суцільна лінія) та без нього (пунктирна лінія).

Як видно з графіків на малюнку 6.2, параметри перехідного процесу значно покращились.

Показники якості:

– Без регулятора:

Максимальне відхилення  $h_{\max} = 0.7691$ ;

Стале значення  $h_{\text{ст}} = 0.4915$ ;

Час установлення  $t_{\text{уст}} = 0.6831$

с; Час перехідного процесу  $t_{\text{пп}} = 3.6$ с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{0.7691 - 0.4915}{0.4915} * 100\% = 65.34\%$

– З регулятором:

Максимальне відхилення  $h_{\max} = 1$ ;

Стале значення  $h_{\text{ст}} = 1$ ;

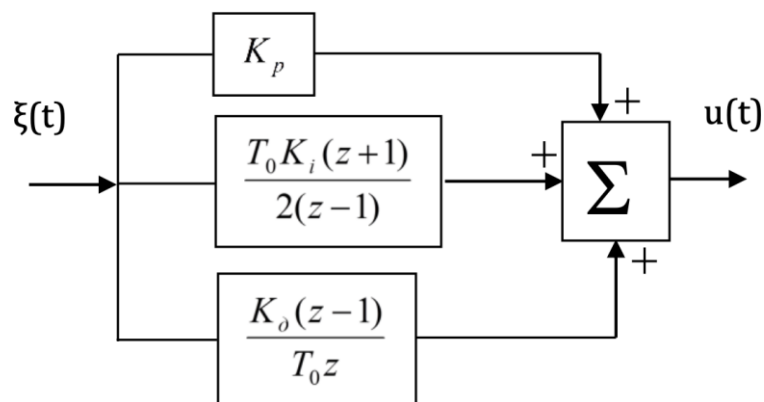
Час установлення  $t_{\text{уст}} = 0.895$ с;

Час перехідного процесу  $t_{\text{пп}} = 1.1$ с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{1 - 1}{1} * 100\% = 0\%$ ;

## 6.2 Синтез цифрового ПІД-регулятора

Було виконано розрахунок пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора. Структурна схема ПІД регулятора зображена на малюнку 6.3.



Малюнок 6.3 – структурна схема ПІД-регулятора.

Передавальна функція розімкнутої системи з цифровим ПД регулятором буде мати вигляд:

$$W_{СК}(z) = W_{ПД}(z) * W_{ПБЧ}(z)$$

$$= \frac{(K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T_0) z^2 + (K_i T_0^2 - 2K_p T_0 - 4K_d) z + 2K_d}{2T_0(z(z-1))} \quad (6.29)$$

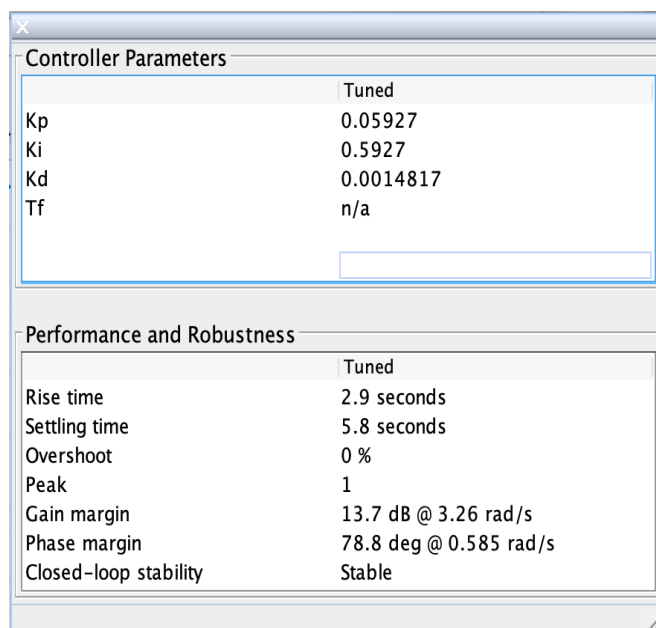
$$* W_{ПБЧ}(z)$$

В формулі 6.29  $T_0$  – це період квантування,  $K_i$ ,  $K_d$  і  $K_p$  – параметри інтегральної диференціальної і пропорційний складових закону регулювання.

Для того щоб синтезувати ПД-регулятор необхідно розрахувати параметри  $K_i$ ,  $K_d$  і  $K_p$ . Для цього було використано вбудовані методи обрахунку в командному рядку MatLab.

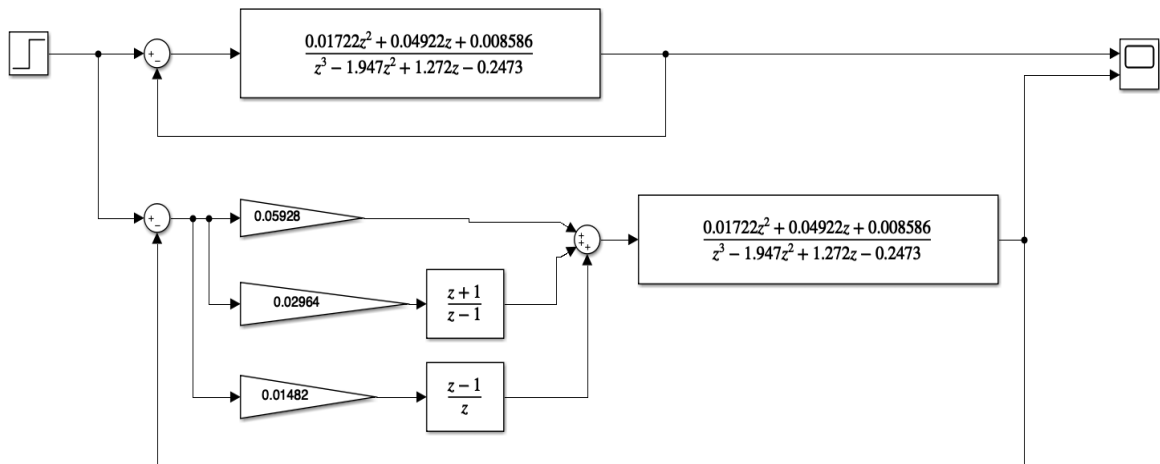
```
>>pidtool(wzfin)
```

Mat Lab автоматично порахував усі параметри для ПД-регулятора.

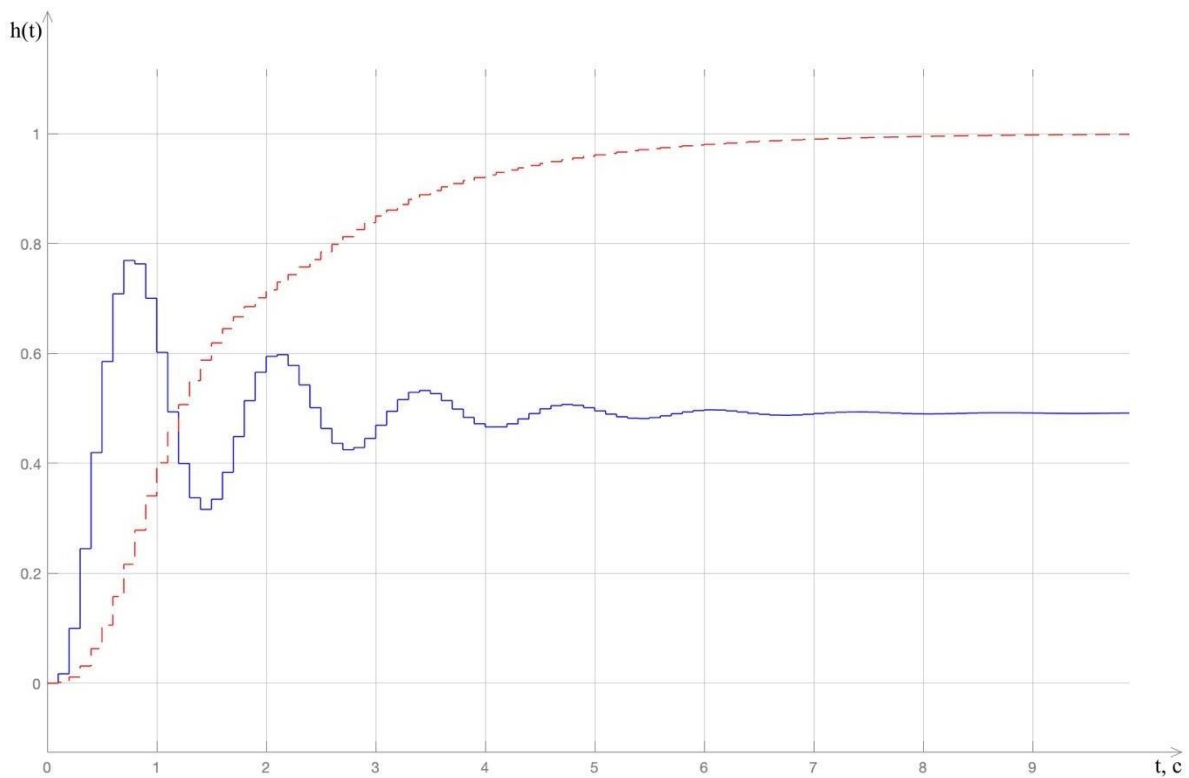


Малюнок 6.4 – Пораховані параметри  $K_i$ ,  $K_d$  і  $K_p$ .

Побудована схема з цифровим ПІД-регулятором в MatLabSimulink представлено на малюнку 6.5.



Малюнок 6.5 – Модель цифрової системи з ПІД-регулятором та без нього.



Малюнок 6.6 – Графіки переходного процесу з цифровим ПІД-регулятором (пунктиром) і без нього (суцільна лінія).

Показники якості:

– Без регулятора:

Максимальне відхилення  $h_{\max} = 0.7691$ ;

Стале значення  $h_{\text{ст}} = 0.4915$ ;

Час установлення  $t_{\text{уст}} = 0.6831$  с;

Час перехідного процесу  $t_{\text{пт}} = 2.8$  с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{0.7691 - 0.4915}{0.4915} * 100\% = 65.34\%$ ;

– З регулятором:

Максимальне відхилення  $h_{\max} = 1$ ;

Стале значення  $h_{\text{ст}} = 1$ ;

Час установлення  $t_{\text{уст}} = 10$  с;

Час перехідного процесу  $t_{\text{пт}} = 10$  с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{1 - 1}{1} * 100\% = 0\%$ ;

З огляду з графіків перехідного процесу на рисунку 6.2 та рисунку 6.6, які було отримано при моделюванні регулятора за бажаними функціями та ПД регулятора можна зробити висновок, що для подальших розрахунків краще брати регулятор, заснований на виборі бажаних функцій, адже завдяки йому значно покращились параметри перехідного процесу, а саме час перехідного процесу став набагато меншим (2.1 с) і зникло перерегулювання.

# 7ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА

## 7.1Метод безпосередньої декомпозиції

У загальному вигляді передавальна функція цифрового регулятора має вигляд

$$D(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)} \quad (7.1)$$

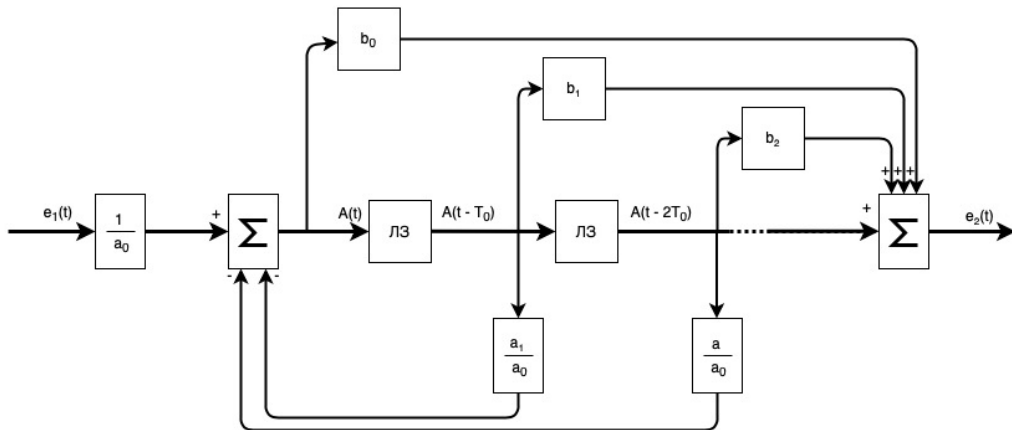
Для методу безпосередньої декомпозиції функція цифрового регулятора представляється наступним чином [20, 21].

$$E_2(z) = (b_0 + b_0 z^{-1} + b_0 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}) * A(z), \quad (7.2)$$

) де  $A(z)$ - фіктивна змінна.

$$A(z) = \frac{1}{a_0} \frac{1}{1} (az^{-1} + az^{-2} + \dots + az^{-n}) * A(z). \quad (7.3)$$

Тоді, на основі цієї формули модель методу безпосередньої декомпозиції матиме вигляд, як на рисунку 7.1.



Малюнок 7.1 – Структурна схема моделі методу безпосередньої декомпозиції [19, 20]

У попередньому розділі (6.1) було розроблено модель цифрового регулятора у вигляді такої передавальної функції:

$$D(z) = \frac{1.666z^3 - 3.2437z^2 + 2.1191z - 0.412}{z^3 - 1.5024z^2 + 0.6418z - 0.1394} \quad (7.4)$$

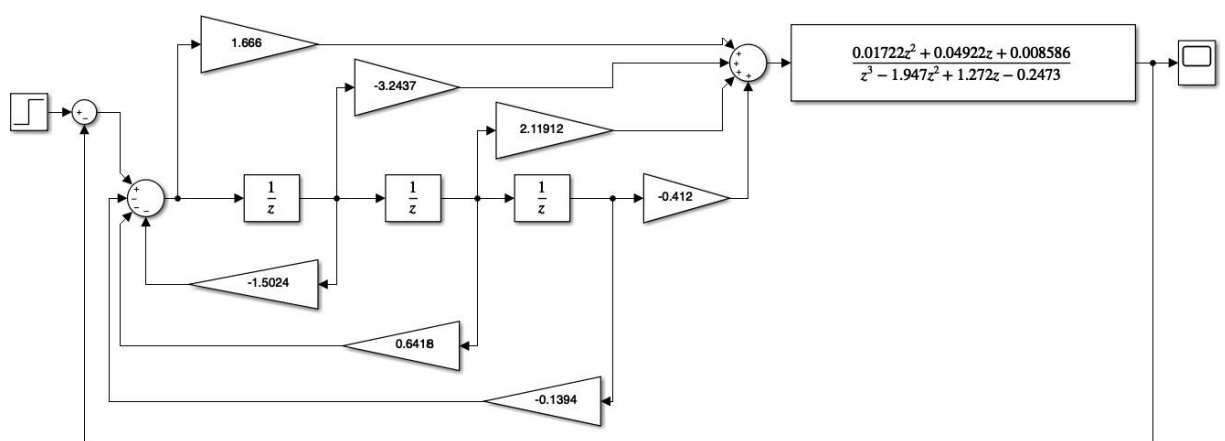
Представимо цю функцію в типовому вигляді для використання методу безпосередньої декомпозиції:

$$D(z) = \frac{1.666 - 3.2437z^{-1} + 2.1191z^{-2} - 0.412z^{-3}}{1 - 1.5024z^{-1} + 0.6418z^{-2} - 0.1394z^{-3}} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)} \quad (7.5)$$

$$E_2(z) = (1.666z^3 - 3.2437z^2 + 2.1191z - 0.412) * A(z) \quad (7.6)$$

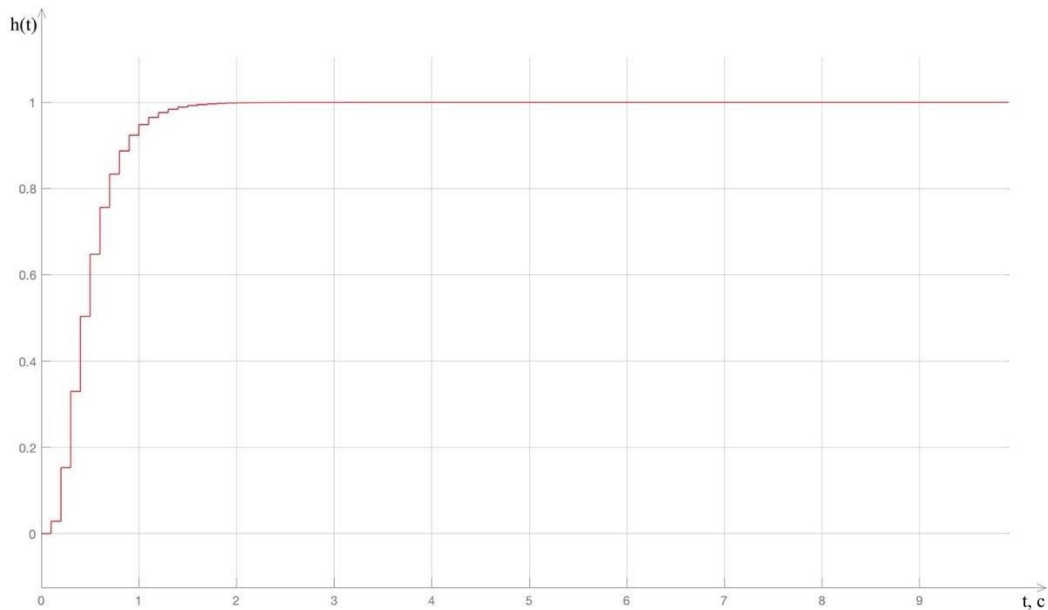
$$\begin{aligned} A(z) &= \frac{1}{1} E_1(z) \frac{1}{1} (-1.5024z^{-1} + 0.6418z^{-2} - 0.1394z^{-3}) * A(z) \\ &= E(z) + 1.5024z^{-1} * A(z) - 0.6418z^{-2} * A(z) \\ &\quad + 0.1394z^{-3} * A(z) \end{aligned} \quad (7.7)$$

Схема з реалізацією цифрового регулятора методом безпосередньої декомпозиції на моделі MATLAB/Simulink:



Малюнок 7.2–Модель цифрової системи з цифровим регулятором, який реалізовано методом безпосередньої декомпозиції

Результат моделювання можна побачити на малюнку 7.3.



Малюнок 7.3—Графіки перехідного процесу системи з цифровим регулятором, реалізованим за допомогою методу безпосередньої декомпозиції.

Порівнюючи графіки на рисунку 7.3 та рисунку 5.2 можна зробити висновок про ідентичність моделей.

## 7.2 Дослідження розробленого цифрового регулятора за допомогою мови програмування ST в середовищі CodeSYS

Використовуючи розрахунки з попереднього підрозділу було запрограмовано регулятор за допомогою мови програмування ST в середовищі CodeSYS [22].

StructuredText (ST) – мова програмування, що призначена для програмування промислових контролерів. Відповідає стандарту IEC 6113-3. За своєю структурою та синтаксисом найбільш схожий на мову програмування Pascal.

Підтримує необхідні типи даних. Цілочисельні типи: SINT (char), INT (shortint), DINT (long), LINT (64 біт ціле), тощо. Дійсний типи: REAL (float), LREAL(double). Спеціальні типи BYTE(довжинатерміну 8 бітів), WORD(16)



бітів),DWORD(32біти),LWORD(64біти). Логічний типBOOL-приймає значення TRUE або FALSE.

Лістинг програми представлений в Додатку А. Нижче наведено основні функції з лістингу програми.

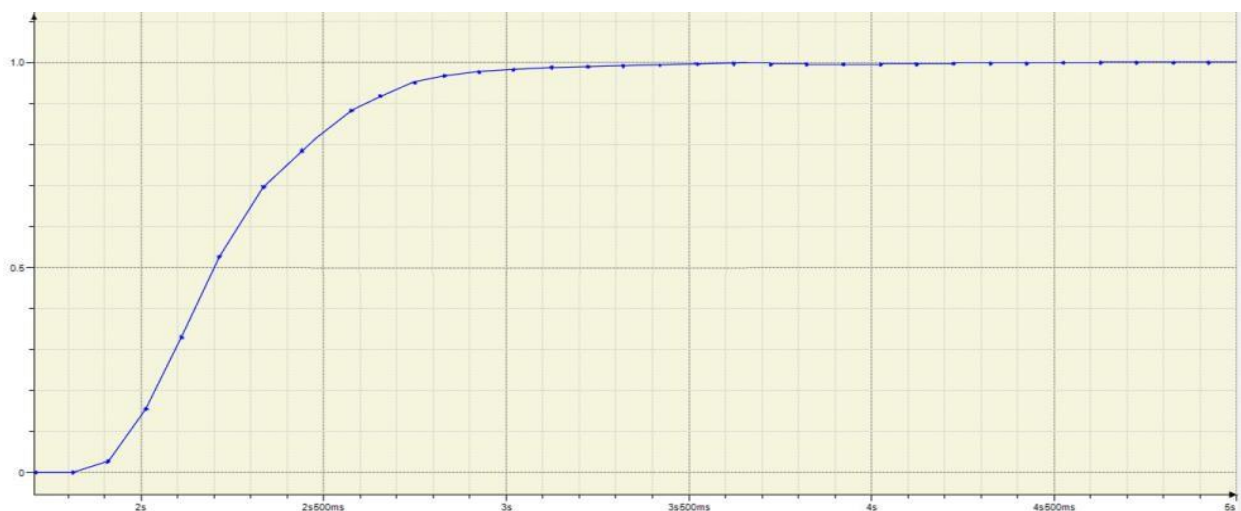
```
//функція регулятора,заснованого на виборі бажаних передавальних функцій
```

```
y_r[0]:=1.5024*y_r[1] - 0.6418*y_r[2] +0.1394*y_r[3] + 1.666*x_r[0] - 3.2437*
```

```
//функція передавальної функції
```

```
y_m[0]:=1.947*y_m[1] - 1.272*y_m[2] + 0.2473*y_m[3] + 0.01722*x_m[1] +  
0.04922*x_m[2] + 0.008586*x_m[3];
```

Код циклічний тому було обрано час 100мс. Вибираємо інструмент для виведення графіку на екран.



Малюнок 7.4–Реалізація регулятора за бажаними функціями.

Як видно – графіки на малюнку 7.4 та 6.2 співпадають, а отже регулятор запрограмовано вірно.

## ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Використання електричних автомобілів як регуляторів навантаження є досить новим напрямом розвитку розподіленої енергетики, до якого долучаються дедалі більше провідних технологічних компаній. Американська компанія Tesla Motors виробляє свою систему для зберігання електричної енергії PowerWall [17], компанія Google встановлює на свої автомобілях Smart бортові V2 Gпристрої[18]. Автомобільний гігант Nissan сумісно з енергетичною компанією Enel починаю будування 200 двонаправлених зарядних станцій у Великій Британії[19].

При розгляді можливості використання електричних автомобілів як одного зі способу покриття пікових навантажень на енергомережу в умовах енергосистеми України варто враховувати наступні фактори:

- Вартість електричної енергії у Україні значно менша, ніж в країнах Європи;
- Кількість електричних автомобілів в Україні недостатня, для того, щоб значно вплинути на енергосистему.

Вданому розділі буде розрахований можливий економічний ефект від використання технології Vehicle-to-Grid(V2G) для власника електричного транспортного засобу при існуючих тарифах на електричну енергію. Якщо ефект буде негативним, то буде визначений тариф, за якого власники будуть зацікавлені в такому способі регулювання електричної потужності. Також буде виявлений вплив на екологію, який є наслідком зменшення витрат палива на роботу електричних станцій в маневровому режимі.

Для будь-якого власника електричного транспортного засобу, який заряджає акумуляторну батарею свого електромобіля, в основному вночі, буде доцільно користуватися багатозонним лічильником для того, щоб здійснювати розрахунок за електричну енергію за багатозонним диференційованим тарифом.

Генеруючи електричну енергію до мережі в добовідині пікового

навантаження, водій також може користуватися не тільки особистим зарядним пристроєм, а й зарядним пристроєм на публічній зарядній станції.

В випадку користування особистим зарядним пристроєм, тарифікація вартості електричної енергії буде вестись за тарифами для фізичної особи, а при користуванні зарядним пристроєм на зарядній станції – . В Україні діють різні тарифи для фізичної та юридичної особи при споживанні електричної енергії:

- Для населення при 2-х зонному диференційованому тарифі:
  - денний – 1.68 грн/кВт·год;
  - нічний – 0.84 грн/кВт·год;
- для населення при 3-х зонному диференційованому тарифі:
  - нічний – 0.84 грн/кВт·год;
  - напівпіковий – 1.68 грн/кВт·год;
  - піковий – 2.52 грн/кВт·год;

Зарядна станція, на якій буде можливість підключитись до мережі, відноситься до 2го класу споживачів електричної енергії. Для них діють наступні тарифи:

- при 2-х зонному диференційованому тарифі:
  - денний – 2.66 грн/кВт·год;
  - нічний – 0.69 грн/кВт·год;
- при 3-х зонному диференційованому тарифі:
  - нічний – 0.49 грн/кВт·год;
  - напівпіковий – 2.01 грн/кВт·год;
  - піковий – 3.56 грн/кВт·год;

Також на доцільність участі електричного автомобіля в процесі генерації електричної енергії впливає вартість заміни електричної батареї, оскільки збільшується кількість процесів заряду/розряду, і як наслідок – ресурс електричної батареї зменшується набагато швидше.

В розрахунках будуть прийняті наступні параметри:

- кількість циклів заряду/розряду в умовах V2G – 1 раз на день.
- кількість циклів заряду розряду при участі v2g – 247 за один рік (кількість робочих днів за один календарний рік);

- період заряду батареї – ніч, період генерації електричної енергії – пікові години навантаження на енергомережу;
- З врахуванням зменшення вартості акумуляторної батареї на момент, заміни в 2022 році, її ціна становитиме 100 \$/кВт·год або 2800 грн/кВт·год(рис.3.1)
- падіння ємності електричної батареї становитиме 10%/рік;
- об'єм генерованої енергії складатиме 50 або 75 відсотків від повної ємності, враховуючи витрати електричної енергії для поїздок в залежності від потреб водія.
- ємність акумулятора – 40 кВт·год. Починаючи за 2018 року виробники електричних автомобілів в переважній більшості будуть встановлювати електричні батареї ємністю 40 кВт·год, замість 24 кВт·год.

Беручи до уваги те, що в Україні на сьогодні не існує законодавчої бази для інтеграції електричних автомобілів як регуляторів потужності, то при розрахунку робились допущення, що ця технологія буде тарифікуватися аналогічно гідро-акумуляуючим електростанціям.

#### Розрахунок капітальних витрат

Капітальні витрати ( $K_{пр}$ ) при використанні електричного автомобіля як генератора потужності включають в себе витрати на заміну акумуляторної батареї, як внаслідок підвищеного навантаження на неї швидше втрачає свій ресурс. Ці витрати складаються з:

- вартості акумуляторної батареї  $\Pi_{акб}$ ;
- вартості на доставку  $V_{дост}$ ;
- вартості на роботу із заміни батареї  $V_{роб}$ . Формула для розрахунку капітальних витрат:

$$K_{пр} = \Pi_{акб} + V_{тран} + V_{роб} \quad (3.1)$$

Вартість електричної батареї становить:

$$\Pi_{\text{акб}} = W_{\text{акб}} \cdot \Pi_{\text{кВт}\cdot\text{год}} = 40 \cdot 2800 = 112 (\text{тис.грн}) \quad (3.2)$$

де,  $W_{\text{акб}} = 40 \text{ кВт} \cdot \text{год}$  – ємність акумуляторної батареї,  $\Pi_{\text{кВт}\cdot\text{год}} = 2800$  грн – вартість 1 кВт·год ємності батареї.

Вартість роботи із заміни акумулятора станом на 1.01.2018 становить 2000 грн. Вартість доставки акумуляторної батареї вагою 200 кг, розмірами 2.5X2 м становитиме 1420 грн. Отже, вартість капітальних витрат становитиме:

$$K_{\text{пр}} = 112000 + 1420 + 2000 = 115420 (\text{грн}) \quad (3.3)$$

Розрахунок експлуатаційних витрат.

Експлуатаційні витрати при використанні електричного автомобіля як генератора потужності складаються з амортизаційних відрахувань. Корисний термін експлуатації акумуляторно батареї складає 4 роки, оскільки за цей термін значно падає ємність батареї та її подальше використання не є можливим.

Норма амортизації  $N_A$  становить, при ліквідаційній вартості  $L$  – 20%:

$$N = \frac{1-L}{T_a} \cdot 100\% = \frac{1-0.2}{5} \cdot 100\% = 16\% \quad (3.4)$$

Амортизаційні відрахування  $AB$  становитимуть:

$$AB = \frac{N_a \cdot \Pi_{\text{акб}}}{100} = \frac{16 \cdot 115420}{100} = 18467 (\text{грн}) \quad (3.5)$$

### 3.1.3. Розрахунок економії

Повна економія буде складатись із різниці економії, за рахунок оплати спожитої та згенерованої енергії за різними тарифами, та капітальних витрат на

заміну акумуляторної батареї.

Річна економія становить:

$$E_{\text{річна}} = \sum (W_{\text{ген}} \cdot C_{\text{ген}} - W_{\text{спож}} \cdot C_{\text{спож}}) \quad (3.6)$$

Повна річна економія становить:

$$E_{\text{повна}} = E - AB \quad (3.7)$$

Як видно з результатів розрахунків, представлених в таблиці 3.1, по нинішнім тарифам на електроенергію жоден із варіантів тарифікації електричної енергії не є фінансово вигідним для власника електричного автомобіля, оскільки вартість заміни батареї значно перевищує сумарний дохід від генерації електричної енергії.

Для того, щоб фінансово зацікавити власника електричного автомобіля, діючий тариф потрібно збільшувати або віднести такий спосіб генерації енергії до окремої категорії споживачів, для якої буде діяти окремий тариф. Розрахуємо розмір тарифу, при якому власник електричного автомобіля буде зацікавлений в участі врегулюванні електричного навантаження. Він буде становити:

$$C_{\text{баз}} = \frac{K_{\text{пр}} - C_{\text{ут}}}{W_{\text{в.терм.}}} \quad (3.8)$$

$$C_{\text{баз}} = \frac{115420 - 22400}{(19760 \dots 29640)} = 4.70 \dots 3.17 \text{ (грн/кВт год)} \quad (3.9)$$

де,  $C_{\text{л}} = 22400$  грн – сума, яка буде відшкодована при утилізації батареї,  $W_{\text{за весь термін}} = 19760 \dots 29460$  кВт · год – об’єм електричної енергії, який буде згенерований в мережу за весь термін експлуатації батареї при генерації 50% та 75% від ємності батареї відповідно. При функціонуванні такого тарифу, електричний автомобіль буде працювати з нульовою ефективністю, тому тариф має бути більшим. З врахуванням прогнозованого щорічного збільшення тарифу на електричну енергію на 10%, то на момент заміни батареї в 2022 році

(рис.3.1) він буде в 1.5 рази більшим, ніж існуючий, то тарифи будуть наступними:

При 2-х зонному диференційованому тарифі:

- для населення – 2.52 грн/кВт·год,
- для зарядної станції – 3,99 грн/кВт·год;

При 3-х зонному диференційованому тарифі в піковий період навантаження:

- для населення – 3,78 грн/кВт·год,
- для зарядної станції – 5,34 грн/кВт·год;

Враховуючи це, та порівнюючи з розрахованим бажаним для власника електричного автомобіля, можна зробити висновок, що в 2022 році такий спосіб регулювання потужності буде цікавим для власника.

Економічний ефект від зменшення негативного впливу на екологію

Враховуючи те, що при участі електричних автомобілів в процесі покриття пікових навантажень на енергомережу зменшить витрати вугілля на роботу електростанцій в маневровому режимі, разом зменшиться рівень шкідливих викидів в атмосферу.

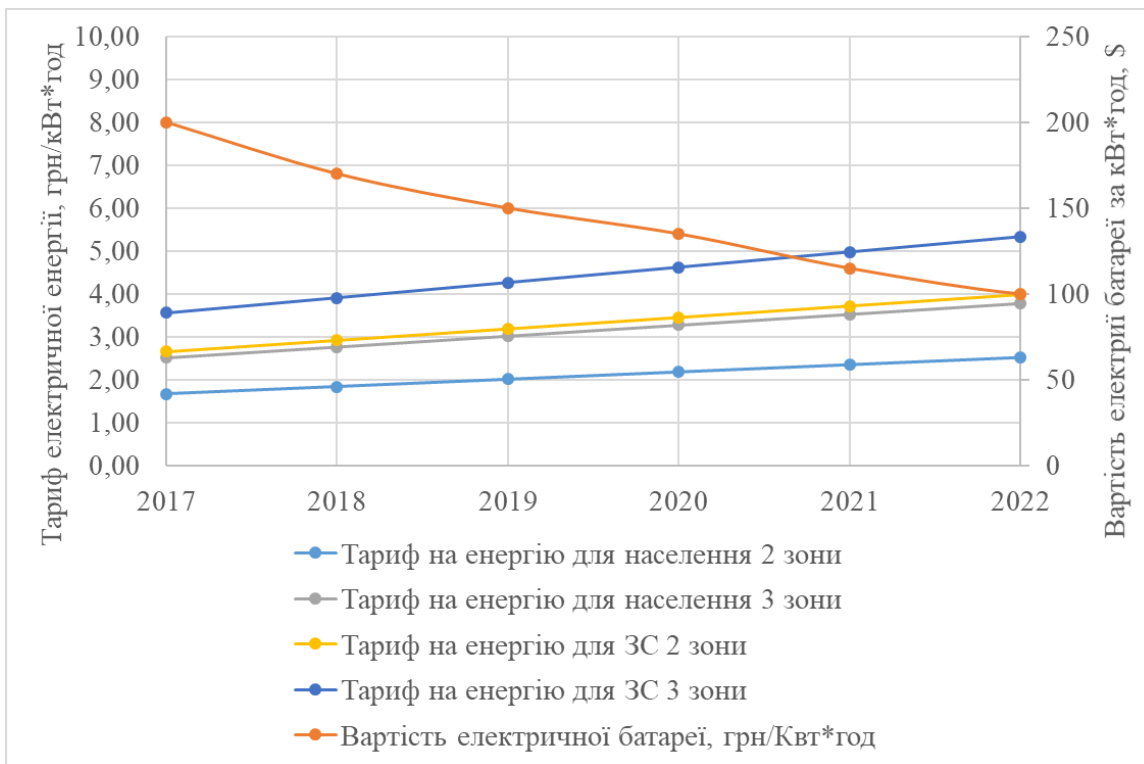
Основними продуктами спалювання палива є вуглекислий газ  $\text{CO}_2$ , оксид азоту  $\text{NO}_2$  діоксид сірки  $\text{SO}_2$ . При генерації 1 кВт потужності при роботі в маневровому режимі рівень додаткових викидів кожного з елементів становить:

- вуглекислий газ  $\text{CO}_2$  – 0.3 г/кВт;
- оксид азоту  $\text{NO}_2$  – 0.14 г/кВт;
- діоксид сірки  $\text{SO}_2$  – 180 г/кВт.

Відповідно до Статті 243 Податкового кодексу України, ставка на викиди в атмосферу шкідливих викидів становить:

- вуглекислий газ  $\text{CO}_2$  – 92.37 грн/т;
- оксид азоту  $\text{NO}_2$  – 2451 грн/т;
- діоксид сірки  $\text{SO}_2$  – 2451 грн/т

Результати розрахунків об'єму викидів ( в тонах) в атмосферу представлені в таблиці 3.2 (при генерації 50%) та 3.3 (при генерації 75%)



Малюнок 3.1 – Діаграма зміни тарифу на електричну енергію та вартості електричної батареї



Споживач	Тарифікація	Об'єм згенерованої енергії за 1 день, кВт*год	Об'єм споживаної енергії за 1 день, кВт*год	Вартість згенерованої енергії за 1 день, грн	Вартість споживаної енергії за 1 день, грн	Економія за 1 день, грн	Економія за рік, грн	Повна річна економія, грн	Економія весь термін експлуатації, грн	
Фізична особа	2 зони	20,0	40,0	33,6	33,6	0,0	0,0	-18467,2	-73868,8	
		30,0	40,0	50,4	31,2	19,2	4742,4	-1372,8	-57270,4	
		20,0	40,0	53,4	25,0	28,4	7014,2	-11543,0	-43319,1	
	Юридична особа	2 зони	30,0	40,0	75,6	25,0	50,6	12508,1	-5959,1	-30030,5
			20,0	40,0	53,4	27,7	25,7	6345,5	-12121,7	-51569,5
			30,0	40,0	80,0	27,7	52,4	12935,2	-5532,0	-28595,7
Юридична особа	3 зони	20,0	40,0	71,1	19,8	51,4	12691,2	-5776,0	-29449,6	
		30,0	40,0	106,7	19,8	87,0	21477,4	3010,2	1302,1	

Таблиця 3.1. Результати розрахунків

Таблиця 3.2

## Об'єми шкідливих викидів в атмосферу

Рік	Генерована потужність електромобілями, МВт	Об'єм викидів SO <sub>2</sub> , т	Об'єм викидів NO <sub>2</sub> , т	Об'єм викидів CO <sub>2</sub> , т	Оплата за викиди, грн
2017	5,0	0,0015	0,0007	0,9	88,5
2018	12,0	0,0036	0,00168	2,16	212,5
2019	22,0	0,0066	0,00308	3,96	389,5
2020	35,2	0,01056	0,004928	6,336	623,2
2021	46,0	0,0138	0,00644	8,28	814,4
2022	76,0	0,0228	0,01064	13,68	1345,6
2023	104,0	0,0312	0,01456	18,72	1841,3
2024	136,8	0,04104	0,019152	24,624	2422,0
2025	180,0	0,054	0,0252	32,4	3186,9
2026	226,0	0,0678	0,03164	40,68	4001,3

Таблиця 3.3

## Об'єм шкідливих викидів в атмосферу

Рік	Генерована потужність електромобілями, МВт	Об'єм викидів SO <sub>2</sub> , т	Об'єм викидів NO <sub>2</sub> , т	Об'єм викидів CO <sub>2</sub> , т	Оплата за викиди, грн
2017	7,5	0,00225	0,00105	1,35	132,8
2018	18,0	0,0054	0,00252	3,24	318,7
2019	33,0	0,0099	0,00462	5,94	584,3
2020	52,8	0,01584	0,007392	9,504	934,8
2021	69,0	0,0207	0,00966	12,42	1221,6
2022	114,0	0,0342	0,01596	20,52	2018,4

Використання електричних автомобілів як регуляторів навантаження на енергомережу дозволить зменшити рівень шкідливих викидів в атмосферу. Це сприятливо буде впливати на екологічний стан навколишнього середовища. В той же час, це призведе до зменшення виплати податку за шкідливі викиди в атмосферу.

### Висновок

При розрахунку економічного ефекту від впровадження технології когенерації енергії від електричних автомобілів в енергомережу, було зроблено висновок, що за існуючими тарифами, для власників електричних автомобілів відсутній позитивний економічний ефект, а в перспективі, з врахуванням збільшення тарифів на електричну енергію, цей спосіб регулювання для них буде цікавим, і, як наслідок, -можливим для енергосистеми.

Для реалізації запропонованого підходу до регулювання графіка навантажень необхідно вирішити ряд питань, особливо стосовно дозволу на законодавчому рівні приватним власникам електротранспорту брати участь в регулюванні навантаження та отримувати кошти за генерацію шляхом розробки бізнес-моделей і спеціальних тарифів, системи енергоменеджменту на рівні розподільчої мережі, заходів щодо управління якістю електричної енергії, тощо.

## ВИСНОВОК

Метою даного дипломного проекту було забезпечення комфортності руху електромобіля, яке досягається стабілізацією руху при змінних умовах дорожньої обстановки. Розглянуто існуючі рішення у світі електромобілів та обрано автомобіль з системою автопілот, яка дала можливість реалізувати автономну систему керування швидкістю електромобіля.

У дипломному проекті розроблено структурну та функціональну схеми електроавтомобіля. Розроблено математичну модель цифрової системи та виконано перевірку на стійкість та якість.

У проекті досліджувалися результати моделювання розроблених цифрових регуляторів за методами регуляторів, заснованих на виборі бажаних передавальних функцій та ПД законів керування. Вибраний регулятор за бажаними передавальними функціями забезпечив наступну якість: час перехідного процесу  $t_{\text{пн}}$  - 1.1 с, перерегулювання 0% та помилку 0;

Для моделювання обраного регулятора в середовищі CodeSYS мовою програмування ST було проведено безпосередню декомпозицію системи. Результати досліджень наведено у відповідних графіках.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. HEVCars[Електроннийресурс]:Статистика купівлі електромобілів в Україні. - Назва з екрана. Доступ <https://hevcars.com.ua/reviews/skolko-elektrifitsirovannyih-avtomobiley-prodano-v-ukraine-k-1-yanvary-a-2019-goda/>
2. ITNews[Електроннийресурс]:Структураелектромобіля. -Назваз екрана.Доступ<http://information-technology.ru/sci-pop-articles/27-transport/6188-printsip-raboty-i-ustrojstvo-elektromobilya>
3. Верховна Рада України Офіційний веб-портал [Електронний ресурс]: Проект Закону про внесення змін до Податкового кодексу України та деяких законодавчих актів України щодо стимулювання розвитку галузі електричного транспорту в Україні. - Назва з екрана. Доступ : [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=63677](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=63677)
4. IONCars[Електронний ресурс]:Склад акумулятора TeslaModelS .-Назвазекрана.Доступ<https://ion-cars.ru/battery-tesla-model-s-x/>
5. FordMotorCompany [Електронний ресурс] : Характеристики електромобіля FordEcosport-s. – Назва з екрана. Доступ : <https://www.ford.com/suvs-crossovers/ecosport/models/ecosport-s/>
6. Renault [Електронний ресурс] : Характеристики електромобіля RenaultE-techHybride.–Назвазекрана.Доступ:<https://www.renault.fr/vehicule-hybride/e-tech-hybride.html>
7. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG [Електронний ресурс] : Характеристики електромобіля PorsheTaycan – Назва з екрана. Доступ : <https://porsche.ua/models/taycan/taycan-models/taycan-turbo-s/>
8. BMW AG [Електронний ресурс] : Характеристики електромобіля BMW i8 Родстер. – Назва з екрана. Доступ : <https://www.bmw.ua/ru/all-models/bmw-i/i8-roadster/2017/technical-data.html#tab-0>
9. Tesla [Електронний ресурс] : FutureofDriving. - Назва з екрана. Доступ [https://www.tesla.com/en\\_EU/autopilot?redirect=no](https://www.tesla.com/en_EU/autopilot?redirect=no)  
ClaudineBadueSelf-DrivingCars:ASurvey/ClaudineBadue,Ranik

10. Guidolini, Raphael Vivacqua Carneiro, Pedro Azevedo, Vinicius Brito Cardoso, Avelino Forechi, Luan Jesus, Rodrigo Berriel, Thiago Paixao, Filipe Mutz, Lucas Veronese, Thiago Oliveira-Santos, Alberto Ferreira De Souza – 2019.
10. АвтоЦентр [Электронный ресурс]: Статистика щодо проведених тестів над електромобілями різних компаній. - Назва з екрана. Доступ: <https://www.autocentre.ua/news/u-kakogo-avtomobilya-samyj-luchshij-avtopilot-neozhidannye-rezultaty-testa-750962.html>
11. Tesla [Электронный ресурс] : Характеристики електромобіля Tesla Model X. - Назва з екрана. Доступ : <https://www.tesla.com/modelx>
12. Wikipedia [Электронный ресурс] : Класифікація рівнів автоматизованих систем - NHTSA levels. - Назва з екрана. Доступ : [https://en.wikipedia.org/wiki/Self-driving\\_car#Classification](https://en.wikipedia.org/wiki/Self-driving_car#Classification)
13. Autogeek [Электронный ресурс] : Принцип рекуперативне гальмування в електромобілях. - Назва з екрана. Доступ : <https://www.autogeek.com/ru/brake-recovery>
14. Thomas Teixeira Map Memorization and Forgetting in the IARA Autonomous Car / Thomas Teixeira, Filipe Mutz, Vinicius Cardoso, Lucas Veronese, Claudine Badue, Thiago Oliveira-Santos, Alberto F. De Souza - 2013
15. Tesla model owner's manual // Tesla Motors. North America – 2020 р. – С. 120-167.
16. Поведенческое моделирование эффективности управления автотранспортными средствами: уч. / Дияб Абдаллах Саид Али Омар, «Белорусский национальный технический университет» г. Минск – 2013 – С 60.
17. Электронный журнал Эксперт №4, Выпуски 4-2016 - с. 48 - Цифровой потоп.
18. Н. И. Кульбашна, К. А. Сорока. Разработка модели выбора скорости движения водителем с учетом дорожной обстановки / Н. И. Кульбашна, К. А. Сорока // Восточно-Европейский журнал передовых технологий ISSN 1729- 3774- №81 – 2016

19. Репнікова Н.Б. Теорія автоматичного керування / Н.Б. Репнікова – К.: НТУУ «КПІ», 2011.
20. Репнікова Н.Б. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів напрямку 6.050201 «Системна інженерія». Теорія автоматичного управління - 2. Теорія цифрових систем управління. / Н.Б. Репнікова, А.В. Писаренко- К.: НТУУ «КПІ», 2012
21. Яланецький В.А., Юрчук Л.Ю. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Комп'ютерне моделювання процесів і систем» кредитного модулю №2 «Моделювання систем керування» 2019