

Міністерство освіти і науки України  
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника  
Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки  
(повна назва кафедри)

Липка Ярослав Іванович

УДК 004:681.5

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія та електроніка»  
(шифр та назва спеціальності)

Кваліфікаційна робота

на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістр

(бакалавр, спеціаліст, магістр)

Комп'ютерна система управління дизельним двигуном типу Common Rail на  
прикладі Opel Antara

A computer control system for a Common Rail diesel engine based on the example  
of the Opel Antara

Науковий керівник:

доктор технічних наук,

професор, завідувач

кафедри комп'ютерної

інженерії та електроніки

Когут І.Т.

Рецензент:

к. ф.-м. н, зав. каф. фізики

і методики викладання

Ліщинський І.М

Івано-Франківськ

2024



## АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено структуру, принципи роботи та ефективність комп'ютерної системи керування дизельними двигунами з паливною системою Common Rail на прикладі Opel Antara. Представлено огляд теоретичних основ і технічних рішень, які забезпечують точний контроль процесу впорскування палива для підвищення ефективності роботи двигуна, зменшення витрат пального та зниження шкідливих викидів.

Перший розділ присвячено аналізу принципів роботи дизельних двигунів із системою Common Rail, етапам її еволюції, особливостям сучасних систем керування та основним перевагам у порівнянні з і

В іншому розділі описано структуру комп'ютерної системи керування двигуном, зокрема моделювання паливної системи Common Rail, побудову дискретних математичних моделей, конструкцію контролера та організацію CAN-зв'язку.

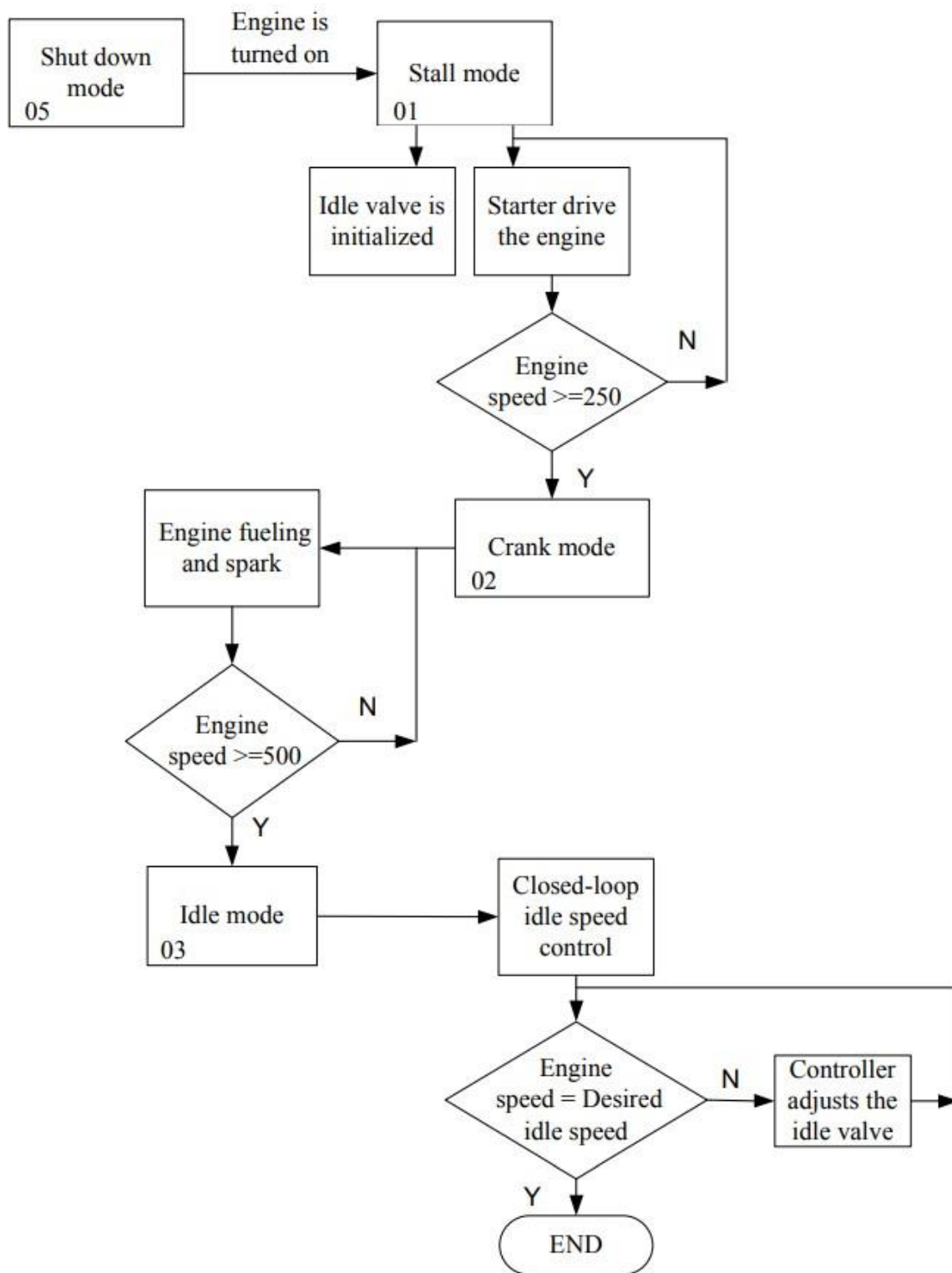
Третій розділ містить характеристики дизельного двигуна Opel Antara, створення моделі системи керування, розробку графічного інтерфейсу в середовищі LabVIEW, а також використання динамометра двигуна та технології моделювання HIL (Hardware-in-the-Loop).

У четвертому розділі наведено результати моделювання контролю тиску палива, проведено аналіз роботи системи, а також запропоновано рекомендації щодо її вдосконалення.

Дана робота складається зі вступу, 4 розділів, висновка, 28 джерел використаної літератури, додатка, 31 рисунків, 4 таблиць.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Липка Я.І.			Анотація	Літ.	Арк.	Аркуші
Перевірив		Когут І.Т.					3	1
Н. Контр.		.						
Затвердив								





<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
Розробив		Липка Я.І.			<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушіє</i>
Перевірів		Когут І.Т.				5	1
Н. Контр.		.					
Затвердив							
Загальна блок-схема							

Державний вищий навчальний заклад  
 «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»  
 Фізико-технічний факультет  
 Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки

Пояснювальна записка  
 до кваліфікаційної роботи на тему  
 Комп'ютерна система управління дизельним двигуном типу Common Rail на  
 прикладі Opel Antara

					123.КІ(м)-21.10			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
Розробив		Липка Я.І.			Пояснювальна записка	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркуші</i>
Перевірив		Когут І.Т.					6	67
Н. Контр.								
Затвердив								

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ECU - electronic control unit

CRDI - Common Rail Direct Injection

ШИМ - Широтно-імпульсна модуляція

LFT - Лінійне дробове перетворення

DPF - diesel particulate filter

GUI - Graphical user interface

ТТЛ - Транзисторно-транзисторна логіка

PI - Proportional-integral controller

VVA - variable valve actuation

					123.КІ(М)-21.10	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ COMMON RAIL .....	12
1.1. Принцип роботи дизельних двигунів системи Common Rail.....	12
1.2. Еволюція системи Common Rail у сучасних автомобілях.....	15
1.3. Огляд існуючих систем керування дизельними двигунами.....	17
1.4. Особливості та переваги системи Common Rail у дизельних двигунах .....	19
РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРА ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ .....	23
2.1. Моделювання паливної системи Common Rail.....	23
2.2. Дискретна математична модель паливної рампи.....	24
2.3. LFT моделі системи з дискретним часом.....	25
2.4. Конструкція контролера .....	27
2.5. CAN зв'язок .....	28
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РОБОТИ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДИЗЕЛЬНИМ ДВИГУНОМ НА ПРИКЛАДІ OPEL ANTARA.....	30
3.1. Характеристика дизельного двигуна Opel Antara.....	30
3.2. Модель комп'ютерної системи керування двигуном Opel Antara.....	34
3.3. Система керування двигуном .....	40
3.4. Розробка графічного інтерфейсу користувача LabVIEW.....	45
3.5. Застосування динамометра двигуна та моделювання HIL.....	48
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ СИСТЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ.....	56
4.1. Перевірка симуляції контролю тиску палива в системі Common Rail	56
4.2. Майбутні рекомендації .....	58
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	61
ДОДАТОК.....	64

						123.KI(м)-21.10	Арк.
							8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



## ВСТУП

Дизельним двигунам в даний час приділяється більше уваги завдяки їх природному високому ККД і низькому споживанню палива. З іншого боку, дифузний тип згоряння відбувається в дизельних двигунах, що призводить до утворення викидів і шуму. Було доведено, що викиди від дизельного двигуна залежать від специфікацій уприскування палива, таких як тиск уприскування, час і кількість.<sup>1</sup> Застосування мехатронних систем до дизельних двигунів збільшує здатність конструкторів зменшувати викиди, споживання палива та дизельний шум. . Збільшення кількості датчиків і виконавчих механізмів призводить до складної та тривалої процедури проектування. Тим не менш, переваги використання електронних систем керування двигуном (EMS) для покращення продуктивності та викидів дизельного двигуна роблять цю тему привабливою як для промисловості, так і для університетів.

Різні галузі техніки та науки задіяні в проектуванні та розробці електронного керування дизелем, результатом чого є багата література в цій галузі. Завдяки різноманітності аналізу EMS та процедур проектування всебічне дослідження допомагає дослідникам краще зрозуміти всю сферу розробки процедури керування дизельним двигуном та її наслідки.

Деякі дослідники намагалися розглянути цілісну конструкцію управління дизельним двигуном і описали процедуру. Ізерманн і Мюллер<sup>2</sup> розглянули процедуру проектування управління всім двигуном. Вони запровадили застосування моделювання керування на основі моделі до дизельних двигунів. Вони вважали, що методи калібрування на основі моделі (MBC) можуть значною мірою скоротити час і вартість проектування контролера та калібрування.

У їхній статті було розглянуто розробку програмного та апаратного забезпечення та обговорено різні типи моделювання. Вони класифікували різні методи проектування, засновані на моделюванні, на три основні категорії: програмне моделювання в циклі, швидке контрольне прототипування (RCP) і апаратне моделювання в циклі (HiL). Однак можна використовувати й інші методи, такі як симуляція моделі в циклі та моделювання процесора в циклі.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Газзелла та Ондер3 повідомили про керування двигуном внутрішнього згоряння з точки зору конструкції основного контролера. Вони описали різні методи моделювання, орієнтованого на управління, а потім обговорили фундаментальні підходи до проектування контролера. Вони класифікували різні методи моделювання двигуна на моделі середнього значення (MVM) і моделі дискретних подій. Явища двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) включають швидкі явища з незначними постійними та інші явища з тривалими постійними. У MVM такі швидкі явища, як процес згоряння, вважаються статичними процесами, а повільніші явища, такі як процеси в колекторі та інерція двигуна, вважаються динамічними процесами.

Для статичних процесів у моделі розглядаються їхні середні значення за шість-десять циклів двигуна. Hafner et al.<sup>4</sup> також вивчали мехатронний підхід до моделювання контролера дизельного двигуна. У своїй статті вони обговорили програмне та апаратне середовище для мехатронного підходу до проектування систем керування двигуном. Вони розглянули RCP та HiLsimulations у процедурі розробки контролера дизельного двигуна. Кінке та Нільсен розглянули модель ICE та різні підходи до проектування контролерів двигуна. Були обговорені різні методи керування, тобто класичні, сучасні та програмні обчислювальні контролери, та згадані зразки з кожного підходу керування.

**Мета даної роботи** розробити математичну модель системи керування тиском у паливній системі Common Rail дизельного двигуна Opel Antara, реалізувати комп'ютерне моделювання та дослідити ефективність використання ПД-контролера для регулювання тиску палива.

**Предмет роботи** : процеси керування тиском у паливній системі Common Rail дизельного двигуна, зокрема, математичне моделювання, комп'ютерна реалізація алгоритмів керування та взаємодія із середовищем реального часу.

**Завдання:**

1. Провести огляд літератури та аналіз еволюції системи Common Rail в сучасних автомобілях.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Дослідити принципи роботи дизельних двигунів та переваги використання системи Common Rail.
3. Розробити дискретну математичну модель паливної рампи, що враховує основні фізичні процеси в системі.
4. Спроекувати структуру комп'ютерної системи керування тиском палива, включаючи PID-контролер та засоби зв'язку (CAN).
5. Реалізувати модель комп'ютерної системи керування двигуном на прикладі автомобіля Opel Antara.
6. Розробити графічний інтерфейс користувача для візуалізації та налаштування параметрів системи.
7. Виконати моделювання віртуального тестування (HIL) для оцінки ефективності системи керування тиском палива.
8. Провести аналіз результатів та розробити рекомендації щодо вдосконалення системи керування.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ COMMON RAIL

## 1.1. Принцип роботи дизельних двигунів системи Common Rail

Переваги архітектури системи впорскування палива Common Rail були визнані з моменту розробки дизельного двигуна. Ранні дослідники, у тому числі Рудольф Дізель, працювали з паливними системами, які містили деякі основні характеристики сучасних дизельних систем впорскування палива Common Rail. Наприклад, у 1913 році британській фірмі Vickers Ltd було видано патент на систему впорскування палива Common Rail з форсунками з механічним приводом. Приблизно в той самий час у Сполучених Штатах був виданий ще один патент Томасу Гаффу на паливну систему для двигуна з іскровим запалюванням із прямим уприскуванням циліндра з електромагнітними клапанами з електричним приводом. Паливо вимірювали, контролюючи тривалість часу, протягом якого клапани були відкриті[1].

Ідея використання клапана впорскування з електричним приводом на дизельному двигуні з паливною системою Common Rail була розроблена Бруксом Вокером і Гаррі Кеннеді в кінці 1920-х років і застосована до дизельного двигуна компанією Atlas-Imperial Diesel Engine Company з Каліфорнії в початок 1930-х .

Робота над сучасними системами впорскування палива Common Rail була розпочата в 1960-х роках Societe des Procedes Modernes D'Injection (SOPROMI). Однак знадобиться ще 2-3 десятиліття, перш ніж регулятивний тиск підштовхне подальший розвиток і технологія стане комерційно життєздатною.

Технологія SOPROMI була оцінена компанією CAV Ltd на початку 1970-х років, і було встановлено, що вона дає невеликі переваги порівняно з існуючими системами P-L-N, які використовувалися на той час. Потрібна значна робота для підвищення точності та можливостей електромагнітних приводів.

Подальший розвиток дизельних систем Common Rail почався серйозно в 1980-х роках. До 1985 року Industrieverband Fahrzeugbau (IFA) з колишньої Східної Німеччини розробила систему впорскування Common Rail для своєї вантажівки W50, але прототип так і не надійшов у серійне виробництво, і проект був

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залишений на кілька років. Приблизно в той же час компанія General Motors також розробляла систему Common Rail для застосування в своїх легких двигунах IDI. Однак зі скасуванням їхньої дизельної програми легкої вантажопідйомності в середині 1980-х років подальший розвиток було припинено.

Кілька років по тому, наприкінці 1980-х і на початку 1990-х, виробники двигунів ініціювали низку проектів розробки, які згодом взяли на себе виробники обладнання для впорскування палива:

- Компанія Nippondenso розробила систему Common Rail для комерційних транспортних засобів, яку вони придбали у Renault і яка була введена у виробництво в 1995 році на вантажівках Hino Rising Ranger.
- У 1993 році Bosch — можливо, через певний тиск з боку Daimler-Benz — придбала технологію UNIJET, спочатку розроблену зусиллями Fiat і Elasis (дочірня компанія Fiat) для подальшої розробки та виробництва. Система Common Rail для легкових автомобілів Bosch була введена у виробництво в 1997 році для Alfa Romeo 156 1998 модельного року та Mercedes-Benz C-класу.
- Невдовзі після цього Лукас оголосив про укладення контрактів на загальну залізничну залізницю з Ford, Renault і Kia, виробництво яких розпочнеться у 2000 році.
- У 2003 році Fiat представив наступне покоління системи Common Rail, яка забезпечує 3-5 впорскувань/цикл двигуна для двигуна Multijet Euro 4.

Метою цих програм розробки, розпочатих наприкінці 1980-х – на початку 1990-х, була розробка паливної системи для майбутнього легкового автомобіля з дизельним двигуном. На початку цих зусиль було очевидно, що майбутні дизельні автомобілі використовуватимуть систему згорання з прямим упорскуванням завдяки очевидній перевазі в економії палива та питомій потужності порівняно з поширеною на той час системою згорання з непрямим

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

уприскуванням. Цілі розробок включали комфорт водіння, який можна порівняти з автомобілями, що працюють на бензині, відповідність майбутнім обмеженням викидів і покращену економію палива. Розглядалися три групи архітектур паливних систем:

- розподільний насос з електронним керуванням;
- інжектор з електронним керуванням (EUI або блок насос-форсунка);
- система впорскування Common Rail (CR).

Хоча зусилля навколо кожного з цих підходів призвели до комерційних паливних систем для серійних транспортних засобів, система Common Rail забезпечила низку переваг і з часом стала домінувати як основна паливна система, що використовується в транспортних засобах малої вантажопідйомності. Ці переваги включали:

1. Тиск палива не залежить від частоти обертання двигуна та умов навантаження. Це забезпечує гнучкість у регулюванні як кількості впорскування палива, так і моменту впорскування, а також забезпечує краще проникнення спрею та змішування навіть при низьких обертах двигуна та навантаженні. Ця особливість відрізняє систему Common Rail від інших систем упорскування, де тиск упорскування зростає зі швидкістю двигуна, як показано на рисунку 1.1.
2. Нижчі вимоги до максимального крутного моменту паливного насоса. З розвитком високошвидкісних двигунів з прямим уприскуванням (HSDI) більше енергії для змішування повітря з паливом надходило від імпульсу розпилення палива, на відміну від завихрювальних механізмів, які використовуються в старих системах згорання IDI. Лише системи впорскування палива під високим тиском змогли забезпечити енергію змішування та якісну підготовку розпилення, необхідні для низьких викидів твердих частинок та вуглеводнів. Щоб виробити енергію, необхідну для впорскування палива приблизно за 1 мілісекунду, звичайний насос-розподільник мав би забезпечити близько 1 кВт гідравлічної потужності за чотири (у 4-циліндровому двигуні) імпульси по 1 мс на один

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оберт насоса, створюючи значне навантаження на приводний вал. Однією з причин тенденції до систем Common Rail було мінімізація вимог щодо максимального крутного моменту насоса. Хоча вимоги до потужності та середнього крутного моменту насоса Common Rail були подібними, подача палива під високим тиском здійснюється до акумулятора, і, отже, пікова швидкість потоку (і піковий крутний момент, необхідний для приводу насоса) не обов'язково збігається з подією впорскування, як це є. Потік нагнітання насоса можна розподілити на більшу частину циклу двигуна, щоб підтримувати потребу в крутному моменті насоса більш рівномірним.

3. Покращена якість шуму. Двигуни DI характеризуються вищим піковим тиском згоряння і, отже, вищим шумом, ніж двигуни IDI. Було встановлено, що покращення рівня шуму та низькі викиди NOx найкраще досягаються шляхом впровадження пілотного впорскування. Найлегше це було реалізовано в системі Common Rail, яка була здатна стабільно подавати невелику кількість пілотного палива в усьому діапазоні навантаження/швидкості двигуна.

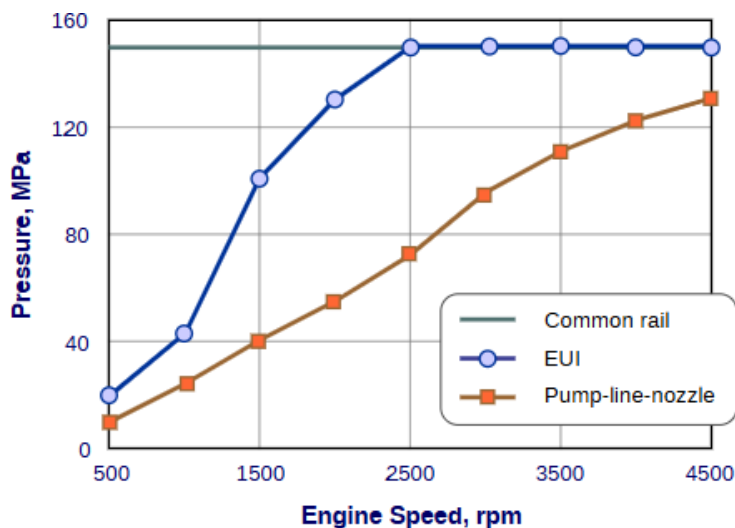


Рисунок 1.1. Зв'язок між тиском упорскування та частотою обертання двигуна в різних системах уприскування

### 1.2. Еволюція системи Common Rail у сучасних автомобілях

Системи Common Rail зазнали значної еволюції з моменту свого створення. Ці системи, спочатку представлені наприкінці 1980-х років, були спрямовані на

підвищення ефективності та продуктивності дизельних двигунів, усунення обмежень традиційних методів уприскування палива[2].

Ключові віхи в розвитку систем Common Rail включають впровадження технології вприскування палива під високим тиском, що дозволяє здійснювати багаторазове вприскування за цикл. Ця інновація сприяла кращому розпилюванню палива, що призвело до підвищення ефективності згорання та зменшення викидів.

Інший значний прогрес стався в 1990-х роках, з інтеграцією електронних блоків керування (ECU). Це вдосконалення дозволило точно контролювати момент уприскування та кількість, оптимізуючи роботу двигуна в різних умовах водіння. Такі функції, як регулювання змінного тиску, ще більше підвищили адаптивність систем Common Rail.

Сьогодні системи Common Rail продовжують розвиватися, триваючи дослідження, зосереджені на підвищенні тиску та передових технологіях управління паливом. Ці розробки мають вирішальне значення для відповідності суворим екологічним нормам, одночасно покращуючи продуктивність двигунів внутрішнього згорання.

Початок систем Common Rail можна простежити до 1990-х років, представлених як новаторський прогрес у технології дизельних двигунів. Конструкція дозволяє багаторазово впорскувати паливо під різним тиском, забезпечуючи краще розпилення палива та покращуючи ефективність згорання.

Початкові впровадження виникли від європейських виробників, таких як Fiat і Bosch, прокладаючи шлях до сучасного втілення цієї системи. Ці піонери визнали потенціал систем Common Rail для підвищення продуктивності та зменшення викидів у двигунах внутрішнього згорання.

У міру розвитку технології удосконалення конструкції форсунок і впровадження електронних блоків керування полегшили точну подачу палива. Ця еволюція значно вплинула на ринок, встановивши нові стандарти ефективності та вихідної потужності дизельних двигунів.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



На початку 2000-х років системи Common Rail отримали широке поширення серед різних автомобільних марок. Постійне вдосконалення цих систем забезпечило їх актуальність, сформувавши ландшафт автомобільної інженерії у сфері двигунів внутрішнього згоряння.

Розробка систем Common Rail була відзначена декількома ключовими технологічними віхами, які значно підвищили продуктивність двигунів внутрішнього згоряння. На початку 1990-х років впровадження систем уприскування палива під високим тиском з електронним керуванням революціонізувало ландшафт дизельних двигунів, забезпечивши більш точну подачу палива[3].

Значний прогрес стався в 1997 році, коли компанія DELPHI випустила першу комерційну дизельну систему Common Rail. Ця система дозволяла багаторазове впорскування за цикл згоряння, підвищуючи ефективність згоряння та зменшуючи викиди. Згодом інші виробники перейняли цю технологію, що призвело до широкого впровадження в різних автомобільних додатках.

Інші віхи включають інтеграцію п'єзоелектричних інжекторів, які забезпечують швидший час відгуку та підвищену точність. Ці досягнення дозволили збільшити тиск упорскування, що призвело до більш тонкого розпилення палива, сприяючи кращим якість згоряння та загальній продуктивності двигуна. Оскільки технологія продовжує розвиватися, ці віхи служать основоположними елементами, що визначають постійний розвиток систем Common Rail в автомобільній промисловості.

### 1.3. Огляд існуючих систем керування дизельними двигунами

Common Rail - система подачі палива, яка використовується в сучасних дизельних автомобілях. Її головною особливістю є використання паливної рампи, спільної для всіх паливних форсунок, яка служить накопичувачем, де паливо зберігається під високим тиском (до 300 мПа). Паливо в рейку подається насосом високого тиску. Звідти він надходить до форсунок і впорскується безпосередньо в циліндри двигуна. Час впорскування, дозування палива та кількість уприскувань за цикл контролюються ECU.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система Common Rail встановлюється на легкових автомобілях з 1997 року. Зараз нею оснащені дизельні двигуни більшості легкових і комерційних автомобілів.

У таблиці 1 наведені двигуни, оснащені системою Common Rail.

Таблиця 1. Двигуни, оснащені системою Common Rail

Марка автомобіля	Марка двигуна	Моделі двигунів
Nissan, Dacia, Renault	dCi	K9K, R9M, F9Q, R9N, M9R, G9T, G9U, M9T, P9X, V9X
Hyundai, KIA	CRDi	J3, D3FA, D4EB, D4CB, D4FC, D4FA, D4FB, D4FD, D4EA, D4HB, D6EA, G6EN, D3EA
Isuzu	DDi iTEQ	4JJ1
Mitsubishi	DI-D	4N13, 4N14, 4N15
Chrysler, Jeep	CRD	ENC, ENJ, ENS, ENR, EXF, EXA, ENE, ENF, EXL
Porsche	Diesel	M05.9E, M05.9D, MCU.DB, MCN.RB, MCR.CA, MCR.C, MCU.DC
Subaru	D	EE20Z

У таблиці 2 наведені основні компоненти системи Common Rail

Таблиця 2. Основні компоненти системи Common Rail

№	Ім'я	Функція
1	Паливний насос низького тиску	Знаходиться в паливному баку. Подає паливо в насос високого тиску.
2	Паливний фільтр	Видаляє бруд і різні домішки з палива і запобігає зносу насоса і форсунок.
3	Паливний насос високого тиску	Подає паливо під тиском у паливну рампу
4	Клапан дозування палива	Регулює кількість палива, що подається на паливний насос високого тиску.
5	Датчик тиску палива	Вимірює тиск в паливній рампі і посилає відповідний сигнал на ЕБУ.
6	Паливна рампа	Містить пальне під високим тиском.

7	Клапан регулювання тиску палива	Знімає надлишковий тиск у паливній рампі. Цей клапан повертає надлишок палива назад у паливний бак. Ним керує ECU.
8	Інжектори	Дозують та розпилюють паливо в камери згоряння.

#### 1.4. Особливості та переваги системи Common Rail у дизельних двигунах

Система прямого вприскування Common Rail (CRDI) складається з ключових компонентів: паливна рампа високого тиску, форсунки, паливний насос і регулятор тиску. Паливна рампа зберігає та розподіляє паливо під високим тиском до форсунок, які точно розпилюють паливо в камеру згоряння. Насос високого тиску підтримує необхідний тиск палива, а регулятор контролює його для оптимальної роботи двигуна.

Компонентами системи CRDI є:

##### 1. Паливний насос високого тиску

Паливний насос високого тиску є ключовим компонентом, відповідальним за подачу палива під тиском із паливного баку в загальну паливну рампу. Він забезпечує подачу палива під необхідним тиском для задоволення вимог точного вприскування двигуна, сприяючи ефективному згорянню.

##### 2. Загальна паливна магістраль

Загальна паливна рампа служить розподільною системою, яка отримує паливо під тиском від насоса високого тиску та подає його до окремих форсунок. Він підтримує постійний тиск палива в усій системі, оптимізуючи точність вприскування та продуктивність двигуна.

##### 3. Інжектори

Інжектори є ключовими компонентами, які безпосередньо вводять паливо в камери згоряння. Вони точно контролюються блоком керування двигуном (ECU), щоб подавати потрібну кількість палива в потрібний час, забезпечуючи ефективне згоряння, виробництво електроенергії та контроль викидів.

##### 4. Блок керування двигуном (ECU)

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Блок керування двигуном, який часто називають ECU або модулем керування двигуном (ECM), є мозком системи CRDi. Він отримує дані від різних датчиків, які контролюють стан двигуна та відповідно регулюють процес впорскування палива. ECU оптимізує подачу палива для продуктивності, ефективності та відповідності вимогам щодо викидів, забезпечуючи безперебійну роботу системи CRDi.

#### Принцип роботи системи прямого впорскування Common Rail

- Насос високого тиску подає паливо з паливного бака або в гідроакумулятор, або в колектор. Якщо тиск в гідроакумуляторі перевищує задану межу, спрацьовує підключений до нього запобіжний клапан високого тиску, щоб зменшити надлишковий тиск.
- Згодом паливо, що зберігається в акумуляторі, направляється до циліндрів двигуна через паливопроводи, які сприяють міцні форсунки.
- Для підтримки сталого тиску для безперебійної роботи використовується ще один запобіжний клапан високого тиску, оснащений пружинним механізмом. Цей клапан регулює тиск і перенаправляє надлишок палива з акумулятора назад в паливний бак.
- На представленій схемі увагу привертає голчастий клапан, який відповідає за регулювання відкриття і закриття форсунки під час розбризкування палива в циліндри. Кулачок диктує рух сопла вгору та вниз, при цьому його рух передається через коромисло та важіль, з'єднаний із пружиною. Під час витримки кулачка пружина разом з голчастим клапаном запобігає впорскуванню палива в циліндр.
- Ущільнювач відіграє важливу роль, забезпечуючи належний рівень палива над сідлом клапана для сприяння оптимальному впорскуванню палива в циліндри.
- Центральне місце в цій системі займає клин, який регулює кількість палива, що впорскується в циліндр, відповідно до вимог двигуна до

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужності. Цей клин може бути приведений в дію регулятором або вручну, залежно від конкретних потреб.

Функції системи прямого впорскування Common Rail. Нижче наведено різні функції системи CRDI:

- Ефективно подає паливо під високим тиском до форсунок.
- Посилює згоряння за рахунок точної синхронізації впорскування палива.
- Зменшує шум і вібрацію під час горіння.
- Збільшує ефективність палива та зменшує викиди.
- Дозволяє робити кілька ін'єкцій за цикл для кращого контролю.
- Розрахований на широкий діапазон обертів і навантажень двигуна.
- Забезпечує стабільний тиск палива для всіх форсунок.
- Дозволяє електронний контроль і регулювання подачі палива.
- Покращує потужність двигуна, крутний момент і загальну продуктивність.
- Допомагає дотримуватися суворих стандартів викидів.

Переваги системи прямого впорскування Common Rail. Переваги системи CRDI в її різноманітних застосуваннях включають:

- Досягнення значного збільшення потужності та крутного моменту на 25% у порівнянні з традиційними двигунами з прямим уприскуванням.
- Для реалізації потрібні мінімальні початкові вкладення.
- Підвищення прискорення та досягнення покращених характеристик підбирання.
- Зниження рівня шуму та вібрації, що сприяє більш тихій роботі.
- Збільшення пробігу та економії палива.
- Значне зниження викидів до мінімального рівня.
- Мінімізація споживання палива для економічної роботи.
- Досягнення кращих загальних результатів і показників ефективності.

Недоліки системи прямого впорскування Common Rail. Хоча система CRDI може похвалитися кількома перевагами, вона має обмеження. Недоліки прямого впорскування Common Rail у різноманітних сферах застосування включають:

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Вища вартість автомобіля завдяки розширеним функціям технології.
- Підвищені витрати на комплектуючі та запчастини.
- Високі витрати на обслуговування пояснюються складністю системи.
- Складна конструкція в результаті наявності численних складних компонентів.

					123.КІ(м)-21.10	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРА ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ

Постійний тиск палива в паливній системі Common Rail для дизельних двигунів Opel Antara завжди важливий для точного дозування палива. Однак, оскільки паливні системи Common Rail мають складну динаміку рідини та збурення від суміжних систем, таких як насоси тиску та паливні форсунки, простий ПД-регулятор зазвичай забезпечує лише задовільні результати. Численні дослідження були присвячені розробці більш досконалих контролерів[4].

У цьому дослідженні був запропонований метод надійного керування, де вприскування палива розглядалося як вхідний вплив збурення, а в'язкість палива – як невизначеність параметра системи. Шум вимірювання датчика також був врахований у цій конструкції. Два надійних контролери (контролери  $H_2$  і  $H_\infty$ ) були розроблені для регулювання тиску палива в системі Common Rail. Продуктивність двох надійних контролерів оцінювали шляхом їх порівняння з базовим контролером PI. Результати показують, що контролер  $H_2$  забезпечив найкращу продуктивність.

### 2.1. Моделювання паливної системи Common Rail

На рисунку 2.1. зображена паливна система Common Rail для одноциліндрового дизельного двигуна. Тиск палива здійснюється через насос низького тиску і насос високого тиску. Тиск палива регулюється двома електромагнітами, один керує зворотною лінією насоса високого тиску, а інший - зворотною лінією паливної рампи.

Обидва соленоїди за замовчуванням відкриті з міркувань безпеки. Паливо повертається в паливний бак через два соленоїди, керовані сигналами ШІМ. У цьому дослідженні обидві швидкості двигуна паливного насоса були зафіксовані. Соленоїд паливного насоса також підтримувався в постійному положенні за допомогою постійного сигналу ШІМ.

Тиск палива в паливній системі Common Rail регулювався шляхом регулювання положення відкриття електромагніта паливної рампи на основі

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сигналу датчика тиску палива. Зміна тиску палива спричинена впорскуванням палива, зміною в'язкості палива тощо.

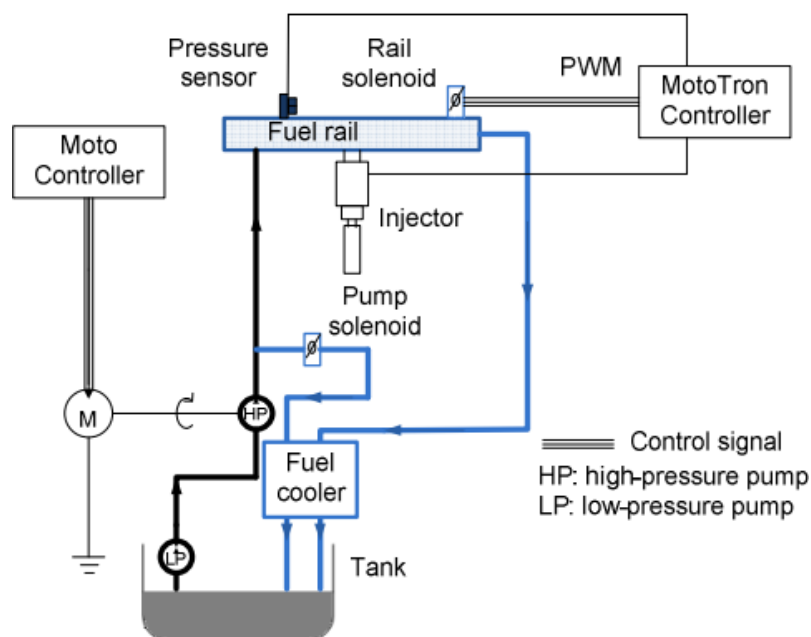


Рисунок 2.1. Паливна система Common Rail

## 2.2. Дискретна математична модель паливної рампи

У цьому дослідженні паливна система Common Rail була змодельована як система другого порядку. Функція передачі першого порядку для динаміки соленоїда паливної рампи та функція передачі першого порядку для динаміки паливної рідини, як показано в (2.1),

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)} \frac{1}{(\tau_2 s + 1)} \quad (2.1)$$

де  $\tau_1$  – постійна часу динаміки соленоїда паливної рампи, а  $\tau_2$  – постійна часу для динаміки палива.  $U(s)$  – керуючий вхід (сигнал шпаруватості ШІМ); у той час як  $Y(s)$  - вихідний тиск паливної рампи, виміряний датчиком тиску.

У практичному застосуванні динаміка палива в основному залежить від в'язкості палива, яка змінюється залежно від температури палива, і температура змінюється дуже різко, коли паливний насос високого тиску створює тиск у паливі[5]. Тому в цьому дослідженні параметр невизначеності  $\delta$  був введений у постійну часу для динаміки паливної рідини, і математична модель з невизначеністю може бути виражена таким чином:

										Арк.
										24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						



$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)} \frac{1}{(\tau_2 + \delta)s + 1} \quad (2.2)$$

Лінійну систему (2.2) потім дискретизували на наступну дискретну передаточну функцію з періодом вибірки 0,1 мс,

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{1-a}{z-a} \frac{1-b}{1-bz^{-1}} \quad (2.3)$$

Де,  $a = e^{-T_s/\tau_1}$ ,  $b = e^{-\tau_1(1+\delta)}$ ,  $\delta$  – відповідна невизначеність у дискретній області), а  $T_s$  – час вибірки

### 2.3. LFT моделі системи з дискретним часом

Лінійне дробове перетворення (LFT) є корисним методом стандартизації блок-схем для надійного аналізу та проектування керування. На рисунку 2.2 показано LFT моделі системи з дискретним часом, де матриця  $M$  є матрицею коефіцієнтів;  $W_u$ ,  $W_y$  і  $W_n$  є динамічними ваговими матрицями. Вагові матриці були обрані як фільтри високих частот першого порядку. Зокрема,  $W_u$  використовується для відображення певних обмежень на керуючі сигнали,  $W_y$  використовується для відображення вимог до виходу, а  $W_n$  використовується для моделювання частотного вмісту шуму датчика.[6] Сигнали  $d$ ,  $n$ ,  $r$ ,  $u$  та  $y$  представляють порушення впорскування палива, шум датчика, контрольний тиск палива, контрольний вхід та вихід тиску палива відповідно.

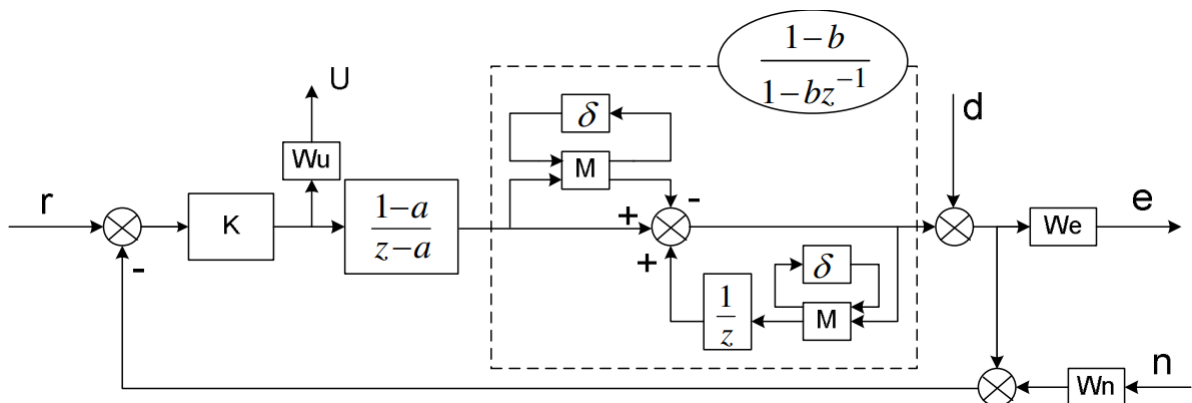


Рисунок 2.2. Структурна схема моделі системи

Витягнувши структуровану невизначеність  $\Delta$  і регулятор  $K$ , систему можна переформувати в стандартну структуру надійного керування, як показано на

рисунку 2.3. Новий системний вхідний сигнал  $w$  складається з перешкод і шуму датчика, і він визначається як

$$w = \begin{bmatrix} d \\ n \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

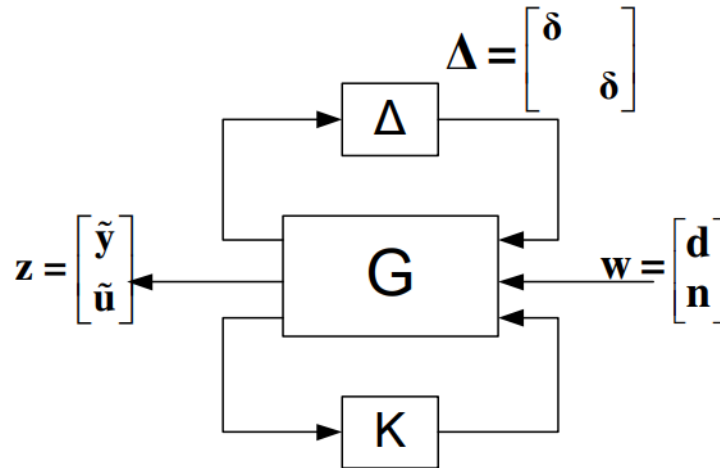


Рисунок 2.3. Загальна основа

Новий вихід системи  $z$  складається зі зваженого тиску палива та зваженого входу керування соленоїдом, як показано нижче

$$z = \begin{bmatrix} \tilde{y} \\ \tilde{u} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Зауважте, що верхня матриця невизначеності LFT  $\Delta$  визначається як

$$\Delta = \delta I_2 \quad (2.6)$$

Номінальний завод  $G$  може бути виражений у просторі станів за допомогою

$$G = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ C_d & D_d \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

де  $A_d$ ,  $B_d$ ,  $C_d$  і  $D_d$  є матрицями простору станів і можуть бути реалізовані в Matlab/Simulink, показаному на рисунку 2.4.

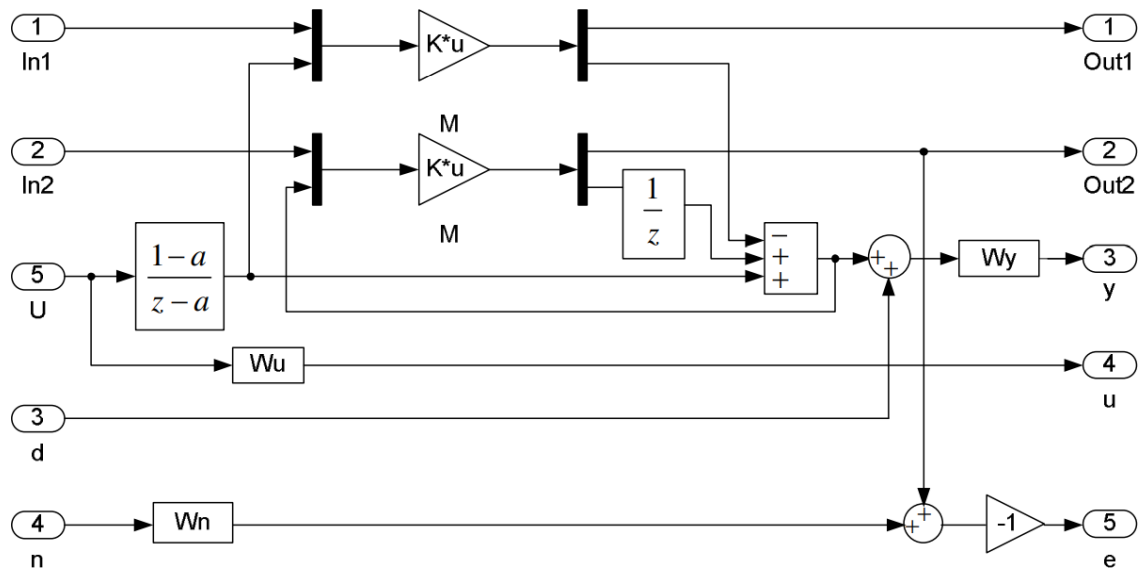


Рисунок 2.4. Модель Simulink G

## 2.4. Конструкція контролера

У цьому дослідженні було розроблено два надійні контролери для контролю тиску в паливній рампі, що залежить від перешкод уприскування, шуму датчика та невизначеності моделювання. Два контролери: контролер  $H_2$  і контролер  $H_\infty$ . Їх продуктивність оцінювалася порівняно з базовим PI-регулятором. На рисунку 2.5 показана схема системи контролю тиску в паливній рампі[7].

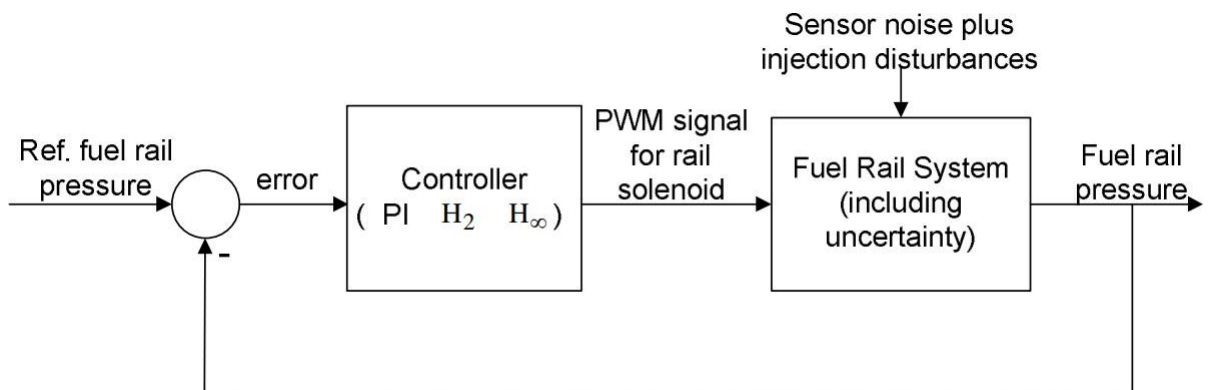


Рисунок 2.5. Схема системи регулювання тиску в паливній рампі

У цьому дослідженні постійна часу  $\tau_1$  була встановлена на рівні 0,01 с, а  $\tau_2$  була задана як 0,001 с. Зверніть увагу, що ці два значення будуть відкалібровані

за допомогою експериментальних даних у майбутньому. Вагові матриці були оптимізовані на основі продуктивності контролерів і наведені в рівнянні (2.8).

$$W_n = \frac{0.05z - 0.0499}{z - 0.9048}$$

$$W_u = \frac{z-0.9999}{z-0.999} \quad (2.8)$$

$$W_y = \frac{2.5}{z - 0.99999999}$$

## 2.5. CAN зв'язок

Зв'язок по шині CAN також є дуже важливою частиною системи керування двигуном. Контролер спілкується з іншими пристроями через CAN-з'єднання, як показано на рисунку 2.6. Контролер двигуна надсилає такі сигнали, як швидкість двигуна, AFR, температура охолоджуючої рідини, імпульс подачі палива, поставлена іскра, для відображення в графічному інтерфейсі користувача LabVIEW, зчитуючи команди керування з головного комп'ютера. З'єднання CAN між контролером MotoTron і головним комп'ютером використовує високошвидкісний USB-кабель NI. Ця система також містить канал CAN для системи керування VVA. Команди керування надсилаються до контролера VVA через канал CAN, тоді як кілька сигналів TTL використовуються разом для керування VVA як сигнали синхронізації[8]. Крім того, був доданий третій канал CAN для зв'язку з системою моделювання dSPACE HiL, де була розроблена спрощена модель двигуна для моделювання апаратного забезпечення в циклі (HiL), щоб розроблену систему керування можна було перевірити на стенді.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

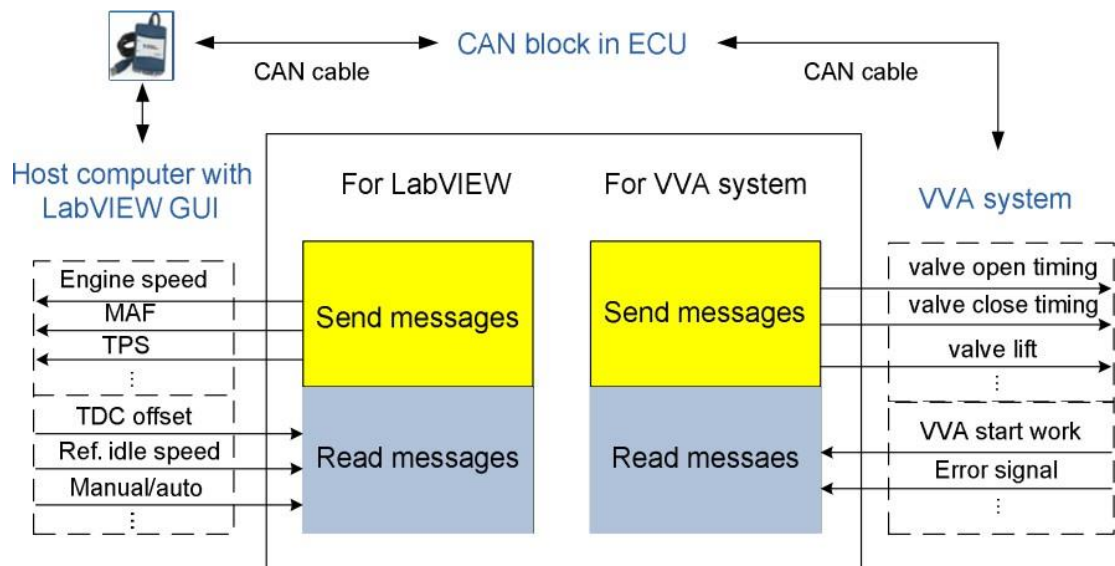


Рисунок 2.6. CAN зв'язок

## РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РОБОТИ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДИЗЕЛЬНИМ ДВИГУНОМ НА ПРИКЛАДІ OPEL ANTARA

### 3.1. Характеристика дизельного двигуна Opel Antara

Дизельний двигун Opel Antara, який охоплює додаткові аспекти, такі як динаміка водіння, деталі конкретної моделі, вимоги до обслуговування тощо.

#### 1. Технічні характеристики двигуна за роком випуску[9-11]

##### ➤ 2.0 CDTI (2006–2011)

- Вихідна потужність: коливається від 127 до 150 к.с.
- Крутний момент: зазвичай близько 320 Нм, що забезпечує пристойну тягову потужність, що є перевагою для SUV такого розміру.
- Пряме впорскування Common Rail: Ця система покращує розпилення палива та загальну ефективність.
- Турбонаддув: 2.0 CDTI використовує турбокомпресор для забезпечення кращої вихідної потужності та крутного моменту, особливо на нижчих обертах.

##### ➤ 2.2 CDTI (2011 і далі)

- Вихідна потужність: дві версії, потужністю 163 к.с. або 184 к.с., що пропонують більше потужності та гнучкості.
- Крутний момент: версія потужністю 163 к.с. має близько 350 Нм, тоді як версія потужністю 184 к.с. досягає 400 Нм, що робить її ідеальною для буксирування або складних умов водіння.
- Підвищена ефективність: Оновлення двигуна 2.2 CDTI підвищили ефективність і викиди, що дозволило Antara відповідати суворішим стандартам Euro 5 і Euro 6 у пізніших моделях.

#### 2. Динаміка водіння та керованість

Підвіска: Antara оснащена передньою підвіскою Макферсон і незалежною багатоважільною задньою підвіскою, яка допомагає підтримувати комфорт і стабільність їзди. Однак підвіска може здатися дещо жорсткою порівняно з іншими позашляховиками, особливо на нерівній місцевості.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рульове керування: рульове керування Antara загалом точне, але може здатися трохи важким на низьких швидкостях, що є загальною характеристикою позашляховиків з дизельним двигуном.

Гальмування: дизельні моделі оснащені більшими гальмами, щоб підтримувати важку конструкцію автомобіля та крутний момент, забезпечуючи достатню гальмівну силу.

### 3. Продуктивність трансмісії

Ручна коробка передач: шестиступінчаста механічна коробка передач на дизельних двигунах відома своєю надійністю та забезпечує більше контролю, особливо для водіїв, які використовують Antara для буксирування або легкого бездоріжжя.

Автоматична коробка передач: шестиступінчаста автоматична коробка передач забезпечує плавне перемикання передач, але може здатися трохи повільною в парі з дизельними двигунами з високим крутним моментом. Автоматичний варіант більш популярний для тих, хто користується автомобілем у міських або заміських умовах.

### 4. Ефективність палива та викиди

Двигун 2.2 CDTI трохи ефективніший, ніж 2.0 CDTI, особливо в умовах шосе. Дизельні моделі Antara мають рейтинг економії палива приблизно:

- 2.0 CDTI: 7,5–8,5 л/100 км у змішаному циклі.
- 2.2 CDTI: Близько 6,5–8,0 л/100 км, з кращим пробігом на шосе, ніж у містах.

Викиди: моделі, випущені після 2011 року, відповідають стандартам Euro 5, а пізніші моделі можуть відповідати стандартам Euro 6. Системи контролю викидів, включаючи DPF і EGR, допомагають зменшити викиди NOx і твердих частинок, хоча вони потребують регулярного обслуговування.

### 5. Вимоги до технічного обслуговування

Ремінь ГРМ: у дизельних двигунах використовується ремінь ГРМ, який потребує заміни приблизно кожні 90 000–120 000 км, залежно від умов руху.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Клапан EGR: може знадобитися регулярне чищення або заміна через накопичення вуглецю, особливо під час частої їзди на низьких швидкостях або в міському русі.

Дизельний сажовий фільтр (DPF): DPF може забиватися, якщо автомобіль здебільшого їздить у міських умовах. Часові довгі поїздки на високій швидкості (наприклад, шосе) можуть допомогти відновити фільтр.

Турбокомпресор: дизельні двигуни, особливо з більшою вихідною потужністю, створюють додаткове навантаження на турбокомпресор. Регулярна заміна високоякісної оливи має вирішальне значення для запобігання зносу турбіни.

Паливні фільтри. Рекомендується замінювати паливний фільтр кожні 30 000–40 000 км, щоб зберегти паливну ефективність і продуктивність.

#### 6. Система повного приводу (AWD).

Система повного приводу на Antara налаштована на вимогу, тобто за замовчуванням вона працює в режимі переднього приводу та автоматично розподіляє крутний момент на задні колеса, коли виявлено пробуксовку. Це налаштування покращує паливну ефективність у порівнянні зі штатною системою повного приводу.

Система повного приводу в Antara практична для м'якого бездоріжжя та зимових умов водіння, але не має низькочастотної коробки передач, тому вона не призначена для екстремального бездоріжжя.

#### 7. Буксирування та вантажопідйомність

Дизельні варіанти з високим крутним моментом роблять Antara придатною для буксирування, з гальмівною здатністю буксирування до 2000 кг для обох моделей 2.0 і 2.2 CDTI.[12]

Це робить його популярним вибором серед водіїв, яким потрібно буксирувати причепи, човни або каравани, оскільки потужність крутного моменту допомагає з легкістю керувати більшими вантажами.

#### 8. Надійність і відомі проблеми

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Проблеми з DPF і EGR: як і в багатьох дизельних двигунах, системи DPF і EGR можуть забиватися, що призведе до дорогого ремонту, якщо їх не вирішити.

Проблеми з турбокомпресором: турбокомпресори можуть постраждати від витоку масла або несправності, якщо їх не обслуговувати належним чином, особливо при великих пробігах.

Проблеми з електрикою: деякі користувачі повідомляють про проблеми з електричною системою, зокрема з датчиками, пов'язаними з викидами, і системою повного приводу.

Знос зубчастого ременя: якщо його не замінити вчасно, зношений зубчастий ремінь може призвести до пошкодження двигуна, тому своєчасна заміна має вирішальне значення.

## 9. Конкуренти

Дизельні моделі Opel Antara конкурують з аналогічними позашляховиками, такими як Volkswagen Tiguan, Ford Kuga, Kia Sportage і Hyundai Tucson. Незважаючи на пристойну продуктивність і можливості буксирування, дизельні моделі Antara іноді вважаються менш витонченими з точки зору якості інтер'єру та інформаційно-розважальних засобів порівняно з конкурентами.

## 10. Інтер'єр і комфорт

Компонування салону: Інтер'єр Antara пропонує великий простір і практичність, зі складними задніми сидіннями для збільшення вантажного об'єму.

Комфорт: дизельні моделі з їхньою додатковою вагою можуть здаватися трохи жорсткішими під час налаштування підвіски, але загалом сидіння зручні, а звукоізоляція допомагає зменшити шум двигуна.

Інформаційно-розважальна система: попередні моделі мають базові інформаційно-розважальні системи, тоді як пізніші моделі пропонують розширені опції, хоча в них все ще можуть бути відсутні деякі функції, наявні в нових позашляховиках.

Загалом варіанти дизельних двигунів Opel Antara є функціональними, міцними та потужними автомобілями, особливо для водіїв, яким потрібен

					123.KI(м)-21.10	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

надійний позашляховик із можливістю буксирування та помірними позашляховими можливостями. Регулярне технічне обслуговування, особливо компонентів дизеля, є ключовим для забезпечення безперебійної роботи двигуна.

### 3.2. Модель комп'ютерної системи керування двигуном Opel Antara

У цій розробці система керування двигуном складається з ECU виробництва MotoTron (блок керування двигуном), налаштованої коробки приводу та головного комп'ютера керування двигуном із LabVIEW GUI (графічний інтерфейс користувача).[13] Зв'язок між ECU та головним комп'ютером здійснюється через CAN (мережа зони керування) за допомогою високошвидкісного USB-пристрою National Instrument (NI) (NI USB-8473). На рисунку 3.1 показано схему архітектури системи.

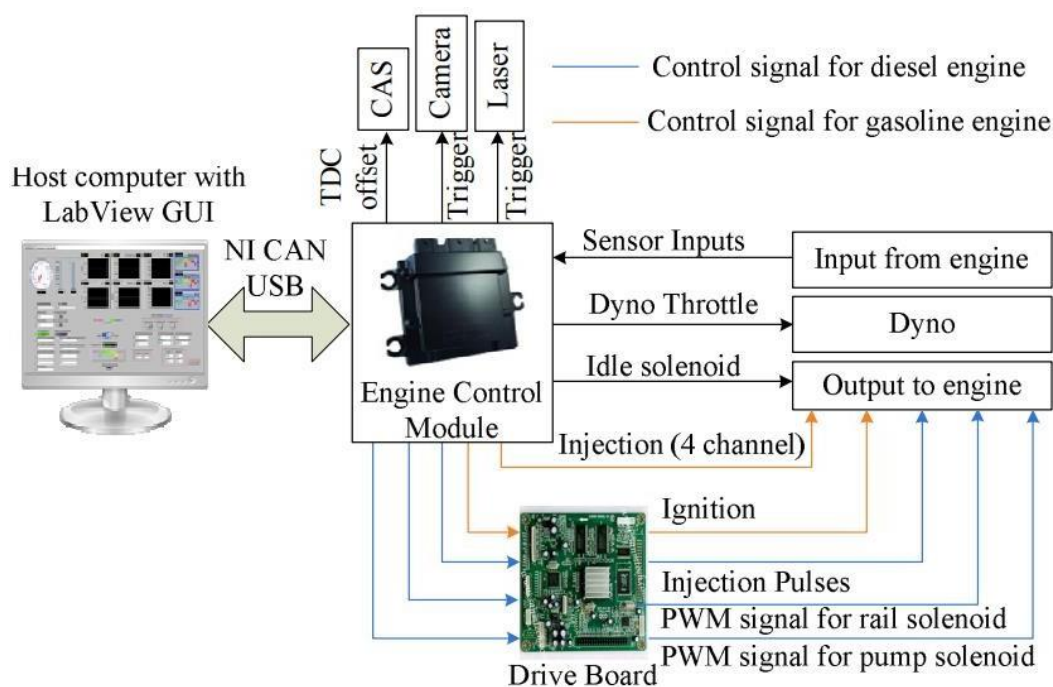


Рисунок 3.1. Архітектура системи керування двигуном

Виробничий контролер MotoTron, який використовується в цій системі, має 33 аналогових вхідних каналу, 3 цифрових вхідних каналу та кілька вихідних каналів. Контролер синхронізується на основі зубчатого датчика 58X і одноімпульсного датчика кулачка. Крім того, MotoTron забезпечує калібрування зміщення верхньої мертвої точки (ВМТ) для користувачів, щоб синхронізувати віртуальну логіку ВМТ MotoTron з фізичною ВМТ двигуна. Ця система

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керування надає користувачам постійний імпульсний сигнал, що надходить у віртуальний TDC MotoTron для програми синхронізації системи. Два сигнали тригерних імпульсів спеціально розроблені для тестування оптичного двигуна. Один для високошвидкісної камери, а інший для зовнішнього лазерного джерела. Ці два тригерні імпульси можуть допомогти синхронізувати отримані зображення з даними про згоряння двигуна (наприклад, сигнал тиску в циліндрі), зареєстрованими в системі аналізу згоряння (CAS)[14].

Коробка приводу керування двигуном розроблена для різноманітних застосувань. Він не лише здатний керувати струмом утримування запалювання до 20 А для бензинового двигуна (оскільки модуль керування MotoTron не містить жодного драйвера запалювання), але також може керувати паливними форсунками для дизельних двигунів. Крім того, цей блок приводу також має два канали ШІМ, які можна використовувати для керування соленоїдом керування поверненням паливного насоса та соленоїдом повернення паливної рампи.

Головний комп'ютер зв'язується з контролером двигуна через CAN за допомогою пристрою NI USB-CAN. Графічний інтерфейс LabVIEW був розроблений для керування двигуном у реальному часі. У цьому графічному інтерфейсі можна відобразити багато сигналів двигуна. Тим часом сторінку калібрування LabVIEW, яка складається з багатьох контрольних параметрів, можна використовувати для налаштування системи керування двигуном у режимі онлайн у реальному часі.

Алгоритм системи керування двигуном був розроблений у Simulink з використанням програмного забезпечення MotoHawk, яке забезпечує загальний інструмент для автоматичної генерації коду, моделювання, проектування системи керування та функцій вводу/виводу, так що алгоритм системи керування двигуном можна ефективно розробляти та автоматично кодувати з Matlab /Simulink до кодів C, які виконуються в виробничому контролері MotoTron. Весь алгоритм керування складається з трьох основних частин, як показано на рисунку 3.2: 1) обробка сигналу датчика та виконавчого механізму; 2) Система керування двигуном (EMS); 3) Зв'язок CAN.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

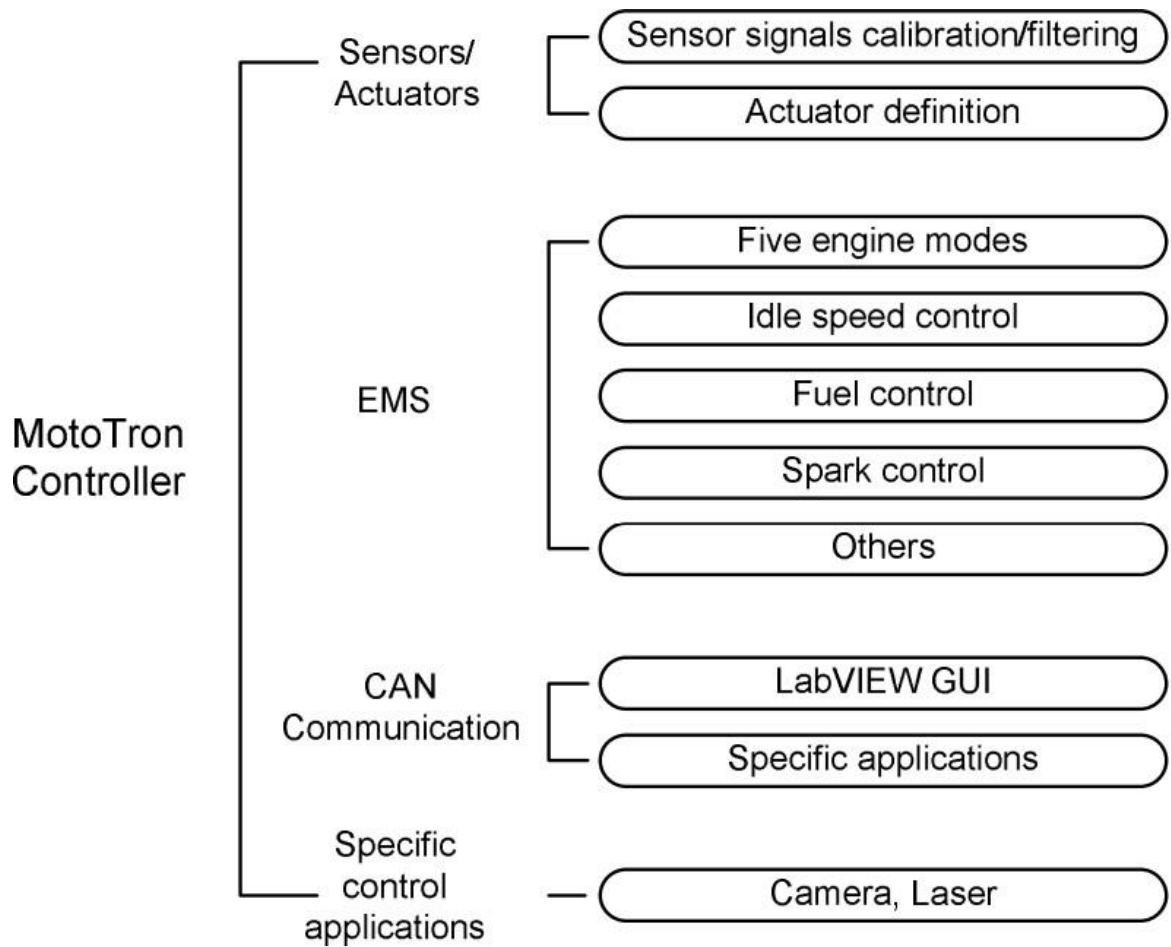


Рисунок 3.2. Структура алгоритму керування двигуном

Обробка сигналів датчиків і виконавчих механізмів завжди є важливою частиною розробки системи керування, особливо для автомобільних двигунів, які зазвичай мають десятки датчиків і виконавчих механізмів. У таблиці 3 і таблиці 4 наведено перелік приводів і датчиків, включених до цієї системи керування, а також визначення типу їх сигналу.

Таблиця 3. Визначення вихідного керуючого сигналу

№	Визначення сигналу	Тип
1	Інжектор №1	13,5 В (імпульс увімкнення-вимкнення)
2	Інжектор №2	13,5 В (імпульс увімкнення-вимкнення)
3	Інжектор №3	13,5 В (імпульс увімкнення-вимкнення)
4	Інжектор №4	13,5 В (імпульс увімкнення-

		вимкнення)
5	Запалювання №1,4 (відпрацьована іскра)	13,5 В (імпульс увімкнення-вимкнення)
6	Запалювання №3,2 (відпрацьована іскра)	13,5 В (імпульс увімкнення-вимкнення)
7	Соленоїд холостого ходу двигуна	PWM (2А max)
8	Контроль впускного клапана (високий рівень відкритості) №1	TTL
9	Контроль впускного клапана (високий рівень відкритості) №2	TTL
10	Контроль випускного клапана (високий рівень відкритості) №1	TTL
11	Контроль випускного клапана (високий рівень відкритості) №2	TTL
12	Посилання на підйом клапана	ШИМ (0 ~ 5 В)
13	Соленоїд термостата	ШИМ (макс. 2 А)

Таблиця 4. Визначення сигналу вхідного датчика

№	Визначення сигналу	Тип
1	Імпульс положення кривошипа	60-2, TTL
2	Імпульс положення кулачка	TTL
3	Тиск повітря в колекторі	0 ~ 5 V
4	Температура повітря в колекторі	0 ~ 5 V
5	Положення дросельної заслінки	0 ~ 5 V
6	Співвідношення повітря до палива	0 ~ 5 V
7	Масова витрата повітря	0 ~ 5 V
8	Температура теплоносія	0 ~ 5 V
9	Тиск масла	0 ~ 5 V
10	Відсоток навантаження двигуна	0 ~ 5 V
11	Система аналізу горіння	TTL
12	Фотоапарат і лазер	TTL

У цій системі керування двигуном цифрові сигнали обробляються в режимі події на основі кривошипа, а всі аналогові сигнали оновлюються з фіксованим періодом вибірки 5 мс. Фільтри на рисунку 3.3 використовуються для аналогових сигналів, і коефіцієнт фільтра, а також тривалість фільтра можна налаштувати через головний комп'ютер. Кожен датчик калібрується на основі його характерних кривих[15].

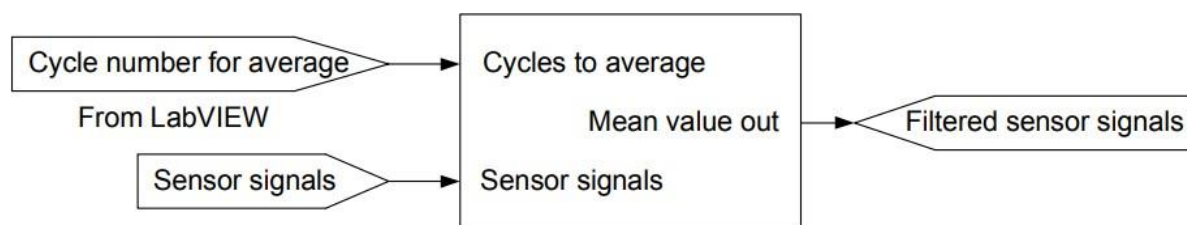


Рисунок 3.3. Фільтр аналогового сигналу

Для приводів деякі з них працюють у режимі залежно від часу, наприклад клапан холостого ходу, термостат, паливна рампа та соленоїди паливного насоса, а решта працюють у режимі залежно від подій кривошипа, наприклад паливна форсунка, котушка запалювання, і так далі. Важливо визначити типи сигналів приводу перед їх використанням. У цій системі керування двигуном сигнали впорскування є сигналами типу TTL, які можуть керувати драйвером інжектора на основі струму безпосередньо або працювати як імпульс запуску для схеми драйвера дизельного інжектора в коробці приводу. Сигнали запалювання також є сигналами типу TTL. Окрім сигналів уприскування палива та сигналів запалювання, ця система керування також надає чотири керуючі сигнали TTL для конкретного клієнта (Gongda Power), які використовуються як чотири опорні сигнали керування регульованим приводом клапана (два впускних і два випускних клапана для циліндра 4). Крім того, було згенеровано декілька сигналів ШІМ (широтно-імпульсної модуляції) для керування електромагнітом паливної рампи, керування електромагнітом паливного насоса, керування електричним термостатом і опорним сигналом підйому клапана.

На рисунках 3.4, 3.5 і 3.6 показано схеми підключення вводу/виводу. Зокрема, на рисунку 3.4 показано підключення живлення для ECU. На рисунку

					123.KI(м)-21.10	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

3.5 показано підключення датчиків. З'єднання для приводів показано на рисунку 3.6.

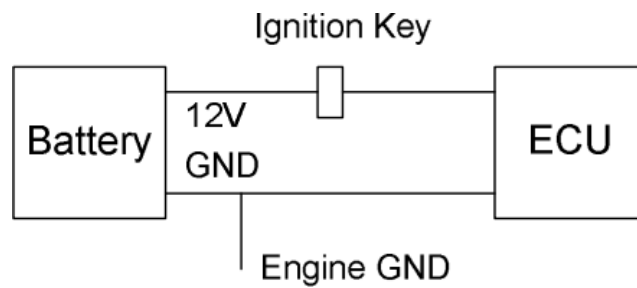


Рисунок 3.4. Підключення живлення ECU

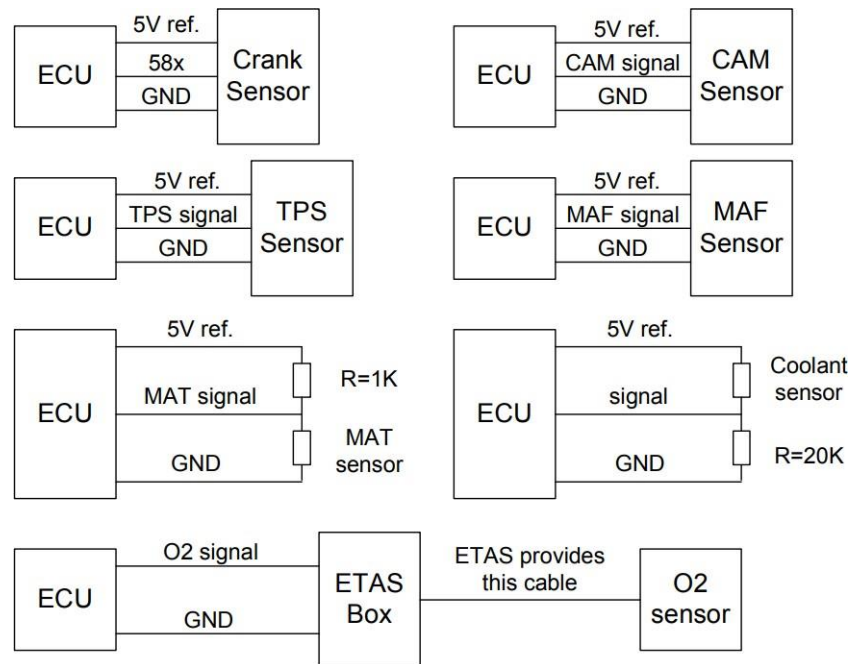


Рисунок 3.5. Сигнали датчиків до ECU

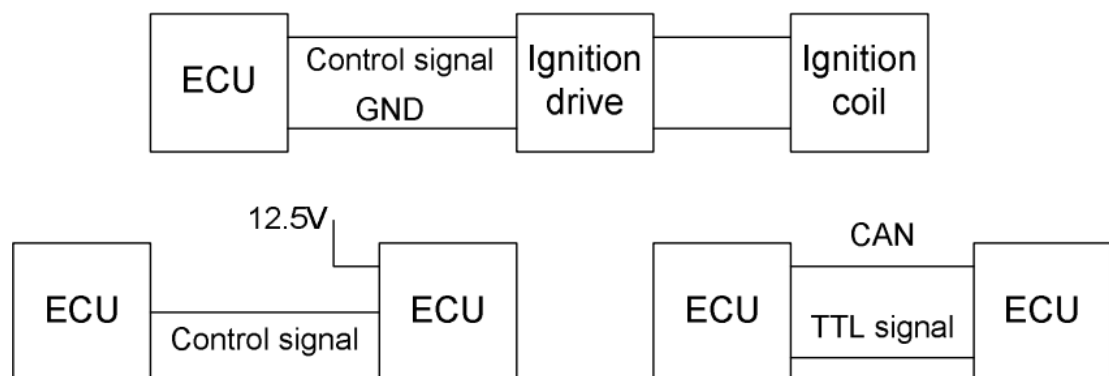


Рисунок 3.6. Сигнали керування від ECU до виконавчих механізмів

### 3.3. Система керування двигуном

Система керування двигуном є ядром усього алгоритму системи керування двигуном. У даній дипломній роботі перераховано кілька важливих модулів, таких як визначення режимів роботи двигуна, контроль холостого ходу, контроль палива, контроль іскри тощо[16].

У цій системі управління робота двигуна визначається п'ятьма робочими режимами. Вони є

- режим зупинки (`engine_status_flag = 01`)
- режим запуску (`engine_status_flag = 02`)
- режим холостого ходу (`engine_status_flag = 03`)
- режим роботи (`engine_status_flag = 04`)
- режим вимкнення (`engine_status_flag = 05`)

`Engine_status_flag` використовується для вказівки поточного стану двигуна. На рисунку 3.7 показаний статус режимів роботи двигуна. Режими роботи двигуна в основному визначаються на основі частоти обертання двигуна та положення дросельної заслінки двигуна. Зауважте, що гістерезис застосовується для всіх порогів прийняття рішень.[17] У графічному інтерфейсі користувача LabVIEW є кнопка вимкнення, яка вимагає обов'язкового вимкнення двигуна шляхом вимкнення всіх команд керування незалежно від поточного стану двигуна. Режим зупинки призначений для підготовки системи двигуна до запуску. Наприклад, клапан холостого ходу ініціалізується в попередньо відкаліброване положення під час цього режиму роботи. Паливо починає подаватись, коли двигун переходить в режим прокручування. У цьому робочому режимі для подолання великого стійкого тертя двигуна використовується багате співвідношення повітря та палива (AFR) щодо температури охолоджуючої рідини. Загалом, режим пуску дуже короткий.

Коли частота обертання двигуна перевищує порогове значення, режим двигуна перемикається в режим холостого ходу. У режимі очікування AFR наростатиме до потрібного рівня, визначеного в таблиці пошуку. Пошукова таблиця AFR також залежить від температури охолоджуючої рідини. Коли

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



температура охолоджуючої рідини перевищує порогове значення або двигун працює достатньо довго, AFR наростає до стехіометричного AFR (14,6), і система починає працювати в режимі керування AFR із замкнутим контуром[18].

У режимі холостого ходу використовуються кілька засобів керування замкнутим контуром, наприклад керування швидкістю холостого ходу та керування AFR. Коли сигнал положення дросельної заслінки (TPS) перевищує певне значення, двигун починає працювати в робочому режимі. У цьому режимі AFR все ще контролюється в режимі замкнутого циклу, тоді як іскра базується на таблиці пошуку як функції швидкості двигуна та навантаження двигуна. Положення клапана холостого ходу зберігається в поточному положенні.

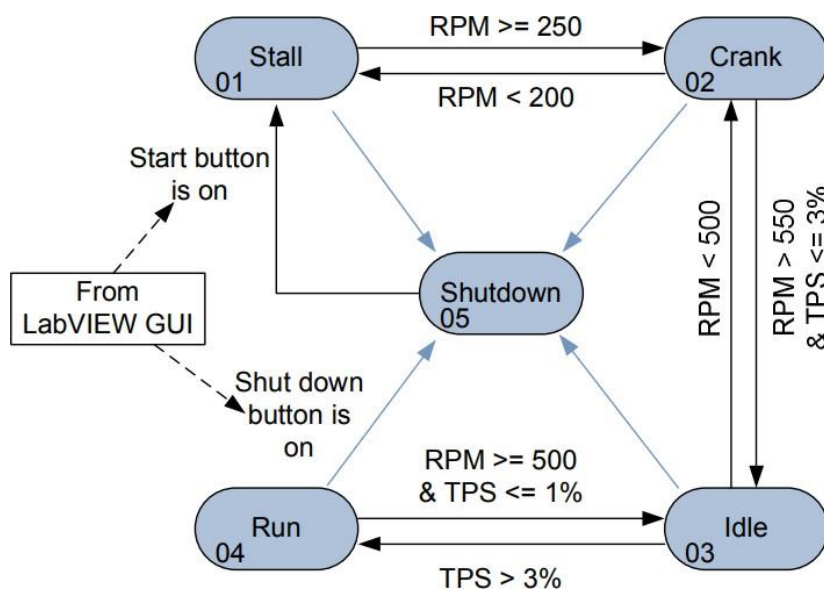


Рисунок 3.7 Схема переходу режимів роботи двигуна

У системі керування двигуном бажаний AFR базується на результатах пошукової таблиці як функції температури охолоджуючої рідини. Обсяг впорскування палива або відповідна ширина імпульсу палива складається з двох частин. Один — базова кількість палива, заснована на бажаному AFR і масовій витраті повітря (MAF), виміряній датчиком MAF, а інший — через корекцію керування замкнутим циклом, яка головним чином базується на сигналі датчика AFR зворотного зв’язку. Загальна кількість палива розраховується як

$$m_f = \frac{m_a}{AFR} + \Delta m_f \quad (3.1)$$

де  $m_a$  - маса всмоктуваного повітря, розрахована за

$$m_a = \frac{m_{MAF}}{\frac{2N}{\tau} * n} \quad (3.2)$$

де  $m_{MAF}$  – масова витрата повітря, виміряна датчиком MAF;  $N$  - частота обертання двигуна;  $n$  – кількість циліндрів;  $\tau$  – кількість ударів.  $\Delta m_f$  – це поправка на паливо замкнутого циклу, вона розраховується за допомогою

$$\Delta m_f = \left( \frac{K_I}{s} + K_P \right) (\varphi - AFR_d) \quad (3.2)$$

де  $K_P$  і  $K_I$  – пропорційний і інтегральний підсилення ПІ-регулятора AFR відповідно;  $\varphi$  – сигнал датчика кисню; і  $AFR_d$  є бажаним AFR. Зауважте, що замкнуте керування співвідношенням повітря та палива вмикається лише тоді, коли  $AFR_d$  дорівнює стехіометричному AFR.[19]

Крім того, у графічному інтерфейсі LabVIEW є можливість увімкнути або вимкнути керування AFR із замкнутим контуром, оскільки іноді користувачі можуть просто захотіти використовувати керування паливом із замкнутим циклом і вручну налаштувати імпульс уприскування палива. На рисунку 3.8 зображено замкнутий контур керування співвідношенням повітря та палива.

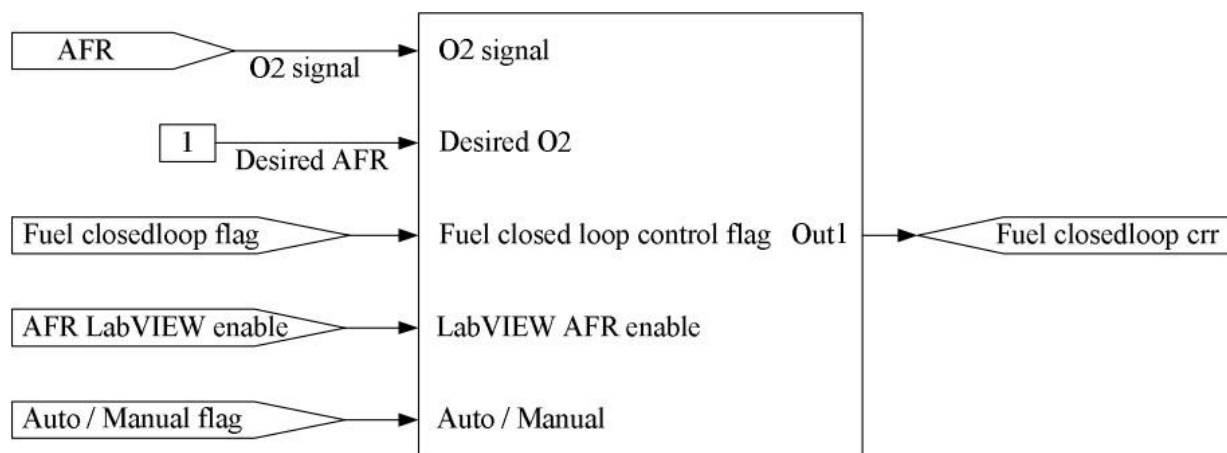


Рисунок 3.8. Регулювання співвідношення повітря і палива по замкнутому контуру

Потім кількість палива перетворюється на ширину імпульсу палива на основі калібрувальної кривої характеристики паливної форсунки. Момент уприскування палива також має два варіанти. Користувачі можуть або вибрати, використовуючи значення таблиці пошуку, або вручну встановити час

впорскування через головний комп'ютер. Крім того, ця система керування забезпечує опцію багаторазового вприскування, включаючи пілотне вприскування, основне впорскування та додаткове вприскування. Кожен із них можна визначити в графічному інтерфейсі LabVIEW.

Управління іскрою в цій системі керування двигуном базується на результатах пошукової таблиці як функції швидкості двигуна та навантаження. У режимах кривошипа та холостого ходу таблиця часу запалювання є функцією температури охолоджуючої рідини. Крім того, пропорційне керування моментом запалювання використовується в режимі холостого ходу для швидкого регулювання крутного моменту двигуна та плавної роботи двигуна на холостому ході. Нарешті, іскровий зсув надається в графічному інтерфейсі користувача LabVIEW, щоб користувачі могли його налаштувати вручну для гнучкості керування.[20]

Бажана швидкість холостого ходу також базується на результатах пошукової таблиці як функції температури охолоджуючої рідини. Подібно до ширини паливного імпульсу та керування іскрою, подібна опція також була надана для користувачів, щоб вручну встановити бажану швидкість холостого ходу в LabVIEW GUI. Як тільки стан двигуна вказує на те, що він знаходиться в режимі холостого ходу, включається замкнуте регулювання обертів холостого ходу. Пропорційно-інтегральний контролер (PI) використовується для регулювання швидкості двигуна, наближеної до бажаної швидкості, шляхом регулювання положення клапана холостого ходу та P (пропорційного) регулятора іскри холостого ходу. На рисунку 3.9 показано повну структуру керування клапаном холостого ходу. Зауважте, що схема планування посилення використовується для ПІ-регулятора холостого клапана.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

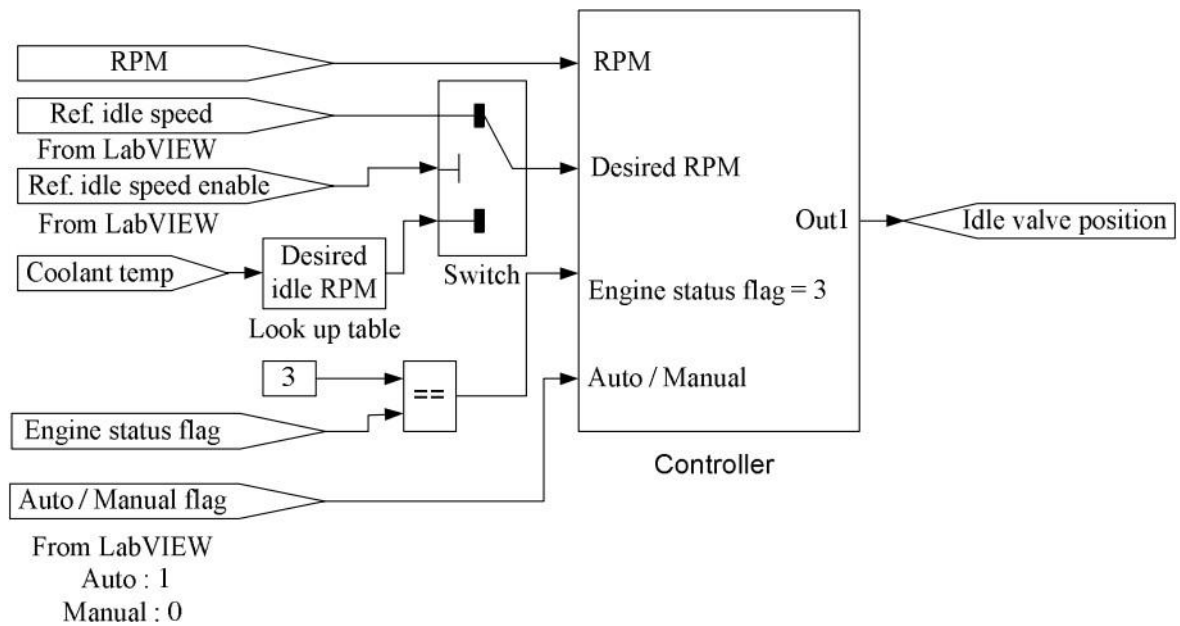


Рисунок 3.9. Контроль холостого ходу

На додаток до вищезгаданих модулів, ця система керування також має функцію захисту від перевищення швидкості. Коли швидкість двигуна перевищує встановлену межу, система керування відключає подачу палива, щоб захистити двигун. Крім того, ця система управління забезпечує ШІМ керуючий сигнал для керування клапаном електричного термостата щодо температури теплоносія. На рисунку 3.10 показано блок-схему керування електричним термостатом. Крім того, в цій системі управління передбачено декілька вихідних сигналів TTL. Вони розроблені спеціально для двигуна розробки систем змінного приводу клапанів (VVA). Ці сигнали TTL використовуються як сигнали синхронізації для відкриття та закриття впускних і випускних клапанів, які приводяться в дію гідравлічною системою керування замість традиційного вала CAM, а сигнали підйому та синхронізації клапана надсилаються через протоколи CAN.[21]

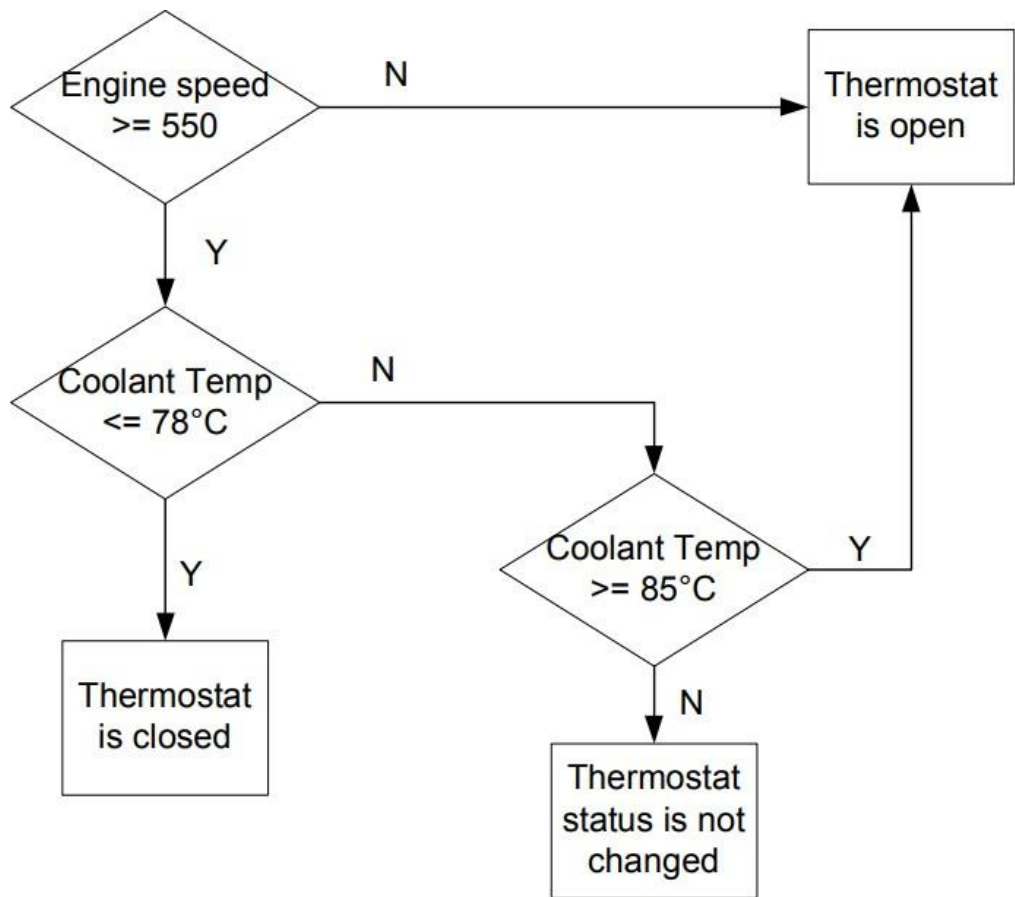


Рисунок 3.10. Блок-схема управління електричним термостатом

### 3.4. Розробка графічного інтерфейсу користувача LabVIEW

Комп'ютер керування хост-системою працює під управлінням NI LabVIEW і створює графічний інтерфейс користувача. Мотивація для використання інтерфейсу LabVIEW GUI полягала в тому, щоб контролювати стан двигуна, відображати сигнали датчиків і значення параметрів керування, але, що найважливіше, надавати команди керування в режимі реального часу та калібрування параметрів для системи керування двигуном. Інтерфейс LabVIEW складається з двох частин, одна сторінка містить усі параметри датчика та деякі важливі команди керування, а також частину калібрувань, тоді як інша сторінка містить список усіх інших калібрувань.[22]

Першою роботою в розробці графічного інтерфейсу користувача було визначення параметрів, які слід відстежувати в графічному інтерфейсі користувача, параметрів, які потрібно калібрувати в режимі реального часу, і формату, який слід відображати. У цій системі керування для відображення

більшості параметрів використовуються як цифрові, так і аналогові формати відображення. Наприклад, положення клапана холостого ходу відображається у відсотках у вигляді цифрового числа та на графіку форми сигналу. Перевагою графіка хвилі є те, що він показує історію зміни сигналу. Головна сторінка моніторингу розробленого графічного інтерфейсу користувача LabVIEW показана на рисунку 3.11.

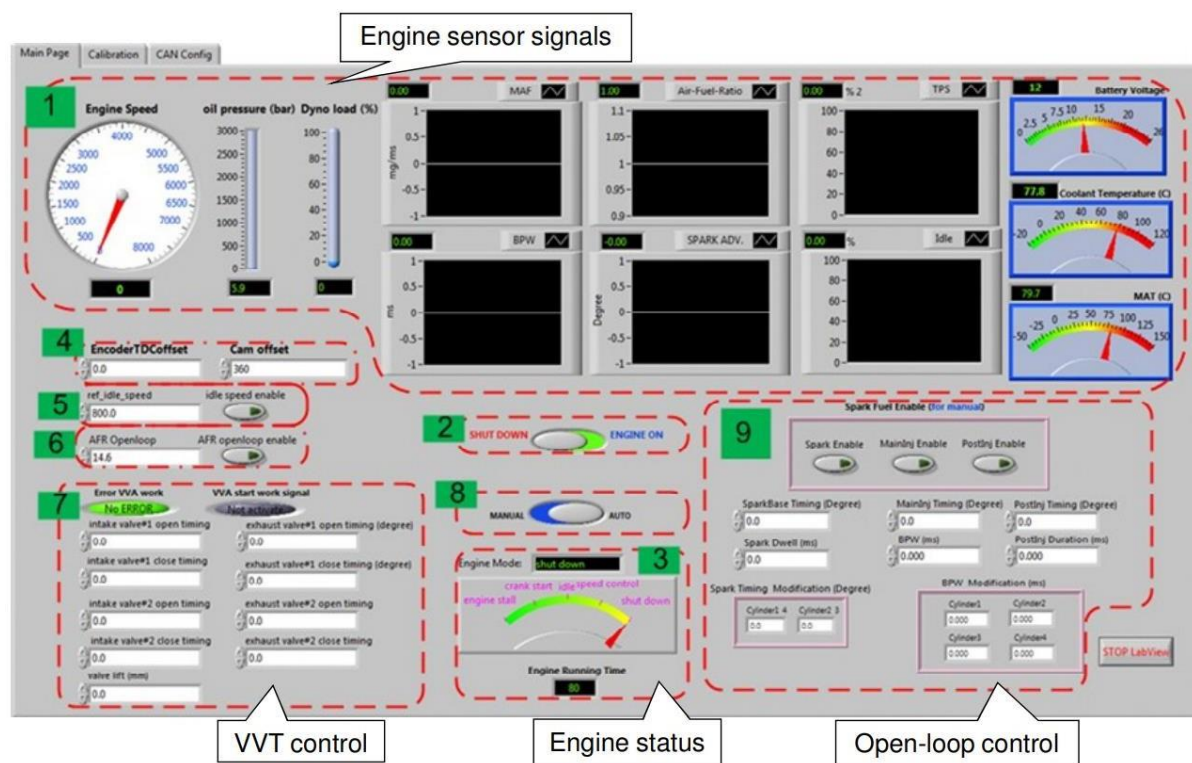


Рисунок 3.11. Головна сторінка LabVIEW GUI

Ця сторінка в основному складається з дев'яти частин відповідно до різних функцій, і кожна частина обведена пунктирною червоною лінією. Перша частина показує всі контрольовані сигнали датчиків, такі як швидкість двигуна, положення дросельної заслінки, масовий потік повітря на впуску, положення клапана холостого ходу тощо. Команди та параметри керування двигуном в основному включені в частини 2-6. Сьома частина спеціально розроблена для проекту розробки приводу регульованого клапана. У цій частині відображаються два сигнали VVA. Чотири набори контролю часу відкриття та закриття двох впускних і двох випускних клапанів, відповідно, були розроблені для забезпечення сигналів керування синхронізацією кривошипа для контролера

VVA. Крім того, цей графічний інтерфейс LabVIEW надає користувачам можливість перемикає керування двигуном у ручний режим, як показано в частині 8. У цьому ручному режимі параметри керування паливом та іскрою можна вручну встановити в частині 9.[23]

На малюнку 3.12 показано сторінку калібрування. Кілька важливих контрольних параметрів можна відкалібрувати в реальному часі на цій сторінці. Наприклад, пропорційне посилення, інтегральне посилення та інтегральну тривалість можна відкалібрувати відповідно для холостого регулюючого клапана, холостої подачі палива та моменту запалювання. Зауважте, що ПІ-регулятори, розроблені в цій системі керування, використовують схеми планування підсилення, а пропорційні підсилення та інтегральні підсилення в цьому графічному інтерфейсі користувача LabVIEW множаться на підсилення на основі таблиці пошуку, попередньо завантажені в контролер MotoTron. Крім того, параметри фільтрації датчика також дуже важливі. Вони показані в частині 2 цього малюнка. Частина 3 цього графіка показує кілька інших важливих параметрів калібрування, таких як початкове положення клапана холостого ходу, крок переходу AFR від AFR кривошипа до AFR холостого ходу, приріст палива, який розглядається як компенсація об'ємної ефективності.

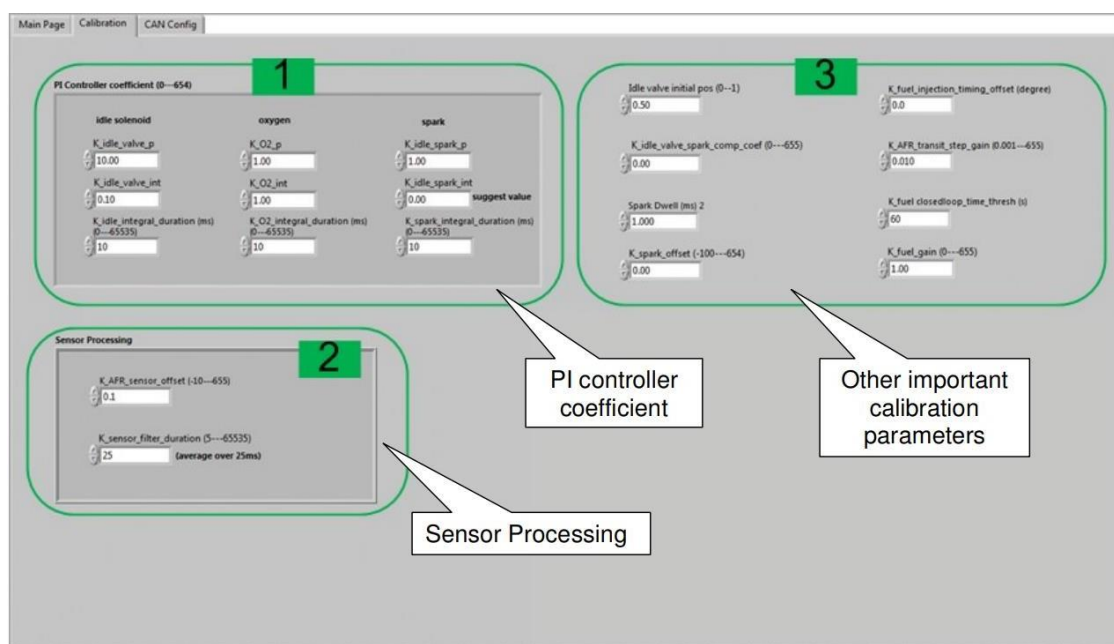


Рисунок 3.12. Сторінка калібрування LabVIEW GUI

### 3.5. Застосування динамометра двигуна та моделювання НІЛ

Використовуючи відповідну орієнтовану на керування модель двигуна, симулятор НІЛ, такий як система моделювання двигуна dSPACE, здатний надавати різні вихідні сигнали двигуна на основі сигналів керування, що надаються контролером двигуна в різних робочих умовах двигуна. Розроблена система керування двигуном була перевірена за допомогою моделювання НІЛ, перш ніж її було реалізовано для випробувань на динамометрі двигуна. Рисунок 3.13 діаграма моделювання НІЛ системи керування двигуном показує діаграму моделювання НІЛ системи керування двигуном. Він складається з головного комп'ютера з графічним інтерфейсом LabVIEW, контролера MotoTron і dSPACE із спрощеною моделлю двигуна. Спрощена модель двигуна, яка працює в dSPACE, надсилає сигнали датчиків до контролера через канали А/Д або зв'язок CAN і отримує параметри керування від контролера MotoTron через CAN-з'єднання.[24]

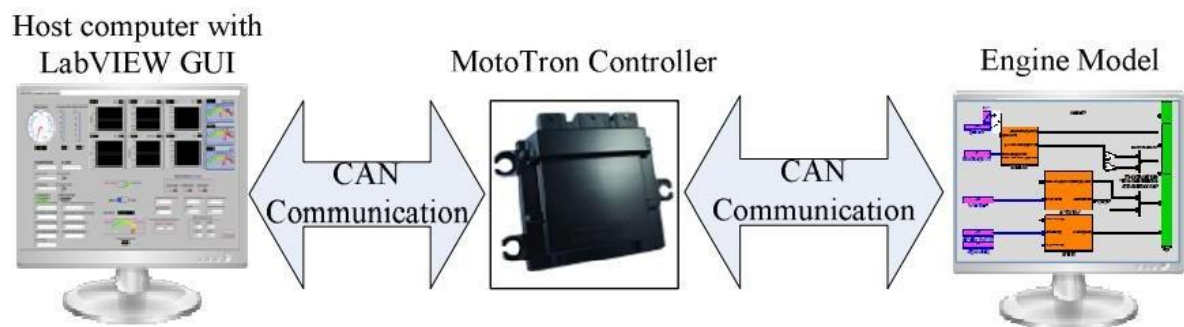


Рисунок 3.13. Імітаційна схема НІЛ системи керування двигуном

На рисунку 3.14 показано блок-схему моделювання НІЛ при запуску двигуна, на рисунку 3.15 – відповідний результат моделювання НІЛ.



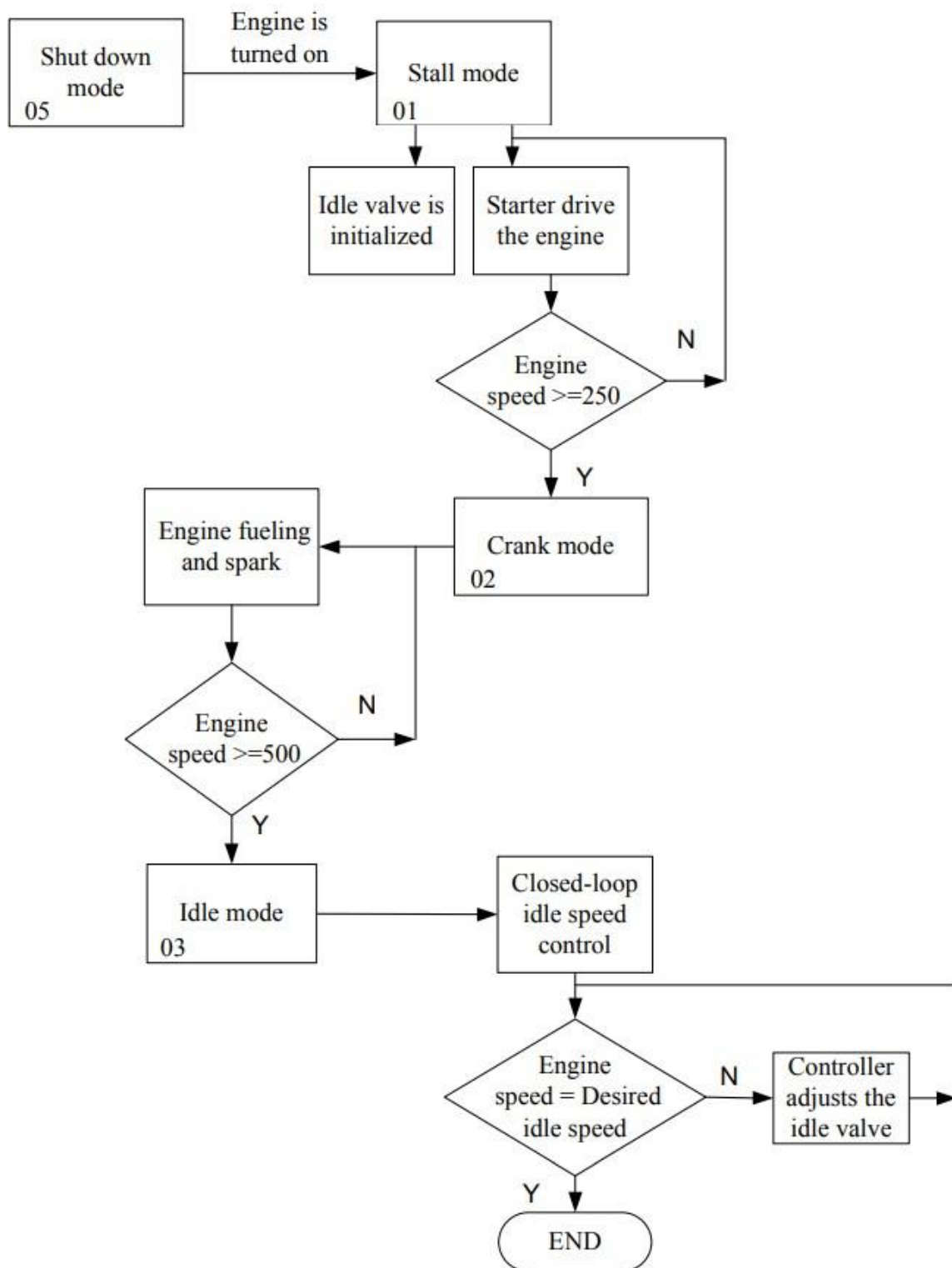


Рисунок 3.14. Блок-схема моделювання запуску двигуна HIL

Початкове положення клапана холостого ходу було встановлено на 35%. Двигун включили на 2-й секунді. Можна помітити, що стан двигуна було негайно переключено з режиму зупинки на режим зупинки. В результаті клапан холостого ходу був ініціалізований у попередньо визначене положення. Коли

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

стартер збільшив частоту обертання двигуна вище відкаліброваного порогу, режим роботи двигуна перейшов у режим 2, режим кривошипа. І паливо, і іскра почали подаватись через 3,5 секунди. Двигун переходив у режим холостого ходу, коли швидкість двигуна перевищувала 500 об/хв. У режимі холостого ходу було включено замкнуте регулювання холостого ходу. Контролер відрегулював клапан холостого ходу, щоб регулювати швидкість двигуна до потрібної швидкості. У цьому випадку бажана швидкість двигуна була встановлена на рівні 800 об/хв. Можна виявити, що фактична швидкість досить добре відстежувала бажану швидкість. Результати моделювання HIL також продемонстрували, що розроблений алгоритм працює належним чином.[25]

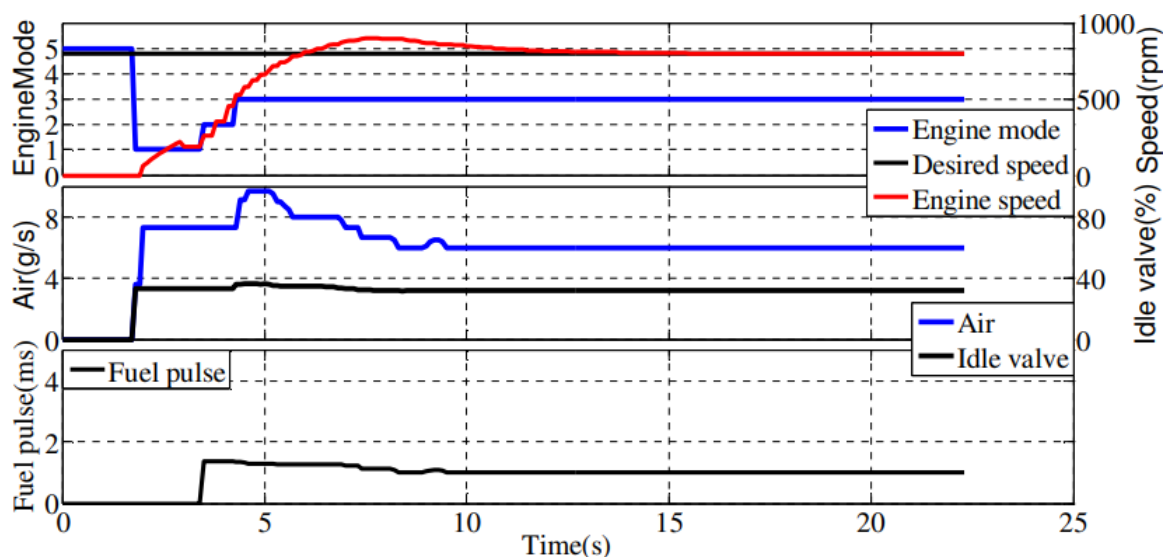


Рисунок 3.15. Результат моделювання HIL запуску двигуна

Ця система керування двигуном була використана для кількох проектів двигунів. Першим проектом був одноциліндровий оптичний дизельний двигун з прямим упорскуванням (DI). Інжектор являє собою п'єзоінжектор Siemens, який використовує сопло з 6 отворами з отворами 0,185 мм і кутом конуса 154 градуси. На рисунку 3.16 показано двигун і налаштування керування динамометром. Для запису даних про згоряння двигуна використовувалася базова CAS (система аналізу згоряння) від AND Technologies. ECU MotoTron було синхронізовано шляхом калібрування зміщення верхньої точки мертвої точки через графічний інтерфейс користувача LabVIEW.

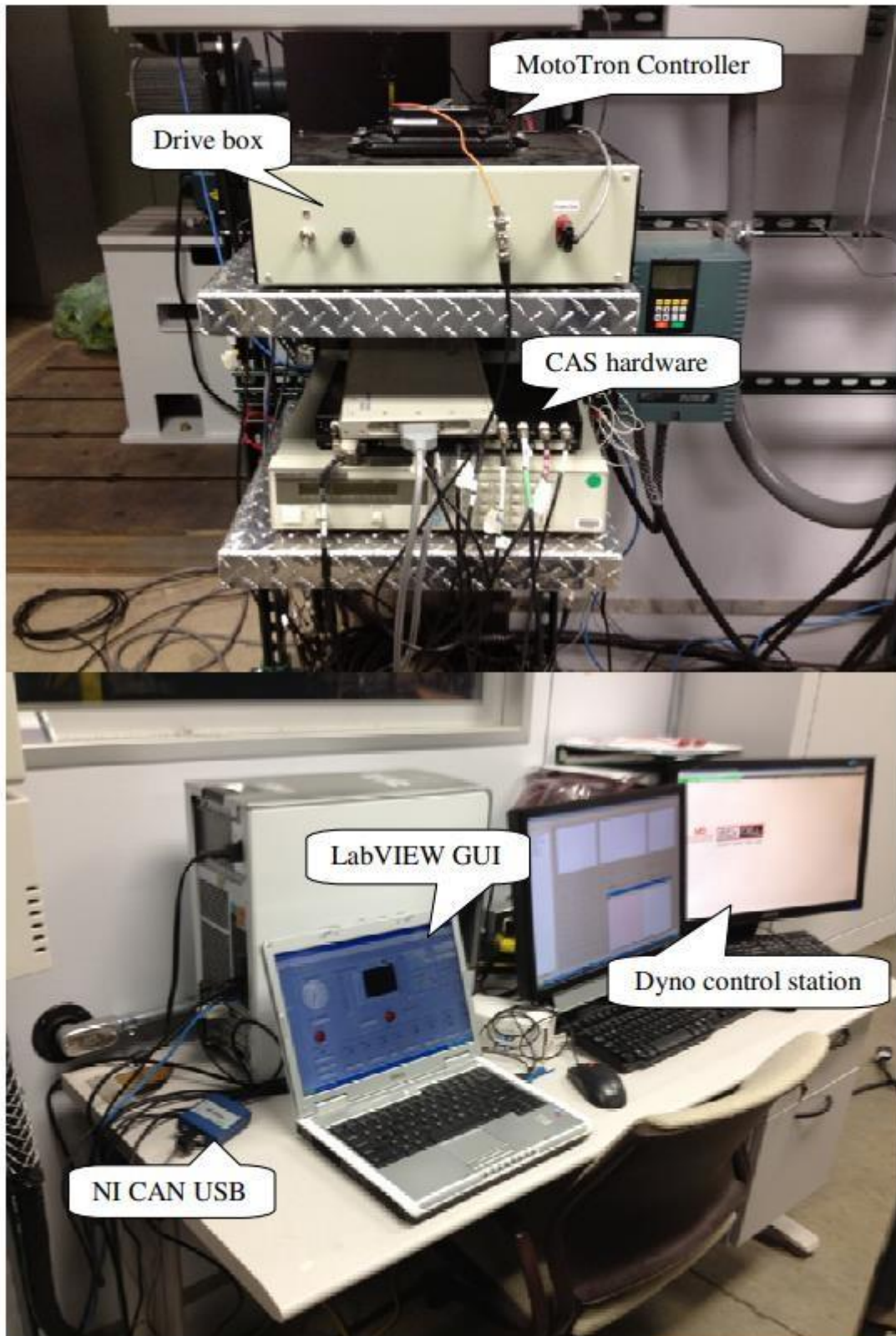


Рисунок 3.16. Налаштування динамометра двигуна

На рисунку 3.17 показана установка для випробування двигуна на динамометрі одноциліндрового оптичного дизеля з використанням розробленої

					123.КІ(м)-21.10	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

системи керування. Двигун запускався кривошипно-шатунним двигуном при різних температурах всмоктуваного повітря. Метою цього тесту є вивчення впливу температури на випаровування дизельного палива, а також на процес згоряння. Система управління працювала в ручному режимі. Паливо планувалося подавати, коли швидкість двигуна перевищувала порогове значення (350 об/хв у цьому дослідженні). Щоб захистити оптичний двигун, логіка, яка встановлює кількість циклів згоряння, була розроблена спеціально для цієї програми. Цикли згоряння були обмежені 30 циклами двигуна. Крім того, спеціально для цього застосування була додана функція контролю тиску в паливній рампі. У графічному інтерфейсі користувача LabVIEW було передбачено два канали управління електромагнітом для регулювання тиску палива в системі загальної рампи до 32 000 фунтів на квадратний дюйм.[26]

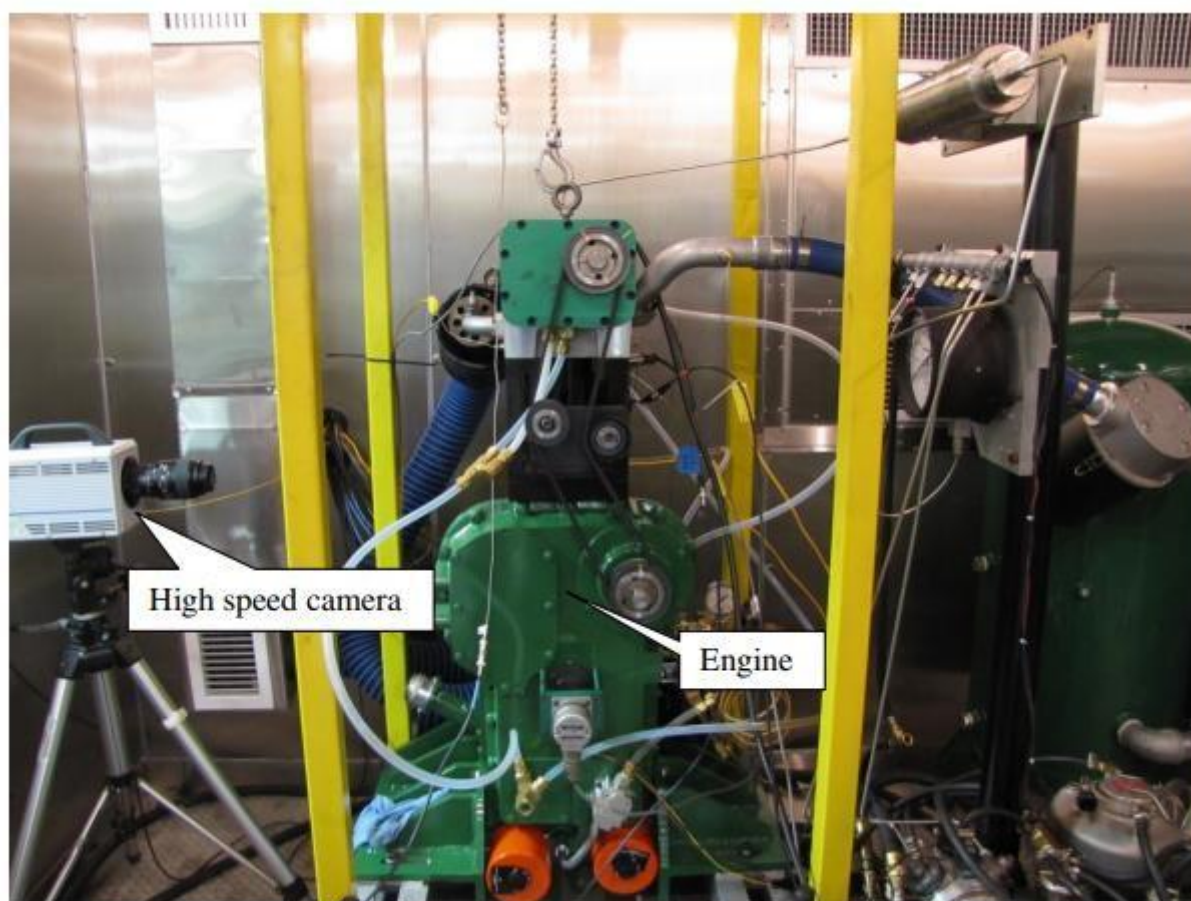


Рисунок 3.17. Оптичний дизельний двигун

На рисунку 3.18 показано випробування холодного запуску з температурою повітря на вході 20°C. У цьому тесті контрольний паливний імпульс тривалістю

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

0,3 мс разом із імпульсом основного впорскування тривалістю 0,5 мс повинні були подаватись за 30 градусів BTDC (перед верхньою мертвою точкою) та 7 градусів BTDC відповідно. На підставі сигналу тиску в циліндрі (InCylPressure) згоряння спостерігалось в першому циклі впорскування палива, але знадобилося два цикли двигуна, щоб отримати гарне згоряння.

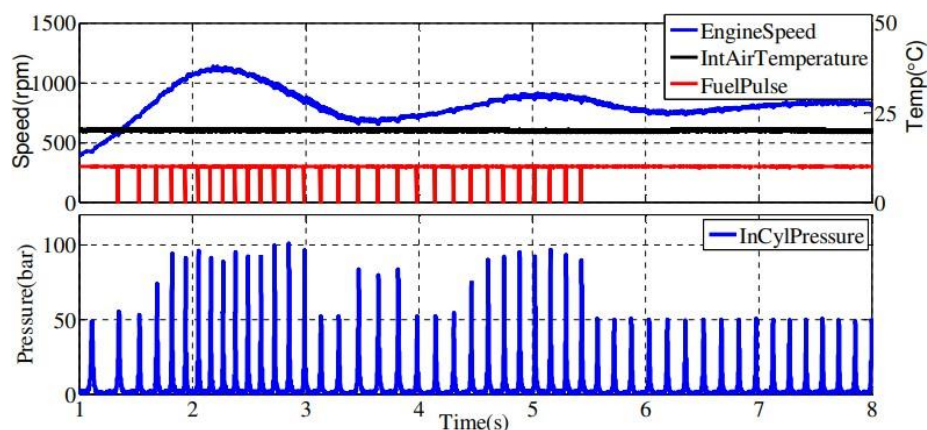


Рисунок 3.18. Оптичний тест холодного запуску дизельного двигуна

На рисунку 3.19 показано високошвидкісне тестування зображення одного циклу згоряння. Зняті зображення були синхронізовані з тиском у циліндрі. Результати чітко показують процес розвитку полум'я горіння. Видиме полум'я почалося при 8 градусах після ВМТ (ATDC), а масивне явне полум'я з'явилося після максимального тиску в циліндрі. Підсумовуючи, цей додаток доводить, що розроблена система керування двигуном добре працює в режимі ручного керування.[27]

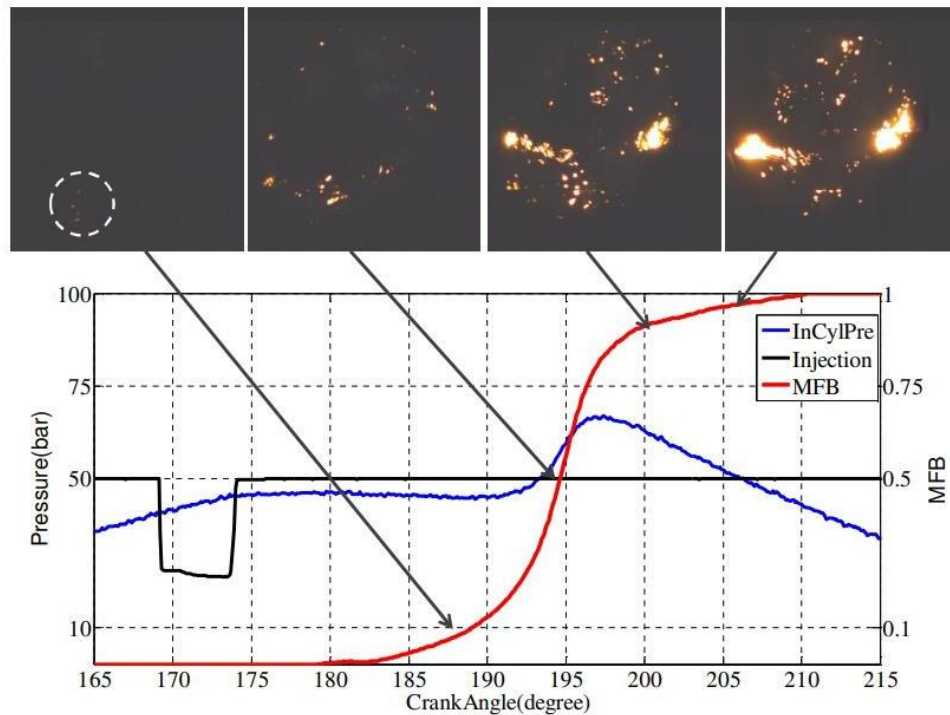


Рисунок 3.19. Зафіксоване зображення полум'я, синхронізоване із сигналом тиску в циліндрі

Крім застосування в оптичному дизельному двигуні, розроблена система керування також використовувалася для 4-циліндрового бензинового двигуна. На рисунку 3.20 показано архітектуру системи керування чотирициліндровим двигуном, де систему впускних клапанів циліндра 4, яка спочатку приводилася в рух САМ-валом, замінили системою гідравлічних клапанів (або системою VVA). Час відкриття та закриття та підйом двох клапанів VVA можна контролювати індивідуально. Цей двигун також перевіряли на динамометрі двигуна. Цей динамометр можна використовувати тільки як опорний вантаж.

Користувачеві необхідно запуснути двигун і запуснути двигун як на холостому, так і на робочому режимі за допомогою розробленої системи керування двигуном.

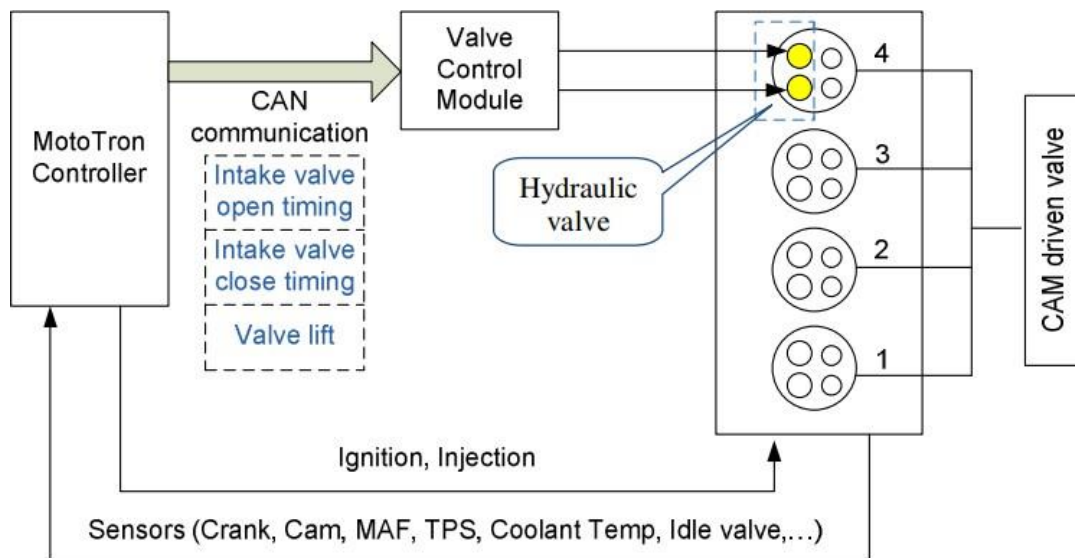


Рисунок 3.20. Принципова схема системи керування двигуном

На рисунку 3.21 показані результати випробувань двигуна VVA, керованого розробленою системою керування двигуном. Двигун працював на 1500 об/хв. Для цієї системи VVA було перевірено два різні навантаження двигуна: середній ефективний тиск гальмування (BMEP) 2,2 бар і BMEP 5 бар. За профілями клапанів можна виявити, що система VVA працювала добре, очікуйте, що під час закриття впускних клапанів було виявлено невеликий сплеск. Це може бути викликано гідравлічною динамікою. Але можна сміливо зробити висновок, що розроблена система керування двигуном задовольняє вимогам даної програми.

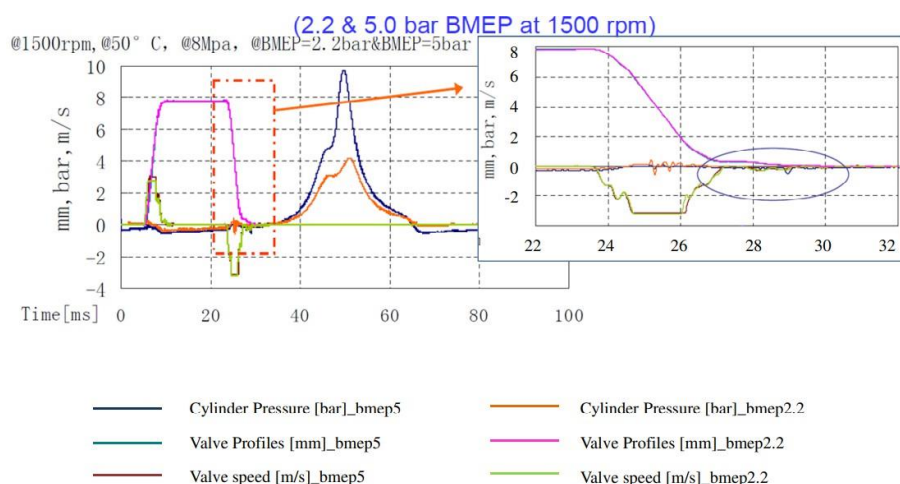


Рисунок 3.21. Результат тестування системи VVA

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ СИСТЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ

### 4.1. Перевірка симуляції контролю тиску палива в системі Common Rail

У цьому дослідженні було розроблено три симуляції для оцінки продуктивності. Перша симуляція — це порівняння продуктивності відстеження трьох контролерів; другий – оцінити ефективність усунення завад; і третій – оцінити толерантність до невизначеності системи.

На рисунку 4.1. показана ступінчаста характеристика трьох контролерів. Помічено, що  $H_2$  знадобилося приблизно 5 мс, щоб зблизитися з еталонним значенням. У той час як ПІ-регулятору та  $H_\infty$ -контролеру знадобилося близько 12 мс для зближення. Крім того, ПІ-регулятор мав найбільше перерегулювання та використовував більше зусиль керування, ніж інші два контролери. Контролер  $H_\infty$  і контролер  $H_2$  мали близьке зусилля керування, але пікове значення керуючого входу для контролера  $H_2$  нижче, ніж для контролера  $H_\infty$ . Це важливо для фізичних систем, які мають багато вхідних обмежень.

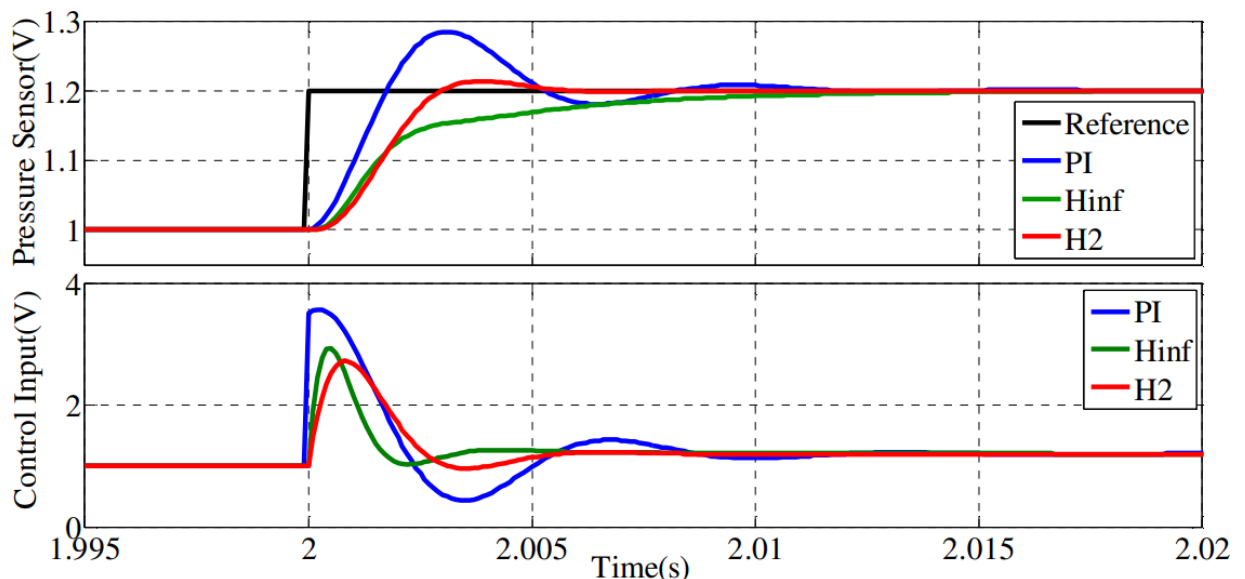


Рисунок 4.1. Порівняння реакції трьох контролерів

На рисунку 4.2 показана реакція трьох різних контролерів на імпульсну перешкоду. Можна помітити, що контролер  $H_2$  отримав найкращу продуктивність на виході, використовуючи найменше зусилля для керування.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56



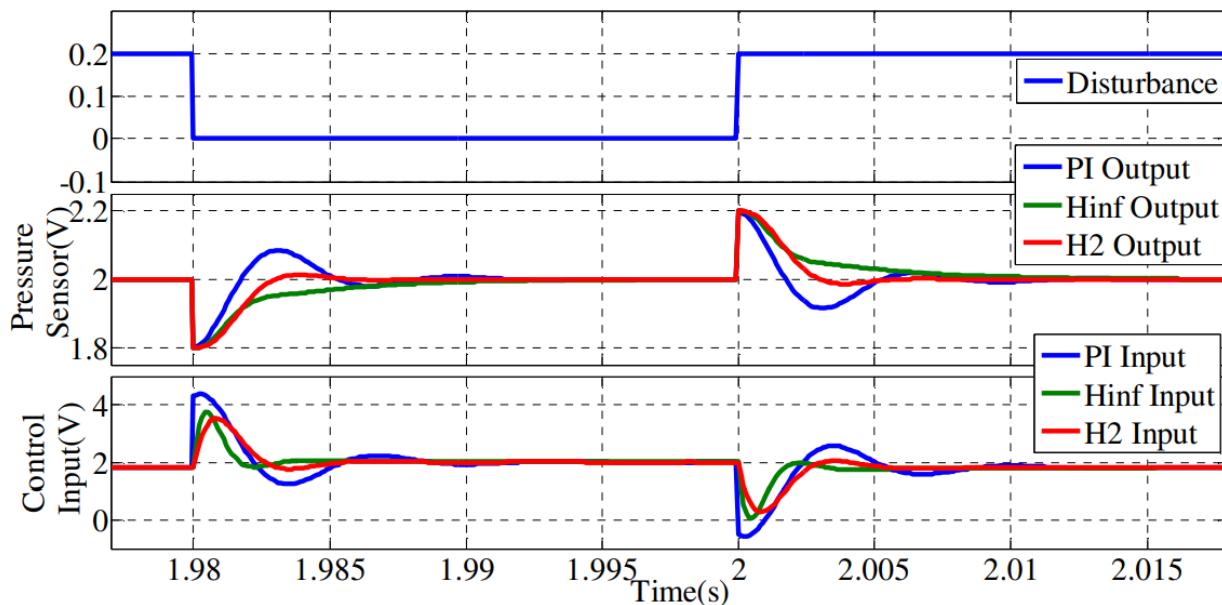


Рисунок 4.2. Порівняння продуктивності трьох контролерів зі ступінчастим порушенням

Ефективність трьох контролерів, що реагують на невизначеність палива, показана на рисунку 4.3. У цьому моделюванні ступінчастий вхід був введений в установку як невизначеність системи. Результати моделювання показують, що контролер  $H_2$  і  $H_\infty$  має близьку стійкість до перешкод. Але контролер  $H_2$  конвергував швидше з меншим входом керування, ніж контролер  $H_\infty$ . PI-регулятор мав найгіршу толерантність до невизначеності з найбільшою кількістю запитів на контрольний вхід.[28]

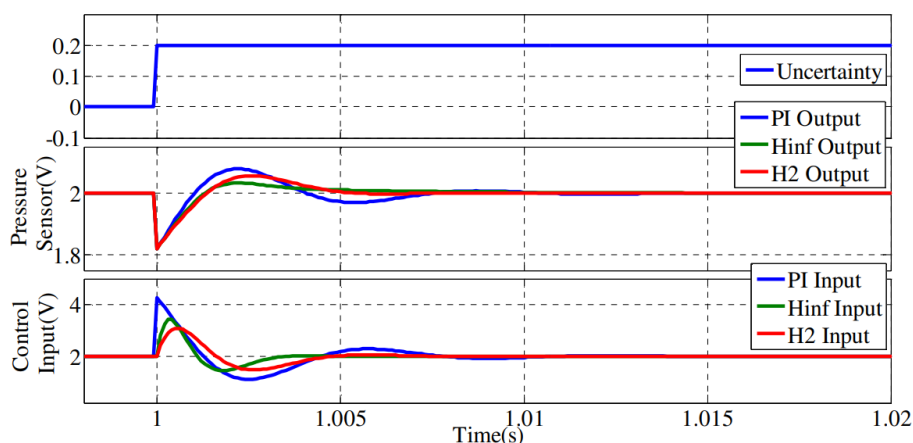


Рисунок 4.3. Порівняння продуктивності трьох контролерів відреагувало на невизначеність палива

На основі наведених вище результатів можна зробити висновок, що надійний контролер  $H_2$  вимагав менше вхідних зусиль для керування, забезпечуючи при цьому кращі вихідні характеристики порівняно з контролером PI та контролером  $H_\infty$ . У майбутньому модель, орієнтована на контроль, розроблена в цьому дослідженні, буде відкалібрована за допомогою експериментальних даних. Потім запропоновані контролери будуть оптимізовані та оцінені за допомогою експериментів.

#### 4.2. Майбутні рекомендації

У цій дипломній роботі розроблена система керування двигуном була спеціально розроблена для кількох дослідницьких проектів двигунів. Її можна додатково вдосконалити, додавши детальну логіку керування. Крім того, графічний інтерфейс LabVIEW також можна значно покращити, додавши відображення сигналів і вхідні команди керування.

З точки зору запропонованих надійних контролерів, важливо використовувати експериментальні дані для калібрування моделі, орієнтованої на керування. Крім того, необхідно оптимізувати вагові матриці для надійної конструкції контролера. Нарешті, пропонується оцінити запропоновані контролери за допомогою випробувань на динамометрі двигуна.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У цій дипломній роботі розроблено прототип системи керування двигуном. Система управління розроблена на базі контролера MotoTron. Інтерфейс управління людиною також був розроблений з використанням LabVIEW GUI. Контролер MotoTron і головний комп'ютер спілкувалися через CAN-з'єднання. Розроблена система керування двигуном була перевірена моделюванням апаратного забезпечення в циклі (HIL) і використана для кількох дослідницьких проектів двигунів з різними застосуваннями, включаючи одно- та багатоциліндрові двигуни. Результати показують, що розроблена система керування двигуном змогла задовольнити різноманітні вимоги різних проектів.

У даній роботі розглянуто теоретичні основи дизельних двигунів системи Common Rail, проведено огляд літературних джерел та описано еволюцію системи Common Rail у сучасних автомобілях, її особливості, переваги та основні принципи роботи. Оброблено існуючі підходи до керування дизельними двигунами, зокрема структура комп'ютерної системи керування двигуном та її основні компоненти, такі як моделювання паливної системи, дискретна математична модель паливної рампи та LFT-моделі системи з дискретним часом.

Також розроблено конструкцію контролера для керування паливним тиском у системі та CAN-зв'язок для інтеграції контролера з іншими компонентами автомобіля. З метою підвищення зручності користувачів було створено графічний інтерфейс в середовищі LabVIEW, що забезпечує взаємодію з системою у реальному часі. Виконано аналіз роботи комп'ютерної системи керування двигуном на прикладі дизельного двигуна Opel Antara, де описано характеристику двигуна, модель системи керування, а також проведено HIL-моделювання з використанням динамометра для тестування системи.

На завершення перевірено симуляцію контролю тиску палива в системі Common Rail та запропоновано рекомендації щодо вдосконалення системи, що вказують на перспективи подальшого розвитку та оптимізації роботи дизельних двигунів у майбутньому.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, для регулювання тиску палива в паливній системі Common Rail було розроблено два надійних контролери,  $H_2$  і  $H_\infty$ . Контролер PI також був розроблений як базовий контролер для порівняння. Для оцінки продуктивності запропонованих контролерів було проведено три моделювання: відстеження продуктивності, усунення перешкод уприскування палива та невизначеність палива. Результати моделювання показують, що ці три контролери мали близьку вихідну продуктивність завдяки оптимізації підсилення або ваги керування, але контролер  $H_2$  потребує орендованого вхідного зусилля порівняно з іншими контролерами.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. D. D. Parrish, "Critical Evaluation of US on-road Vehicle Emission Inventories,"
2. Atmospheric Environment, Vol. 40 (2006) 2288-2300.
3. W. Harrington, "Fuel Economy and Motor Vehicle Emissions," Journal of Environmental Economics and Management, Vol. 33, 240-52 (1997).
4. R. W. Crandall and J. D. Graham, "The Effect of Fuel Economy Standards on Automobile Safety," Journal of Law & Economics, Vol. XXXII (April 1989).
5. J. H. Boyd and R. E. Mellman, "The Effect of Fuel Economy Standards on the U.S. Automotive Market: An Hedonic Demand Analysis," Transportation Research, Vol.14A. pp. 367-378.
6. P. Bastani, J. B. Heywood, and C. Hope, "US CAFE STANDARDS," (2012).
7. J. Luo, K. R. Pattipati, L. Qiao, and S. Chigusa, "An integrated diagnostic development process for automotive engine control systems," Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on 37, no. 6 (2007): 1163-1173.
8. N. Quijano, and K. Passino, "A Tutorial Introduction to Control Systems Development and Implementation with dSPACE," Santhosh Jogi dSPACE Inc. (2002).
9. Monti, S. D'Arco, A. Deshmukh, Y. Work, and A. Lentini, "From simulation to hardware testing: A low-cost platform for Power-Hardware-in-the-Loop experiments," Schindler Electronics Ltd, 6600 Locarno (CH), (2007).
10. Transportation Research Board Special report 308, "The Safety Promise and Challenge of Automotive Electronics," Transportation Research Board, 2012.
11. R. Suhre, "Mototron Engine Control and Calibration Basics Rev.10," Mototron Corporation. September, 9, 2006.
12. MotoTron Corp., web site, [www.mototron.com](http://www.mototron.com).
13. MotoHawk web site, [www.motohawk.info](http://www.motohawk.info).
14. Tom Boynton, "General Motors Computerized Vehicle Control System: A Short History", CET249, 2006.

					123.KI(M)-21.10	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

15. G. Leen, and D. Heffernan, "Expanding automotive electronic systems," Computer 35, no. 1 (2002): 88-93.
16. Ursu, R. Bhat, and R. Damodaran, "Simulink Modeling for Vehicle Simulator Design 2011-01-0746," (2011).
17. Salzmann, D. Gillet, and P. Huguenin, "Introduction to real-time control using LabVIEW<sup>TM</sup> with an application to distance learning," Int. J. Engng Ed 16, no. 5 (2000): 372-384.
18. G. Stumpp, and M. Ricco, "Common rail: an attractive fuel injection system for passenger car DI diesel engines," SAE paper 960870 (1996).
19. N. Guerrassi, and P. Dupraz, "A common rail injection system for high speed direct injection diesel engines," SAE technical paper 980803 (1998).
20. M. Badami, and P. Nuccio, "Influence of injection pressure on the performance of a DI diesel engine with a common rail fuel injection system," SAE technical paper 1999-01-0193.
21. Hk. Suh, HG. Rho, and CS. Lee, "Spray and combustion characteristics of biodiesel fuel in a direct injection common-rail diesel engine," ASME/IEEE 2007 Joint Rail Conference and Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference (JRC/ICE2007) March 13–16, 2007 , Pueblo, Colorado, USA.
22. G. Stumpp, M. Ricco, "Common rail—an attractive fuel injection system for passenger car DI diesel engine," SAE Technical Paper 960870, 1996.
23. A. Nehmer, and R. D. Reitz, "Measurement of the effect of injection rate and split injections on diesel engine soot and NO<sub>x</sub> emissions," SAE paper 940668 (1994).
24. Y. Takeda, N. Ishikawa, M. Komori, and K. Tsujimura, "Diesel Combustion Improvement and Emissions Reduction Using VCO Nozzles with High Pressure Fuel Injection," SAE Technical Paper 940899 (1994).
25. L. Zhang, "A study of pilot injection in a DI diesel engine," SAE paper (1999): 01-3493.

					123.KI(M)-21.10	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

- 26.P. Lino, B. Maione, and A Rizzo, “Nonlinear modeling and control on a common rail injection system for diesel engines,” Applied Mathematical Modelling, Vol. 31, 1959, pp. 1770-1784.
- 27.R. Morselli, E. Corti, and G. Rizzoni, “Energy based model of a common rail injector,” Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Control App, Glasgow, Scotland, September 2002, pp. 1195-1200.
- 28.M. Coppo, and C. Dongiovanni, “Experimental validation of a common-rail injector model in the whole operation field,” Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 129, 2007, pp. 596-608.

					123.KI(M)-21.10	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

## 1. Модель паливної системи Common Rail з контролером PID

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint
from scipy import signal

# Параметри системи
fuel_pressure_target = 1800 # Бажаний тиск палива в бар
initial_pressure = 0 # Початковий тиск палива в системі

# PID контролер параметри
Kp = 0.5 # Пропорційний коефіцієнт
Ki = 0.1 # Інтегральний коефіцієнт
Kd = 0.01 # Диференційний коефіцієнт

# Дискретизація системи
sample_time = 0.1 # час вибірки
simulation_time = 20 # загальний час симуляції
time_points = np.arange(0, simulation_time, sample_time)

# Початкові значення для контролера
integral = 0
previous_error = 0

# Функція для моделювання паливної рампи
def fuel_ramp_model(pressure, t, control_input):
    pressure_rate = -0.1 * pressure + control_input # модель спрощена для прикладу
    return pressure_rate
```

					123.КІ(М)-21.10	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



```

# PID контролер
def pid_control(error, dt):
    global integral, previous_error
    integral += error * dt
    derivative = (error - previous_error) / dt
    control_output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative
    previous_error = error
    return control_output

# Моделювання роботи системи
pressure = initial_pressure
pressure_history = []
for t in time_points:
    error = fuel_pressure_target - pressure
    control_input = pid_control(error, sample_time)
    pressure = odeint(fuel_ramp_model, pressure, [0, sample_time],
args=(control_input,))[-1]
    pressure_history.append(pressure)

# Візуалізація результатів
plt.figure()
plt.plot(time_points, pressure_history, label="Тиск палива в системі")
plt.axhline(fuel_pressure_target, color='r', linestyle='--', label="Цільовий тиск")
plt.xlabel("Час (с)")
plt.ylabel("Тиск (бар)")
plt.legend()
plt.title("Симуляція контролю тиску палива у системі Common Rail")
plt.show()

```

2. Простий графічний інтерфейс для керування параметрами (на основі Tkinter)

					123.КІ(М)-21.10	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для створення графічного інтерфейсу в LabVIEW можна використати LabVIEW для реального часу, однак тут подається спрощений приклад на Python з використанням Tkinter.

```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk

# Функція для запуску симуляції
def run_simulation():
    global Kp, Ki, Kd, fuel_pressure_target
    try:
        Kp = float(entry_kp.get())
        Ki = float(entry_ki.get())
        Kd = float(entry_kd.get())
        fuel_pressure_target = float(entry_target_pressure.get())
        label_result.config(text="Симуляція завершена, результати оновлено.")
    except ValueError:
        label_result.config(text="Помилка: Введіть числові значення.")

# Ініціалізація GUI
window = tk.Tk()
window.title("Система контролю тиску палива")

# Поля введення для параметрів контролера
tk.Label(window, text="Цільовий тиск палива (бар)").grid(row=0, column=0)
entry_target_pressure = tk.Entry(window)
entry_target_pressure.grid(row=0, column=1)

tk.Label(window, text="Kp").grid(row=1, column=0)
entry_kp = tk.Entry(window)
entry_kp.grid(row=1, column=1)
```

					123.KI(м)-21.10	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

```

tk.Label(window, text="Ki").grid(row=2, column=0)
entry_ki = tk.Entry(window)
entry_ki.grid(row=2, column=1)

tk.Label(window, text="Kd").grid(row=3, column=0)
entry_kd = tk.Entry(window)
entry_kd.grid(row=3, column=1)

# Кнопка запуску симуляції
button_run = ttk.Button(window, text="Запустити симуляцію",
command=run_simulation)
button_run.grid(row=4, column=0, columnspan=2)

# Виведення результату
label_result = tk.Label(window, text="")
label_result.grid(row=5, column=0, columnspan=2)

# Запуск графічного інтерфейсу
window.mainloop()

```

Опис роботи коду

1. **Розділ "Модель паливної системи"** створює базову математичну модель паливної рампи і включає PID-контролер для регулювання тиску палива.
2. **Графічний інтерфейс користувача (GUI)** дозволяє користувачам змінювати параметри контролера та цільовий тиск, натискаючи кнопку для запуску симуляції.

Такий код може використовуватись як прототип для відлагодження та тестування контролера тиску Common Rail у дизельному двигуні.

					123.KI(м)-21.10	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		