

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності
174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

тема роботи:

«Моделювання та дослідження замкненої системи електронного керування чотирициліндровим двигуном внутрішнього згорання»

Виконав студент гр. АКІТ-23ск	_____	Пустільнік Є. В.
Керівник	_____	Курганов І. Д.
Нормоконтроль	_____	Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____	Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 28 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТР-23ск Пустільніку Євгену Вікторовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Моделювання замкненої системи
електронного керування чотирициліндровим двигуном внутрішнього згорання»

затверджено наказом по університету № 172с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 105с.,
презентація у Microsoft PowerPoint (13 слайдів) в електронному та
друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Курганов І. Д.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>01.03.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>05.06.25</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026р.

Керівник _____ / Курганов І. Д./

7. **Запевнення:** Я, Пустільнік Євген Вікторович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Пустільнік Є. В./

АНОТАЦІЯ

Пустільник Є. В. Моделювання замкненої системи електронного керування чотирициліндровим двигуном внутрішнього згоряння: кваліфікаційна робота бакалавра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 105 с.

Об'єктом дослідження є система електронного впорскування палива бензинового двигуна внутрішнього згоряння, а предметом дослідження - математичні моделі та алгоритми автоматичного керування процесами паливоподачі й сумішоутворення.

Метою роботи є розробка математичної моделі замкненої системи електронного керування двигуном та створення віртуальної лабораторії для дослідження режимів його роботи засобами MATLAB/Simulink.

У першому розділі виконано аналіз сучасних систем електронного впорскування палива, принципів функціонування електронних блоків керування, датчиків та виконавчих механізмів. Розглянуто особливості побудови замкнених систем керування складом паливоповітряної суміші та підходи до математичного моделювання двигунів внутрішнього згоряння.

У другому розділі розроблено математичну модель системи електронного впорскування палива у середовищі MATLAB/Simulink. Реалізовано моделі двигуна, електронного блока керування, датчика кисню та замкненого контуру регулювання на базі PI-регулятора. Створено віртуальну лабораторію для аналізу характеристик двигуна в різних режимах роботи.

ЕЛЕКТРОННЕ ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА, ДВИГУН
ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ, ЕЛЕКТРОННИЙ БЛОК КЕРУВАННЯ,
MATLAB, SIMULINK, PI-РЕГУЛЯТОР, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ,

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Пустільник Є. В.			АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Курганов І.Д.							3	1	
Н. Контр.		Маринич І.А.			КНУ АКІТР-23ск						
Затверд.		Маринич І.А.									

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОННОГО КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ	
ВНІТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ТА МЕТОДІВ ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ.....	9
1.1 Принцип роботи бензинових двигунів внутрішнього згоряння	9
1.2 Системи електронного керування двигунами.....	11
1.3 Датчики та виконавчі механізми систем EFI	14
1.4 Методи математичного моделювання двигунів внутрішнього згоряння	16
1.5 Аналіз програмних засобів моделювання	20
1.6 Постановка задачі дослідження.....	24
Висновки до розділу:	25
РОЗДІЛ 2	
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАМКНЕНОЇ СИСТЕМИ	27
ЕЛЕКТРОННОГО КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ	27
2.1 Розробка структури замкненої системи керування	27
2.2 Розробка математичної моделі двигуна.....	31
2.3 Розробка алгоритму електронного керування	35
2.4 Реалізація моделі у середовищі Simulink	41
2.4.1 Загальна структура Simulink-моделі.....	41
2.4.2 Реалізація функціональних модулів	47
2.4.3 Налаштування моделювання	58
2.5 Розробка віртуального стенду дослідження режимів роботи двигуна.	62

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗМІСТ		
Розроб.		Пустільнік С.В.					
Перевір.		Курганов І.Д.					
Н. Контр.		Маринич І.А.					
Затвердив		Маринич І.А.			КНУ АКІТР-23ск		

2.5.1	Архітектура віртуальної лабораторії.....	62
2.5.3	Методика проведення комп'ютерного експерименту.....	69
	<i>Висновки до розділу:</i>	73
	ВИСНОВКИ.....	75
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	77
	ДОДАТОК А Програмна реалізація віртуальної лабораторії	81
	ДОДАТОК Б Структура та склад моделі Simulink	97
	ДОДАТОК В Результати комп'ютерних експериментів	100

ВСТУП

Сучасний розвиток автомобільної промисловості характеризується широким впровадженням електронних систем керування двигунами внутрішнього згоряння, що забезпечують підвищення паливної економічності, екологічності та стабільності роботи силових установок. Використання електронного упорскування палива та систем автоматичного керування процесами сумішоутворення дозволяє забезпечити оптимальні режими роботи двигуна за різних умов навантаження та експлуатації. Особливої актуальності набуває застосування математичного та імітаційного моделювання, що дає можливість проводити дослідження характеристик двигуна без необхідності створення дорогих експериментальних стендів.

У сучасних системах електронного керування двигунами використовуються складні алгоритми регулювання складу паливо-повітряної суміші, кута випередження запалювання та стабілізації частоти обертання колінчастого вала. Ефективність таких систем значною мірою залежить від точності математичних моделей, які повинні адекватно описувати динамічні процеси впуску повітря, подачі палива, процесу згоряння та формування крутного моменту. У зв'язку з цим актуальним є дослідження замкнених систем електронного керування двигунами внутрішнього згоряння із застосуванням сучасних програмних засобів моделювання.

Для аналізу динамічних процесів і синтезу алгоритмів керування доцільним є використання середовищ MATLAB та Simulink, які дозволяють реалізувати математичні моделі складних технічних систем, дослідити їх характеристики та оцінити якість роботи систем автоматичного керування.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Пустільнік Є.В.			ВСТУП			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Курганов І.Д.								6	2
								КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

Метою роботи є розробка математичної моделі та дослідження замкненої системи електронного керування чотирициліндровим двигуном внутрішнього згоряння із застосуванням засобів комп'ютерного моделювання для аналізу динамічних характеристик, процесів сумішоутворення та стабілізації режимів роботи двигуна.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз сучасних систем електронного керування двигунами внутрішнього згоряння;
- виконати аналіз методів математичного моделювання ДВЗ;
- розробити математичну модель чотирициліндрового бензинового двигуна;
- розробити структуру замкненої системи електронного керування;
- реалізувати імітаційну модель у середовищі Simulink;
- провести дослідження перехідних процесів системи при зміні режимів роботи двигуна;
- виконати аналіз ефективності запропонованої системи керування.

Об'єктом дослідження є процеси електронного керування чотирициліндровим двигуном внутрішнього згоряння в умовах зміни режимів роботи та навантаження.

Предметом дослідження є математичні моделі, алгоритми та замкнені системи автоматичного керування процесами упорскування палива, сумішоутворення і стабілізації режимів роботи бензинового двигуна внутрішнього згоряння.

У роботі використано методи теорії автоматичного керування, математичного та імітаційного моделювання динамічних систем, чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь, методи аналізу стійкості та якості перехідних процесів, а також програмні засоби MATLAB і Simulink.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОННОГО КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ВНІТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ТА МЕТОДІВ ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ

1.1 Принцип роботи бензинових двигунів внутрішнього згоряння

Двигун внутрішнього згоряння є складною енергетичною системою, у якій хімічна енергія палива перетворюється на механічну роботу. Бензинові двигуни набули широкого поширення в автомобільному транспорті завдяки порівняно високій питомій потужності, компактності, надійності та можливості реалізації гнучких систем керування процесами сумішоутворення і запалювання [1].

Принцип роботи чотиритактного бензинового двигуна базується на послідовному виконанні тактів впуску, стискання, робочого ходу та випуску. Під час такту впуску у циліндр через дросельну заслінку та впускний колектор надходить паливо-повітряна суміш або повітря, залежно від типу системи упорскування. На такті стискання відбувається підвищення тиску і температури робочої суміші. Наприкінці такту стискання електронна система запалювання формує іскровий розряд, який ініціює процес горіння. У результаті швидкого згоряння паливо-повітряної суміші утворюються гази високого тиску, що переміщують поршень та створюють корисний крутний момент на колінчастому валу. Після завершення робочого ходу продукти згоряння виводяться через випускную систему [2].

Ефективність роботи двигуна значною мірою залежить від точності дозування палива та моменту подачі іскри. У сучасних бензинових двигунах для забезпечення оптимального складу паливо-повітряної суміші використовуються системи електронного упорскування палива.

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Пустільник Є.В.			РОЗДІЛ 1			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Курганов І. Д								8	15
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									
								КНУ АКІТР-23ск			

Такі системи дозволяють підтримувати коефіцієнт надлишку повітря λ поблизу стехіометричного значення 1, що є необхідною умовою ефективної роботи каталізатора та зниження токсичності вихлопних газів [3]

Робота двигуна супроводжується значною кількістю динамічних процесів. До основних із них належать процеси газообміну, динаміка впускного колектора, зміна навантаження, теплові процеси, а також зміна кутової швидкості колінчастого вала. У зв'язку з цим система керування повинна функціонувати в умовах постійної зміни параметрів та забезпечувати стабільність роботи силового агрегату [4].

Сучасні чотирициліндрові бензинові двигуни, як правило, оснащуються електронними блоками керування, що здійснюють обробку інформації від численних датчиків та формують сигнали керування виконавчими механізмами. Основними параметрами, які контролюються системою керування, є частота обертання колінчастого вала, навантаження двигуна, температура охолоджувальної рідини, температура повітря, положення дросельної заслінки та склад вихлопних газів [5].

Однією з найважливіших характеристик двигуна є крутний момент. Формування крутного моменту залежить від маси повітря, що надходить до циліндрів, кількості впорскуваного палива та кута випередження запалювання. Для забезпечення максимальної ефективності роботи двигуна необхідно підтримувати оптимальні параметри сумішоутворення та процесу згоряння на всіх режимах роботи [6].

З розвитком електроніки та мікропроцесорної техніки відбувся перехід від карбюраторних систем до електронних систем упорскування палива. Карбюраторні системи мали обмежені можливості щодо точності дозування палива та не забезпечували необхідних екологічних показників. Використання електронних систем керування дозволило реалізувати адаптивні алгоритми регулювання та значно покращити економічність двигунів [7].

Для дослідження процесів, що відбуваються у двигунах внутрішнього згоряння, широко застосовуються математичні моделі. Вони дозволяють

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналізувати динамічні режими роботи, оптимізувати алгоритми керування та оцінювати характеристики системи без необхідності проведення великої кількості дорогих експериментів. Особливого поширення набули середньозначні моделі двигуна — Mean Value Engine Model (MVEM), які забезпечують достатню точність при помірній обчислювальній складності [8].

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється розробці замкнених систем керування, у яких параметри роботи двигуна автоматично коригуються на основі зворотного зв'язку. Найбільш поширеним прикладом є система регулювання складу паливо-повітряної суміші за сигналом λ -зонда. Використання таких систем дозволяє підтримувати стабільну роботу двигуна навіть за умов різкої зміни навантаження [9].

Таким чином, бензиновий двигун внутрішнього згоряння є складним об'єктом керування, ефективна робота якого неможлива без застосування сучасних електронних систем автоматичного керування та математичного моделювання.

1.2 Системи електронного керування двигунами

Системи електронного керування двигунами внутрішнього згоряння є невід'ємною складовою сучасних транспортних засобів. Їх основним призначенням є забезпечення оптимального режиму роботи двигуна шляхом автоматичного керування подачею палива, моментом запалювання, роботою дросельної заслінки та іншими параметрами [10].

Перші системи електронного керування почали активно впроваджуватись у 1980-х роках у зв'язку з посиленням екологічних вимог та необхідністю підвищення паливної економічності автомобілів. На відміну від механічних та карбюраторних систем, електронні системи забезпечують значно вищу точність дозування палива та адаптацію до зміни режимів роботи двигуна [11].

Основним елементом сучасної системи керування є електронний блок керування двигуном — ECU. Блок керування виконує функції збору інформації

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

від датчиків, обробки сигналів, виконання алгоритмів керування та формування команд для виконавчих механізмів [12].

У сучасних системах EFI використовується значна кількість датчиків. Датчик положення колінчастого вала забезпечує синхронізацію процесів упорскування та запалювання. Датчик абсолютного тиску у впускному колекторі використовується для оцінювання навантаження двигуна. Датчик положення дросельної заслінки визначає положення педалі акселератора. Датчики температури дозволяють враховувати тепловий стан двигуна та повітря [13].

Однією з найважливіших підсистем є система електронного упорскування палива. Залежно від конструкції двигуна можуть застосовуватись одноточкові, багатоточкові та безпосередні системи упорскування. Найбільш поширеними у бензинових двигунах є багатоточкові системи MPI, у яких кожний циліндр має окремий інжектор [14].

За способом організації упорскування розрізняють одночасне, попарно-паралельне та секвентальне упорскування. Секвентальне упорскування є найбільш ефективним, оскільки забезпечує точне дозування палива відповідно до фази роботи кожного циліндра. Реалізація такого підходу потребує використання датчика положення розподільчого вала та складніших алгоритмів синхронізації [15].

Крім керування подачею палива, ECU виконує керування системою запалювання. Основною задачею є визначення оптимального кута випередження запалювання залежно від режиму роботи двигуна. Занадто раннє або занадто пізнє запалювання призводить до зниження ефективності роботи двигуна, підвищення температури та збільшення витрати палива [16].

Для забезпечення максимальної ефективності роботи двигуна використовуються замкнені системи керування. Одним із прикладів є регулювання коефіцієнта λ на основі сигналу кисневого датчика. Система аналізує склад вихлопних газів та коригує тривалість імпульсу впорскування палива [17].

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У сучасних системах електронного керування також реалізуються додаткові функції:

- керування холостим ходом;
- обмеження обертів двигуна;
- діагностика несправностей;
- адаптивне налаштування параметрів;
- керування системою рециркуляції відпрацьованих газів;
- взаємодія з автоматичними коробками передач [18].

Для реалізації алгоритмів керування використовуються мікроконтролери високої продуктивності. ECU працює у режимі реального часу, оскільки процеси впорскування та запалювання повинні виконуватись із високою точністю синхронізації. Навіть незначні затримки можуть призвести до порушення роботи двигуна [19].

Важливою особливістю сучасних ECU є використання карт керування — lookup tables. Такі таблиці містять параметри упорскування та запалювання залежно від частоти обертання та навантаження двигуна. Використання карт дозволяє реалізувати складні алгоритми керування без значного збільшення обчислювальної складності [20].

Останніми роками активно розвиваються інтелектуальні системи керування двигунами, що використовують елементи нечіткої логіки, нейронних мереж та адаптивного керування. Такі системи дозволяють враховувати зміну характеристик двигуна у процесі експлуатації та підвищувати ефективність роботи [21].

Таким чином, сучасні системи електронного керування двигунами є складними багатофункціональними комплексами, які забезпечують високі показники економічності, потужності та екологічності транспортних засобів.

1.3 Датчики та виконавчі механізми систем EFI

Ефективність функціонування системи електронного керування двигуном значною мірою залежить від точності роботи датчиків та виконавчих механізмів. Саме вони забезпечують отримання інформації про поточний стан двигуна та реалізацію керуючих впливів [22].

Одним із головних датчиків є датчик положення колінчастого вала. Він використовується для визначення частоти обертання двигуна та синхронізації процесів упорскування і запалювання. Найбільш поширеними є індуктивні та Hall-датчики. Сигнал датчика формується за допомогою зубчастого диска, встановленого на колінчастому валу [23].

Датчик положення розподільчого вала використовується у системах секвентального упорскування. Він дозволяє визначити фазу роботи конкретного циліндра та забезпечує точне формування моменту впорскування палива.

Для оцінювання навантаження двигуна застосовується датчик абсолютного тиску у впускному колекторі — MAP-сенсор. Принцип його роботи базується на перетворенні тиску на електричний сигнал. Значення тиску використовується ECU для визначення маси повітря, що надходить у двигун [24].

Альтернативою MAP-сенсору є датчик масової витрати повітря — MAF. Він безпосередньо вимірює кількість повітря, що проходить через впускну систему. Використання MAF забезпечує високу точність визначення навантаження, однак збільшує вартість системи [25].

Датчик положення дросельної заслінки дозволяє визначити ступінь відкриття дроселя та швидкість його зміни. Інформація від TPS використовується для визначення режиму роботи двигуна, а також для реалізації алгоритмів прискорення.

Температурні датчики використовуються для контролю температури охолоджувальної рідини та повітря. Значення температури впливають на процес сумішоутворення, тривалість упорскування та режими прогріву двигуна.

Важливим елементом системи є кисневий датчик — λ -зонд. Його основним призначенням є визначення складу вихлопних газів та забезпечення роботи замкненого контуру регулювання паливо-повітряної суміші. Сучасні системи використовують вузькосмугові та широкосмугові λ -зонди [1].

До виконавчих механізмів систем EFI належать інжектори, котушки запалювання, дросельні приводи та регулятори холостого ходу. Інжектор являє собою електромагнітний клапан, який відкривається за командою ECU та забезпечує подачу палива у впускний тракт або безпосередньо в циліндр.

Тривалість відкриття інжектора визначає кількість поданого палива. Для забезпечення точності дозування ECU формує імпульси керування з високою часовою точністю. У сучасних двигунах тривалість імпульсу може становити лише кілька мілісекунд.

Система запалювання складається з катушок запалювання та свічок. Катушка перетворює низьку напругу бортової мережі у високовольтний імпульс, необхідний для утворення іскри. ECU визначає момент формування іскри відповідно до поточного режиму роботи двигуна.

Для підтримання стабільних обертів холостого ходу використовуються регулятори холостого ходу або електронні дросельні заслінки. ECU автоматично змінює положення виконавчого механізму для компенсації зміни навантаження.

Таким чином, датчики та виконавчі механізми є ключовими елементами систем електронного керування двигунами, а їх характеристики безпосередньо впливають на точність та ефективність роботи системи.

1.4 Методи математичного моделювання двигунів внутрішнього згоряння

Математичне моделювання є одним із основних інструментів дослідження сучасних систем керування двигунами внутрішнього згоряння. Використання моделей дозволяє досліджувати динамічні процеси, оптимізувати параметри системи та зменшити витрати на проведення експериментальних випробувань [2].

Існує декілька основних підходів до моделювання двигунів внутрішнього згоряння. Найбільш точними є детерміновані фізичні моделі, що описують термодинамічні процеси у кожному циліндрі. Такі моделі враховують газодинаміку, теплопередачу, процеси згоряння та інші фактори. Однак їх використання потребує значних обчислювальних ресурсів [3].

Математичні моделі двигунів внутрішнього згоряння можна класифікувати за рівнем деталізації, точністю та призначенням. Найбільш поширеними є:

- термодинамічні моделі;
- газодинамічні моделі;
- емпіричні моделі;
- моделі середнього значення;
- адаптивні та інтелектуальні моделі.

Термодинамічні моделі забезпечують детальний опис процесів у циліндрах двигуна. У таких моделях враховуються процеси теплообміну, зміни тиску і температури, швидкість згоряння палива та склад робочої суміші. Подібні моделі дозволяють отримати високоточні результати, однак їх використання супроводжується значними обчислювальними витратами [4].

Газодинамічні моделі використовуються для аналізу процесів руху газів у впускному та випускному трактах. Такі моделі враховують хвильові процеси, турбулентність, втрати тиску та характеристики трубопроводів. Найчастіше

вони застосовуються при дослідженні високофорсованих двигунів та систем турбонаддуву [5].

Для задач автоматичного керування найбільш доцільним є використання моделей середнього значення — Mean Value Engine Model (MVEM). У таких моделях циклічні процеси усереднюються у часі, що дозволяє значно знизити складність розрахунків та забезпечити можливість роботи в режимі реального часу [6].

MVEM-моделі є компромісом між точністю та швидкістю. Вони достатньо точно описують основні динамічні процеси двигуна і при цьому не потребують надмірних обчислювальних ресурсів. Саме тому такі моделі широко використовуються при синтезі систем автоматичного керування двигунами [7].

Основою MVEM є система диференціальних рівнянь, які описують процеси зміни тиску у впускному колекторі, формування повітряного потоку, зміни складу паливо-повітряної суміші та динаміку колінчастого вала.

Динаміка впускного колектора описується рівнянням балансу мас:

$$\dot{m}_{man} = \dot{m}_{air} - \dot{m}_{cyl},$$

де $\dot{m}_{air}$ - масова витрата повітря через дросельну заслінку; $\dot{m}_{cyl}$ - масова витрата повітря у циліндри.

Тиск у впускному колекторі визначається співвідношенням:

$$\frac{dP_{man}}{dt} = \left(\frac{R \cdot T}{V_{man}} \right) \cdot (\dot{m}_{air} - \dot{m}_{cyl}),$$

де R - газова стала; T - температура повітря; V_{man} - об'єм впускного колектора.

Модель динаміки колінчастого вала базується на рівнянні руху:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l,$$

де J - момент інерції, T_e - момент двигуна, T_l - момент навантаження[8].

Формування крутного моменту двигуна залежить від кількості повітря у циліндрах, складу паливо-повітряної суміші та кута випередження запалювання. У спрощених моделях крутний момент визначається через коефіцієнт наповнення циліндрів:

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_e = K_t \cdot \eta_v \cdot m_{air},$$

де η_v - коефіцієнт наповнення; m_{air} - маса повітря; K_t - коефіцієнт пропорційності.

Для опису процесів сумішоутворення використовуються моделі співвідношення повітря та палива. Одним із ключових параметрів є коефіцієнт надлишку повітря:

$$\lambda = AFR / AFR_{stoich},$$

де AFR - фактичне співвідношення повітря та палива; AFR_{stoich} - стехіометричне співвідношення [9].

У системах електронного керування широко застосовуються lookup-моделі. У таких моделях параметри визначаються за допомогою двовимірних таблиць, побудованих на основі експериментальних даних. Найчастіше lookup-таблиці використовуються для реалізації карт упорскування та карт запалювання [10].

Карти керування містять залежності тривалості імпульсу впорскування та кута випередження запалювання від частоти обертання та навантаження двигуна. Використання таких таблиць дозволяє реалізувати складні алгоритми керування при мінімальному навантаженні на мікроконтролер ECU.

Для стабілізації параметрів роботи двигуна використовуються замкнені системи автоматичного керування. Найбільш поширеним є PI - або PID -регулювання коефіцієнта λ . Регулятор формує корекцію тривалості імпульсу впорскування на основі сигналу λ -зонда [11].

У сучасних дослідженнях активно застосовуються адаптивні системи керування. Вони забезпечують автоматичне налаштування параметрів регуляторів відповідно до зміни режимів роботи двигуна. Використання адаптивних алгоритмів дозволяє підвищити точність керування та покращити економічність двигуна [12].

Перспективним напрямом є використання методів нечіткої логіки та нейронних мереж. Нечіткі регулятори дозволяють враховувати невизначеність параметрів та складні нелінійні залежності, а нейронні мережі

використовуються для прогнозування параметрів роботи двигуна та оптимізації процесів керування [13].

Окрему групу становлять предиктивні системи керування — Model Predictive Control (MPC). У таких системах керуючий вплив визначається на основі прогнозування поведінки двигуна на певному часовому інтервалі. MPC-системи забезпечують високу якість керування, однак потребують значних обчислювальних ресурсів [14].

У сучасній автомобільній промисловості математичні моделі використовуються не лише для синтезу алгоритмів керування, але й для діагностики несправностей. Моделі дозволяють порівнювати реальні параметри роботи двигуна з еталонними значеннями та виявляти відхилення [15].

Важливим напрямом розвитку є Hardware-in-the-Loop моделювання. У таких системах математична модель двигуна взаємодіє з реальним електронним блоком керування, що дозволяє тестувати алгоритми без використання реального двигуна [9, 16].

Значний внесок у розвиток методів математичного моделювання двигунів внутрішнього згоряння зробили українські науковці. У роботах дослідників Національного технічного університету «ХПІ» розглядаються питання моделювання теплових, газодинамічних та динамічних процесів у ДВЗ, а також задачі оптимізації параметрів силових установок. Зокрема, у роботі О. О. Осетрова та співавторів досліджено математичні моделі гібридних силових установок та процеси оцінювання паливної економічності двигунів внутрішнього згоряння [30].

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється електронному керуванню газорозподілом та автоматизації роботи двигунів. У роботі Л. П. Клименка, О. Ф. Прищепова та співавторів розглянуто моделювання електронної системи керування газорозподільним механізмом малопотужного двигуна внутрішнього згоряння, що підтверджує актуальність застосування електронних систем керування у сучасних ДВЗ [26].

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перспективним напрямом є використання відкритих середовищ моделювання. У роботі М. О. Гончара та співавторів досліджено побудову динамічних моделей двигунів внутрішнього згоряння у середовищі OpenModelica. Авторами показано можливість створення моделей динаміки ДВЗ для подальшого аналізу режимів роботи та дослідження перехідних процесів [27].

Українські дослідники також приділяють увагу питанням автоматичного керування тепловими процесами двигунів. У роботах О. В. Триньова та Д. Г. Сівиха розглянуто моделювання автоматизованої системи локального охолодження автотракторного дизеля та досліджено вплив параметрів системи охолодження на тепловий стан двигуна [28].

Крім цього, у сучасних українських дослідженнях активно розглядаються задачі адаптивного керування двигунами та оптимізації режимів роботи паливних систем. Використання цифрових методів моделювання дозволяє підвищити точність дослідження динамічних процесів та забезпечити можливість тестування алгоритмів керування без використання реальних двигунів [29].

Таким чином, математичне моделювання є важливим інструментом дослідження двигунів внутрішнього згоряння та систем їх електронного керування. Найбільш доцільним для задач синтезу систем автоматичного керування є використання моделей середнього значення MVEM, які забезпечують достатню точність та помірну обчислювальну складність.

1.5 Аналіз програмних засобів моделювання

Для дослідження систем електронного керування двигунами внутрішнього згоряння необхідним є використання сучасних програмних засобів математичного та імітаційного моделювання. Такі програмні комплекси дозволяють реалізовувати математичні моделі різного рівня складності,

виконувати аналіз динамічних характеристик, проводити дослідження перехідних процесів та оцінювати ефективність алгоритмів керування [17].

Одним із найбільш поширених програмних пакетів для моделювання динамічних систем є MATLAB. Даний програмний комплекс забезпечує широкі можливості для виконання чисельних розрахунків, аналізу даних, побудови графіків та реалізації математичних алгоритмів. MATLAB активно використовується у наукових дослідженнях, навчальному процесі та інженерній практиці [18].

Важливою перевагою MATLAB є наявність великої кількості спеціалізованих бібліотек та інструментальних пакетів. Це дозволяє реалізовувати складні математичні моделі та автоматизувати процес дослідження систем керування.

Для побудови структурних моделей динамічних систем використовується середовище Simulink. Воно забезпечує графічний підхід до створення моделей та дозволяє реалізовувати системи у вигляді блок-схем [19].

У Simulink користувач має можливість створювати моделі шляхом з'єднання функціональних блоків, які описують математичні операції, динамічні ланки, регулятори, логічні елементи та інші компоненти системи. Такий підхід значно спрощує процес моделювання складних технічних систем.

Основними перевагами Simulink є: наочність структурних схем; можливість моделювання нелінійних систем; підтримка систем реального часу; інтеграція з MATLAB; можливість автоматичної генерації коду; підтримка апаратного моделювання.

Для моделювання автомобільних систем у MATLAB/Simulink використовуються спеціалізовані бібліотеки Simscape та Powertrain Blockset. Бібліотека Simscape дозволяє моделювати фізичні системи різної природи — механічні, електричні, гідравлічні та теплові [20].

Powertrain Blockset містить готові моделі двигунів, трансмісій, систем подачі палива та елементів транспортного засобу. Це дозволяє суттєво

скоротити час розробки моделей та спростити процес проведення досліджень [21].

Однією з головних переваг MATLAB/Simulink є можливість реалізації моделей у режимі реального часу. Це дозволяє використовувати моделі для Hardware-in-the-Loop тестування електронних блоків керування [22].

У системах HIL математична модель двигуна працює на комп'ютері реального часу та взаємодіє з фізичним ECU. Такий підхід дозволяє досліджувати роботу алгоритмів керування без використання реального двигуна, що значно знижує витрати та підвищує безпеку досліджень.

Для моделювання двигунів внутрішнього згоряння також використовуються інші програмні комплекси. Одним із найбільш поширених є AVL BOOST. Даний пакет призначений для детального термодинамічного аналізу двигунів та газодинамічних процесів [23].

Програмний комплекс GT-Power застосовується для моделювання процесів газообміну, турбонаддуву та систем випуску. Він забезпечує високу точність моделювання, однак має значну складність та високі вимоги до обчислювальних ресурсів [24].

Система Ricardo WAVE використовується для дослідження процесів у впускних та випускних трактах. Даний програмний комплекс широко застосовується в автомобільній промисловості при проектуванні високоефективних двигунів.

Для дослідження систем автоматичного керування також застосовується середовище LabVIEW, яке забезпечує можливість створення систем збору та обробки даних, а також реалізації систем реального часу.

Попри наявність великої кількості програмних пакетів, саме MATLAB/Simulink є одним із найбільш універсальних засобів для дослідження систем електронного керування двигунами. Це обумовлено поєднанням широких можливостей математичного аналізу, гнучкості структурного моделювання та підтримки сучасних методів автоматичного керування.

Важливою особливістю MATLAB/Simulink є підтримка автоматичної генерації програмного коду за допомогою Embedded Coder. Це дозволяє використовувати одну й ту саму модель як для моделювання, так і для подальшої реалізації алгоритмів керування у мікроконтролерних системах [25].

У сучасних дослідженнях також активно використовуються методи спільного моделювання — co-simulation. У такому підході Simulink взаємодіє з іншими програмними пакетами, що дозволяє поєднувати переваги різних середовищ моделювання.

Для аналізу систем керування двигунами у MATLAB/Simulink використовуються: моделі впускного колектора; моделі динаміки колінчастого вала; моделі систем упорскування; моделі запалювання; моделі регуляторів; моделі датчиків та виконавчих механізмів.

Дослідження перехідних процесів у Simulink дозволяє оцінювати стабільність системи; час перехідного процесу; перерегулювання; похибку регулювання; реакцію системи на зміну навантаження.

Серед українських наукових досліджень значна увага приділяється використанню сучасних програмних середовищ моделювання. У роботах вітчизняних дослідників активно використовуються середовища MATLAB, Simulink та OpenModelica для реалізації математичних моделей двигунів внутрішнього згоряння та систем автоматичного керування [27].

У роботі С. В. Зайченка та співавторів досліджено процес електромеханічного керування газорозподілом генераторної установки з двигуном внутрішнього згоряння. Для аналізу процесів керування використано математичне моделювання динамічних режимів роботи системи [29].

Практичне використання MATLAB-моделей для дослідження систем охолодження двигунів розглянуто у роботі О. О. Івануса, де реалізовано модель системи охолодження ДВЗ із електричною помпою у середовищі MATLAB. Отримані результати підтверджують ефективність застосування комп'ютерного моделювання для аналізу теплових процесів двигуна [28].

У сучасних дослідженнях також активно застосовуються методи моделювання випробувальних стендів двигунів внутрішнього згоряння. У роботі дослідників НТУ «ХПІ» запропоновано модель енергозберігаючого стенду для випробувань ДВЗ з використанням засобів математичного моделювання та електромеханічних систем навантаження [30].

Українські науковці також досліджують можливості інтеграції математичних моделей із системами реального часу. Це дозволяє реалізовувати Hardware-in-the-Loop моделювання та здійснювати тестування електронних блоків керування двигунами без використання реальних силових установок. Використання таких технологій значно скорочує витрати на дослідження та прискорює процес розробки систем автоматичного керування [26].

Таким чином, сучасні програмні засоби моделювання забезпечують ефективні інструменти для дослідження систем електронного керування двигунами внутрішнього згоряння. Найбільш доцільним для реалізації математичної моделі та проведення досліджень у даній роботі є використання середовища MATLAB/Simulink, яке забезпечує широкі можливості щодо аналізу динамічних процесів та синтезу систем автоматичного керування.

1.6 Постановка задачі дослідження

Аналіз сучасних систем електронного керування двигунами внутрішнього згоряння показав, що забезпечення високої економічності, екологічності та стабільності роботи двигуна неможливе без використання замкнених систем автоматичного керування. Особливо важливим є точне регулювання складу паливо-повітряної суміші та стабілізація режимів роботи двигуна за умов зміни навантаження [17].

Сучасні системи EFI використовують складні алгоритми керування, які базуються на обробці інформації від великої кількості датчиків. Ефективність роботи таких систем значною мірою залежить від точності математичних

моделей, що описують процеси впуску повітря, подачі палива, формування крутного моменту та динаміку колінчастого вала.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що для задач синтезу систем керування найбільш доцільним є використання моделей середнього значення — Mean Value Engine Model. Такі моделі забезпечують достатню точність опису динамічних процесів при помірній обчислювальній складності.

У роботі пропонується розробити математичну модель чотирициліндрового бензинового двигуна внутрішнього згоряння та реалізувати замкнену систему електронного керування у середовищі MATLAB/Simulink. Основною задачею системи керування є стабілізація складу паливо-повітряної суміші та забезпечення стійкої роботи двигуна при зміні режимів навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз сучасних систем електронного керування бензиновими двигунами внутрішнього згоряння та методів їх математичного моделювання.
2. Розробити математичну модель чотирициліндрового двигуна внутрішнього згоряння з урахуванням процесів впуску повітря, подачі палива та формування крутного моменту.
3. Розробити структуру замкненої системи електронного керування складом паливо-повітряної суміші.
4. Реалізувати імітаційну модель системи у середовищі Simulink.
5. Провести дослідження перехідних процесів системи при зміні режимів роботи двигуна та навантаження.
6. Виконати аналіз результатів моделювання та оцінити ефективність роботи системи керування.

Висновки до розділу:

У розділі проведено аналіз сучасних систем електронного керування бензиновими двигунами внутрішнього згоряння та розглянуто особливості функціонування систем електронного упорскування палива. Виконано огляд

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

датчиків, виконавчих механізмів і принципів побудови замкнених систем автоматичного керування двигуном. Проаналізовано основні методи математичного моделювання ДВЗ, зокрема моделі середнього значення MVEM, а також сучасні програмні засоби моделювання MATLAB і Simulink. За результатами проведеного аналізу обґрунтовано доцільність використання середовища Simulink для розробки та дослідження математичної моделі замкненої системи електронного керування чотирициліндровим двигуном внутрішнього згоряння.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАМКНЕНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОННОГО КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ

2.1 Розробка структури замкненої системи керування

Замкнена система електронного керування двигуном внутрішнього згоряння призначена для забезпечення стабільної роботи двигуна на різних режимах навантаження, підтримання оптимального складу паливо-повітряної суміші та стабілізації частоти обертання колінчастого вала. Основною задачею системи є автоматичне формування керуючих впливів на основі інформації, отриманої від датчиків, із подальшим коригуванням параметрів роботи двигуна за принципом зворотного зв'язку.

У роботі як об'єкт керування розглядається чотирициліндровий бензиновий двигун внутрішнього згоряння із системою електронного упорскування палива. Для дослідження системи використовується математична модель середнього значення MVEM (Mean Value Engine Model), що дозволяє описати основні динамічні процеси двигуна без моделювання окремих робочих циклів циліндрів.

Загальна структура замкненої системи електронного керування двигуном наведена на рисунку 2.1.

Система побудована за класичним принципом автоматичного регулювання та включає підсистему вимірювання параметрів двигуна, підсистему формування керуючих сигналів, підсистему подачі палива, підсистему керування дросельною заслінкою, підсистему зворотного зв'язку за складом суміші та математичну модель двигуна.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Пустільнік Є. В.			РОЗДІЛ 2			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Курганов І. Д.								25	37
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									
					КНУ АКІТР-23ск						

Підсистема вимірювання параметрів двигуна забезпечує отримання інформації про поточний режим роботи двигуна. До її складу входять датчик частоти обертання колінчастого вала, датчик положення дросельної заслінки, датчик абсолютного тиску у впускному колекторі, датчик температури повітря та λ -зонд. Отримані сигнали надходять до електронного блока керування та використовуються для формування керуючих впливів.

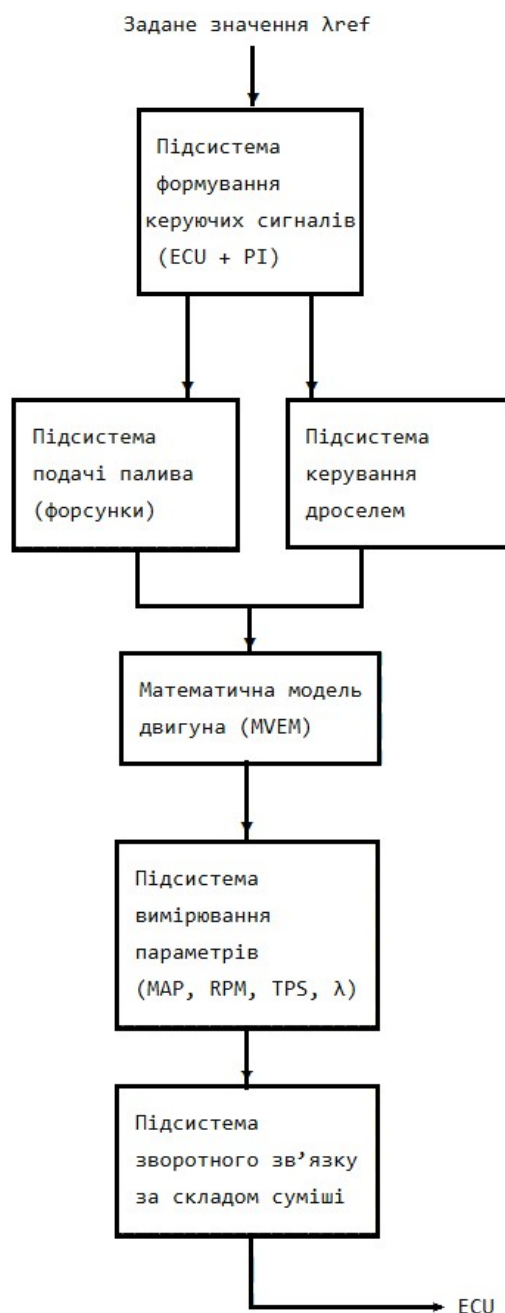


Рисунок 2.1 - Загальна структура замкненої системи електронного керування двигуном

Підсистема формування керуючих сигналів реалізує алгоритми автоматичного керування двигуном. Основним елементом підсистеми є електронний блок керування ECU, який виконує обробку сигналів датчиків, визначає поточний режим роботи двигуна та формує сигнали керування виконавчими механізмами. У роботі реалізовано замкнений контур регулювання складу паливо-повітряної суміші з використанням PI-регулятора.

Регулювання складу суміші здійснюється за сигналом λ -зонда. Значення коефіцієнта надлишку повітря порівнюється із заданим значенням, після чого формується сигнал похибки регулювання. PI-регулятор забезпечує автоматичну корекцію тривалості імпульсу впорскування палива залежно від величини похибки. Пропорційна складова регулятора забезпечує швидку реакцію системи на зміну режиму роботи, а інтегральна складова зменшує статичну похибку регулювання.

Підсистема подачі палива включає електромагнітні форсунки, які забезпечують дозовану подачу палива у впускний тракт двигуна. Кількість палива визначається тривалістю імпульсу впорскування, що формується електронним блоком керування. Зміна тривалості імпульсу дозволяє регулювати склад паливо-повітряної суміші залежно від режиму роботи двигуна.

Підсистема керування дросельною заслінкою забезпечує регулювання кількості повітря, що надходить до двигуна. Положення дросельної заслінки визначає масову витрату повітря та впливає на навантаження двигуна. У математичній моделі положення дросельної заслінки задається у вигляді керуючого сигналу, який визначає режим роботи двигуна.

Математична модель двигуна є основною функціональною підсистемою системи керування та використовується для дослідження динамічних процесів. Модель реалізована на основі MVEM-підходу та забезпечує опис процесів впуску повітря, формування паливо-повітряної суміші, процесу згоряння та динаміки колінчастого вала. Внутрішня структура математичної моделі двигуна наведена на рисунку 2.2.

Замкнений характер системи забезпечується підсистемою зворотного зв'язку за складом суміші. Сигнал λ -зонда використовується для оцінювання поточного значення коефіцієнта надлишку повітря та подальшої корекції подачі палива. Наявність зворотного зв'язку дозволяє компенсувати зміну навантаження та нестабільність параметрів двигуна.

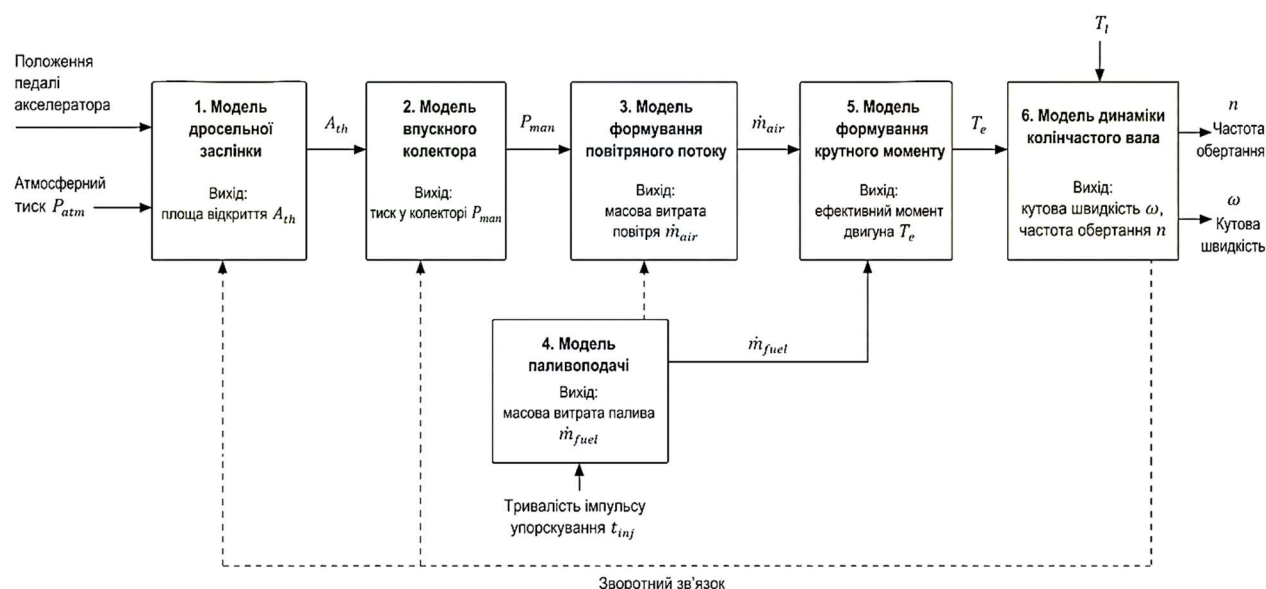


Рисунок 2.2 - Структурна схема математичної моделі двигуна

У процесі роботи двигуна повітря через дросельну заслінку надходить до впускного колектора, після чого формується паливо-повітряна суміш. Після процесу згоряння формується крутний момент, який приводить у рух колінчастий вал двигуна. Зміна навантаження викликає зміну частоти обертання двигуна, що призводить до необхідності автоматичної корекції подачі палива та забезпечення стабільності роботи системи.

Розроблена структура замкненої системи керування дозволяє досліджувати перехідні процеси при зміні положення дросельної заслінки та моменту навантаження, аналізувати динаміку системи та оцінювати якість автоматичного регулювання складу паливо-повітряної суміші. Запропонована структура є основою для подальшої реалізації математичної моделі та проведення досліджень у середовищах MATLAB та Simulink.

Деталізація математичної моделі двигуна, що входить до складу замкненої системи керування, наведена у підрозділі 2.2.

2.2 Розробка математичної моделі двигуна

Для дослідження замкненої системи електронного керування двигуном внутрішнього згоряння у роботі використано математичну модель середнього значення — Mean Value Engine Model (MVEM). Даний підхід дозволяє описати основні динамічні процеси двигуна без деталізації окремих робочих циклів циліндрів, що суттєво знижує обчислювальну складність моделі та забезпечує можливість проведення досліджень у середовищі Simulink у режимі реального часу.

MVEM-модель забезпечує достатню точність для аналізу систем автоматичного керування та широко використовується у задачах синтезу електронних систем керування двигунами. У межах роботи модель двигуна включає:

- модель впускного тракту;
- модель формування паливо-повітряної суміші;
- модель процесу згоряння;
- модель динаміки колінчастого вала.

Основними вхідними параметрами моделі є положення дросельної заслінки, тривалість імпульсу впорскування палива та момент навантаження. Вихідними параметрами моделі є частота обертання колінчастого вала, тиск у впускному колекторі та коефіцієнт надлишку повітря λ .

Модель впускного тракту

Впускний тракт двигуна призначений для подачі повітря до циліндрів двигуна та формування необхідної витрати повітря залежно від режиму роботи. Основними елементами моделі впускного тракту є дросельна заслінка та впускний колектор.

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Масова витрата повітря через дросельну заслінку визначається залежно від кута її відкриття та перепаду тиску:

$$\dot{m}_{air} = C_d A_{th} \sqrt{2\rho(P_{atm} - P_{man})}$$

де: C_d - коефіцієнт витрати; A_{th} - ефективна площа відкриття дросельної заслінки; ρ - густина повітря; P_{atm} - атмосферний тиск; P_{man} - тиск у впускному колекторі.

Площа відкриття дросельної заслінки залежить від положення педалі акселератора та визначає кількість повітря, що надходить до двигуна. Зі збільшенням кута відкриття дросельної заслінки зростає витрата повітря та збільшується навантаження двигуна.

Динаміка зміни тиску у впускному колекторі описується рівнянням балансу мас:

$$\frac{dP_{man}}{dt} = \frac{RT}{V_{man}} (\dot{m}_{air} - \dot{m}_{cyl})$$

де: R - газова стала; T - температура повітря; V_{man} - об'єм впускного колектора; $\dot{m}_{cyl}$ - витрата повітря у циліндри двигуна.

Витрата повітря у циліндри визначається через коефіцієнт наповнення:

$$\dot{m}_{cyl} = \eta_v \frac{V_d n P_{man}}{RT}$$

де: η_v - коефіцієнт наповнення; V_d - робочий об'єм двигуна; n - частота обертання колінчастого вала.

Використання моделі впускного колектора дозволяє врахувати інерційність процесу надходження повітря та дослідити динаміку зміни тиску при різких змінах положення дросельної заслінки.

У середовищі Simulink модель впускного тракту реалізується за допомогою інтегруючих ланок, блоків математичних операцій та функціональних залежностей.

Модель паливо-повітряної суміші

Однією з основних задач електронної системи керування є підтримання оптимального складу паливо-повітряної суміші. У бензинових двигунах найбільш ефективним є режим, близький до стехіометричного співвідношення.

Маса палива, що подається форсунками, визначається тривалістю імпульсу впорскування:

$$m_f = K_f t_{inj}$$

де: K_f - коефіцієнт продуктивності форсунки; t_{inj} - тривалість імпульсу впорскування.

Формування паливо-повітряної суміші оцінюється за допомогою коефіцієнта надлишку повітря:

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_{stoic}}$$

де: AFR - фактичне співвідношення повітря та палива; AFR_{stoic} - стехіометричне співвідношення.

Для бензинових двигунів стехіометричне співвідношення становить приблизно 14,7:1. Значення $\lambda=1$ відповідає оптимальному складу суміші.

У системі електронного керування значення коефіцієнта λ вимірюється за допомогою λ -зонда. Отриманий сигнал використовується у контурі зворотного зв'язку для автоматичної корекції подачі палива.

Регулювання складу суміші здійснюється PI-регулятором:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

де: K_p - коефіцієнт пропорційної складової; K_i - коефіцієнт інтегральної складової; $e(t)$ - похибка регулювання.

Похибка визначається як різниця між заданим та поточним значенням коефіцієнта λ :

$$e(t) = \lambda_{ref} - \lambda$$

Використання замкненого контуру регулювання дозволяє компенсувати зміну навантаження та нестабільність параметрів двигуна.

У математичній моделі процес впорскування реалізується у вигляді підсистеми інжектора, яка формує витрату палива залежно від сигналу керування ECU.

Модель процесу згоряння

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Процес згоряння паливо-повітряної суміші визначає енергетичні характеристики двигуна та безпосередньо впливає на формування крутного моменту.

У межах MVEM-моделі процес згоряння описується у спрощеному вигляді через залежність крутного моменту від кількості повітря та палива.

Ефективний крутний момент двигуна визначається співвідношенням:

$$T_e = K_t \eta_c m_{air}$$

де: K_t - коефіцієнт перетворення; η_c - коефіцієнт ефективності згоряння; m_{air} - маса повітря у циліндрах.

Коефіцієнт ефективності згоряння залежить від складу суміші та режиму роботи двигуна. При відхиленні коефіцієнта λ від стехіометричного значення ефективність процесу згоряння знижується.

У роботі для спрощення математичної моделі прийнято:

- сталу температуру процесу;
- відсутність детонації;
- сталу теплоту згоряння палива;
- рівномірний розподіл суміші між циліндрами.

Такий підхід дозволяє зосередити увагу на дослідженні динаміки системи керування без надмірного ускладнення моделі.

У Simulink модель процесу згоряння реалізується за допомогою функціональних блоків множення, коефіцієнтів підсилення та lookup-таблиць, які описують залежність крутного моменту від навантаження та частоти обертання.

Модель динаміки колінчастого вала

Динаміка колінчастого вала визначає зміну частоти обертання двигуна під дією крутного моменту та навантаження.

Рівняння руху колінчастого вала має вигляд:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l - B\omega$$

де: J - момент інерції; ω - кутова швидкість; T_e - ефективний момент двигуна; T_l - момент навантаження; B — коефіцієнт механічних втрат.

Частота обертання двигуна визначається співвідношенням:

$$n = \frac{30\omega}{\pi}$$

Зі збільшенням навантаження частота обертання колінчастого вала зменшується, що викликає зміну витрати повітря та необхідність корекції подачі палива. Таким чином формується взаємозв'язок між усіма підсистемами двигуна.

У математичній моделі момент навантаження задається у вигляді ступінчастого сигналу, що дозволяє досліджувати перехідні процеси при різкій зміні режимів роботи двигуна.

У середовищі Simulink модель динаміки колінчастого вала реалізується за допомогою інтегратора та блоку сумування моментів. Вихідним параметром підсистеми є частота обертання двигуна, яка використовується в інших блоках моделі.

Розроблена математична модель дозволяє досліджувати динаміку замкненої системи електронного керування двигуном, аналізувати вплив зміни навантаження на параметри роботи та оцінювати якість автоматичного регулювання складу паливо-повітряної суміші. Використання MVEM-підходу забезпечує достатню точність моделювання при помірній складності структури моделі, що є доцільним для задач бакалаврської роботи.

2.3 Розробка алгоритму електронного керування

Алгоритм електронного керування двигуном внутрішнього згоряння призначений для забезпечення стабільної роботи двигуна на різних режимах навантаження та підтримання оптимального складу паливо-повітряної суміші. Основною функцією алгоритму є формування керуючих сигналів системи впорскування палива на основі параметрів поточного режиму роботи двигуна та

сигналів зворотного зв'язку.

У роботі реалізовано алгоритм замкненого електронного керування бензиновим чотирициліндровим двигуном із використанням зворотного зв'язку за коефіцієнтом надлишку повітря λ . Алгоритм реалізується у складі математичної моделі середнього значення MVEM та досліджується у середовищі Simulink.

Загальна структура алгоритму електронного керування наведена на рисунку 2.3. Алгоритм передбачає послідовну обробку сигналів датчиків, визначення режиму роботи двигуна, розрахунок масової витрати повітря, визначення необхідної кількості палива та формування сигналів керування форсунками. Корекція подачі палива здійснюється за сигналом λ -зонда у замкненому контурі автоматичного регулювання.

У процесі роботи системи до електронного блока керування надходять сигнали датчика частоти обертання колінчастого вала, датчика положення дросельної заслінки, датчика абсолютного тиску у впускному колекторі та λ -зонда. На основі отриманої інформації ECU визначає поточний режим роботи двигуна та формує сигнали керування системою упорскування палива.

Однією з основних задач алгоритму є визначення необхідної кількості палива для формування паливо-повітряної суміші. Розрахунок подачі палива здійснюється на основі масової витрати повітря, що надходить до циліндрів двигуна.

У математичній моделі використовується стехіометричний принцип формування суміші, при якому співвідношення повітря та палива відповідає значенню:

$$AFR_{stoich}=14.7$$

Масова витрата палива визначається співвідношенням:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{m}_{air}}{ARF_{stroch}}$$

де: $\dot{m}_{fuel}$ — масова витрата палива; $\dot{m}_{air}$ — масова витрата повітря.

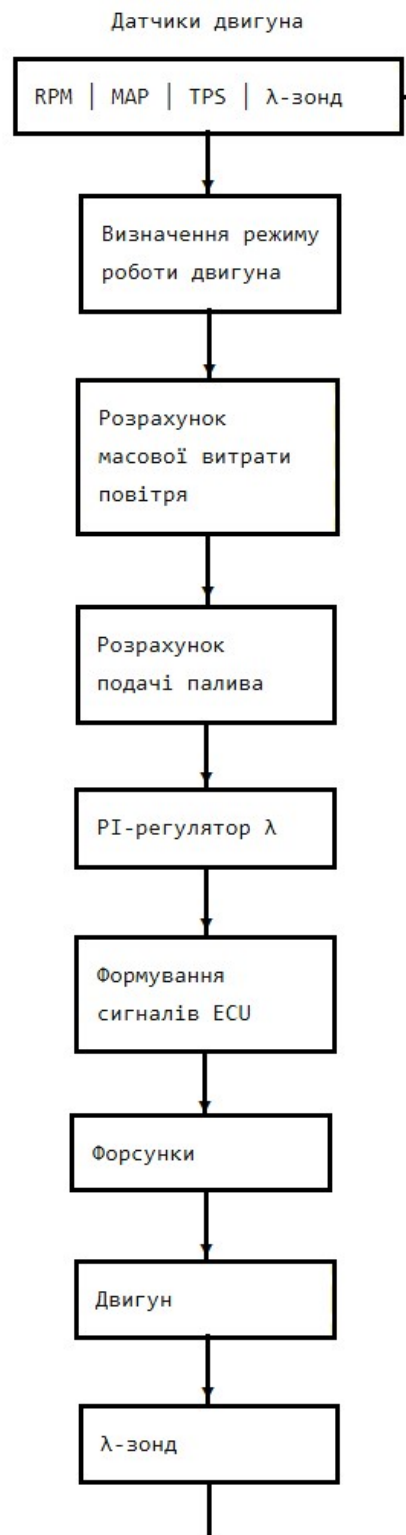


Рисунок 2.3 - Загальна структура алгоритму електронного керування

Після визначення необхідної кількості палива електронний блок керування формує тривалість імпульсу впорскування. Час відкриття форсунки визначається відповідно до продуктивності форсунки:

$$t_{inj} = \frac{m_f}{K_f}$$

де: m_f - маса палива; K_f - коефіцієнт продуктивності форсунки.

Таким чином, зі збільшенням витрати повітря система автоматично збільшує подачу палива, забезпечуючи підтримання необхідного складу суміші. У процесі моделювання тривалість імпульсу впорскування використовується як основний керуючий параметр системи електронного керування.

Для забезпечення стабільності роботи двигуна алгоритм містить підсистему автоматичної корекції складу паливо-повітряної суміші. Контроль якості суміші здійснюється за допомогою λ -зонда, який визначає коефіцієнт надлишку повітря:

$$\lambda = \frac{ARF}{ARF_{stoich}}$$

При значенні:

$$\lambda=1$$

забезпечується стехіометричний склад суміші, який відповідає найбільш ефективному режиму роботи бензинового двигуна.

Регулювання коефіцієнта λ реалізується за принципом негативного зворотного зв'язку. Поточне значення λ порівнюється із заданим значенням, після чого формується сигнал похибки:

$$e(t) = \lambda_{ref} - \lambda$$

Отриманий сигнал похибки надходить до ПІ-регулятора, який формує коригувальний вплив:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

де: K_p - коефіцієнт пропорційної складової; K_i - коефіцієнт інтегральної складової.

Пропорційна складова забезпечує швидке реагування системи на зміну складу суміші, а інтегральна складова компенсує статичну похибку регулювання. Якщо суміш є збідненою ($\lambda > 1$), регулятор збільшує тривалість

імпульсу впорскування. У випадку збагаченої суміші ($\lambda < 1$) подача палива зменшується.

Структура замкненого контуру регулювання коефіцієнта λ наведена на рисунку 2.4. Замкнений контур включає задавальний сигнал, суматор, ПІ-регулятор, електронний блок керування, систему впорскування палива, математичну модель двигуна та λ -зонд. Така структура забезпечує автоматичну компенсацію зовнішніх збурень та стабілізацію складу паливо-повітряної суміші при зміні режимів роботи двигуна.

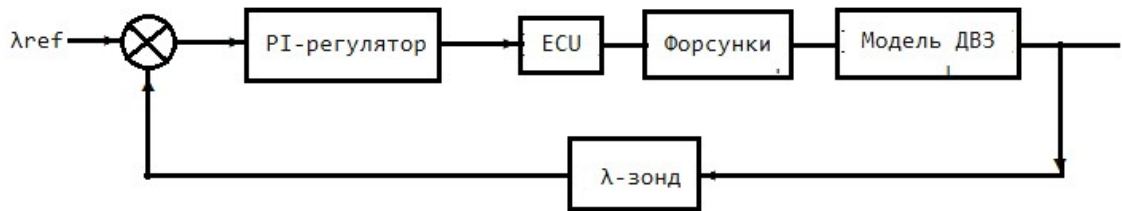


Рисунок 2.4 - Структура замкненого контуру регулювання коефіцієнта λ

Для перевірки працездатності розробленого алгоритму виконано приклад розрахунку параметрів електронного керування для чотирициліндрового бензинового двигуна робочим об'ємом 2.4 л. Під час розрахунку приймаються такі параметри: частота обертання двигуна $n=3000$ об/хв, тиск у впускному колекторі $P_{\text{ман}}=60$ кПа, коефіцієнт наповнення $\eta_v=0.85$, температура повітря $T=300$ К.

Масова витрата повітря визначається за співвідношенням:

$$\dot{m}_{\text{air}} = \eta_v \frac{V_d n P_{\text{ман}}}{120 R T}$$

де: 120 - коефіцієнт для чотиритактного двигуна; n - частота обертання у об/хв.

Після підстановки параметрів двигуна отримано:

$$\dot{m}_{\text{air}} = 0.85 \cdot \frac{2.4 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 \cdot 60000}{120 \cdot 287 \cdot 300}$$

$$\dot{m}_{\text{air}} \approx 0.035 \text{ кг/с}$$

Необхідна масова витрата палива становить:

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{ARF_{\text{stroch}}}$$

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{0.035}{14.7} \approx 0.00238 \text{ кг/с}$$

або:

$$\dot{m}_{fuel} \approx 2.38 \text{ г/с.}$$

Оскільки двигун має чотири циліндри, маса палива на один цикл одного циліндра визначається як:

$$m_{f,inj} = \frac{\dot{m}_{fuel}}{N_{inj}}$$

де: N_{inj} - кількість циклів упорскування за секунду.

Для чотиритактного двигуна:

$$N_{inj} = \frac{n}{120} \cdot 4 = \frac{3000}{120} \cdot 4 = 100$$

$$m_{f,inj} = \frac{2.38}{100} = 0.0238$$

Для чотирициліндрового двигуна тривалість імпульсу впорскування при заданій продуктивності форсунки становить:

$$t_{inj} = \frac{m_{f,inj}}{K_f} = \frac{0.0238}{0.02} \approx 1.19$$

$$t_{inj} \approx 1.19 \text{ мс}$$

Отримане значення відповідає типовим режимам роботи систем електронного упорскування бензинових двигунів та підтверджує працездатність розробленого алгоритму керування.

У процесі моделювання ПІ-регулятор виконує автоматичну корекцію часу впорскування залежно від сигналу λ -зонда. Наприклад, при значенні:

$$\lambda_{ref}=1 \quad \lambda=1.08$$

похибка регулювання становить:

$$e(t)=1-1.08=-0.08$$

Від'ємне значення похибки свідчить про збіднення суміші. У такому випадку ПІ-регулятор збільшує тривалість імпульсу впорскування для компенсації нестачі палива для повернення коефіцієнта λ до стехіометричного значення.

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблений алгоритм електронного керування дозволяє досліджувати динаміку замкненої системи керування двигуном, аналізувати перехідні процеси при зміні навантаження та оцінювати якість автоматичного регулювання складу паливо-повітряної суміші. Реалізація алгоритму у середовищах MATLAB та Simulink забезпечує можливість подальшого дослідження характеристик системи та оптимізації параметрів регулятора.

2.4 Реалізація моделі у середовищі Simulink

Для перевірки працездатності розробленої системи електронного керування двигуном внутрішнього згоряння було створено комп'ютерну модель у середовищі Simulink. Використання технології модельно-орієнтованого проектування дозволяє реалізувати математичну модель двигуна, алгоритми керування та систему збору результатів у межах єдиного програмного середовища.

Програмна реалізація математичної моделі двигуна внутрішнього згоряння виконана засобами MATLAB та Simulink із використанням автоматично сформованої структури блоків. Повний текст програмних скриптів, що забезпечують побудову моделі та налаштування її параметрів, наведено у додатку А.

2.4.1 Загальна структура Simulink-моделі

Загальна структура моделі відповідає архітектурі замкненої системи електронного керування двигуном внутрішнього згоряння. та наведена на рисунку 2.5.

Модель побудована за модульним принципом та складається з двох основних функціональних підсистем: ECU Subsystem та Engine Model Subsystem.

Підсистема ECU реалізує алгоритм електронного керування та формує сигнал керування паливоподачею, тоді як Engine Model відтворює фізичні процеси, що відбуваються у двигуні. Вихідні параметри двигуна, зокрема

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

коефіцієнт надлишку повітря λ , використовуються для організації замкненого контуру регулювання та формування сигналу зворотного зв'язку.

Структура моделі реалізує класичний принцип замкненого автоматичного керування, при якому вихідні параметри двигуна використовуються для корекції керуючих впливів. Основним регульованим параметром виступає коефіцієнт надлишку повітря λ , який визначає якість формування паливо-повітряної суміші.

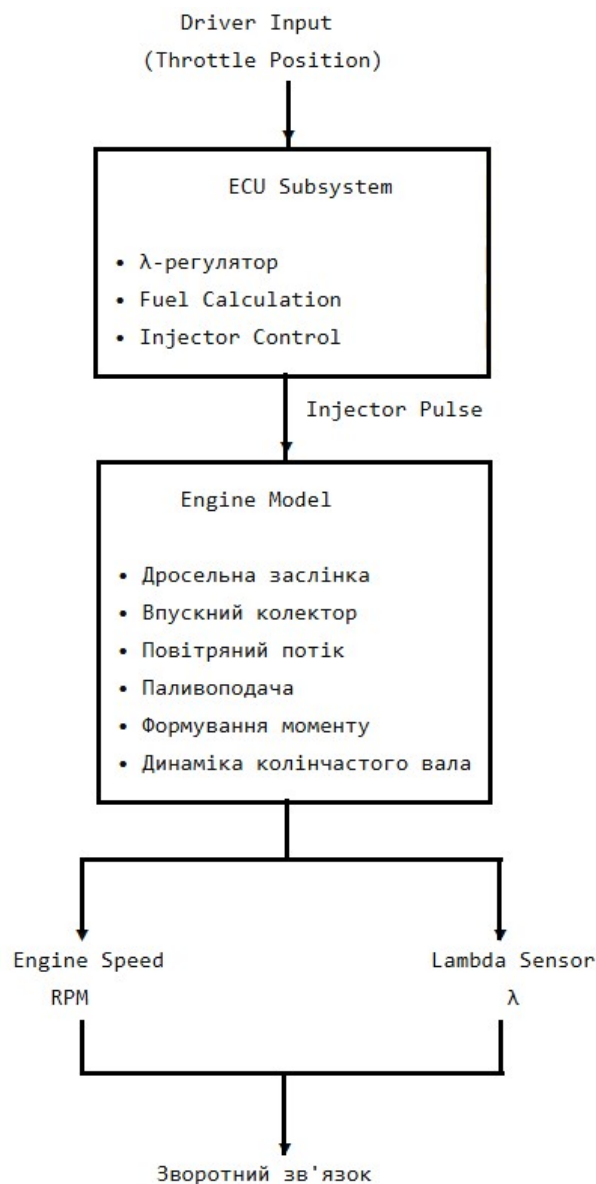


Рисунок 2.5 - Загальна структура Simulink-моделі

Верхній рівень моделі містить лише основні функціональні модулі та зв'язки між ними, що дозволяє спростити структуру моделі та підвищити

зручність її дослідження. Детальна реалізація окремих алгоритмів прихована всередині відповідних підсистем.

Верхній рівень моделі

На верхньому рівні реалізовано загальну логіку функціонування системи керування. Вхідним впливом є сигнал положення дросельної заслінки, який формується блоком Step та імітує зміну режиму роботи двигуна.

Сигнал від дросельної заслінки надходить до підсистеми ECU, де виконується розрахунок необхідної кількості палива та формування керуючого сигналу для форсунок. Далі сформований сигнал подається до математичної моделі двигуна, яка обчислює поточні значення швидкості обертання колінчастого вала, витрати повітря та коефіцієнта λ .

Отримані результати використовуються для побудови часових характеристик та формування сигналу зворотного зв'язку.

Підсистема ECU

Підсистема ECU реалізує функції електронного блока керування двигуном та виконує розрахунок параметрів паливоподачі на основі поточного стану двигуна.

Основним елементом підсистеми є PI-регулятор, який мінімізує похибку між заданим та фактичним значеннями коефіцієнта λ . Вихід регулятора використовується для корекції розрахованої кількості палива. Для обмеження фізично можливих значень тривалості імпульсу впорскування використовується блок Saturation.

На рисунку 2.6 наведено структуру підсистеми ECU, яка моделює роботу електронного блока керування двигуном.

Основною функцією підсистеми є підтримання заданого складу паливо-повітряної суміші шляхом корекції тривалості імпульсу впорскування палива.

Для цього формується похибка між заданим значенням λ_{ref} та поточним значенням λ , отриманим із системи зворотного зв'язку. Похибка обробляється PI-регулятором, після чого виконується розрахунок необхідної кількості палива та формування керуючого сигналу Injector Pulse.

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення фізичної реалізованості моделі використовується блок обмеження керуючого сигналу.



Рисунок 2.6 - Структура підсистеми ECU

Підсистема Engine Model

Структура підсистеми наведена на рисунку 2.7.

Підсистема Engine Model реалізує математичну модель двигуна внутрішнього згоряння та описує процес перетворення паливно-повітряної суміші у механічну енергію.

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

До складу підсистеми входять моделі паливоподачі, дросельної заслінки, впускного колектора, формування повітряного потоку, паливо-повітряної суміші, крутного моменту та динаміки колінчастого вала.

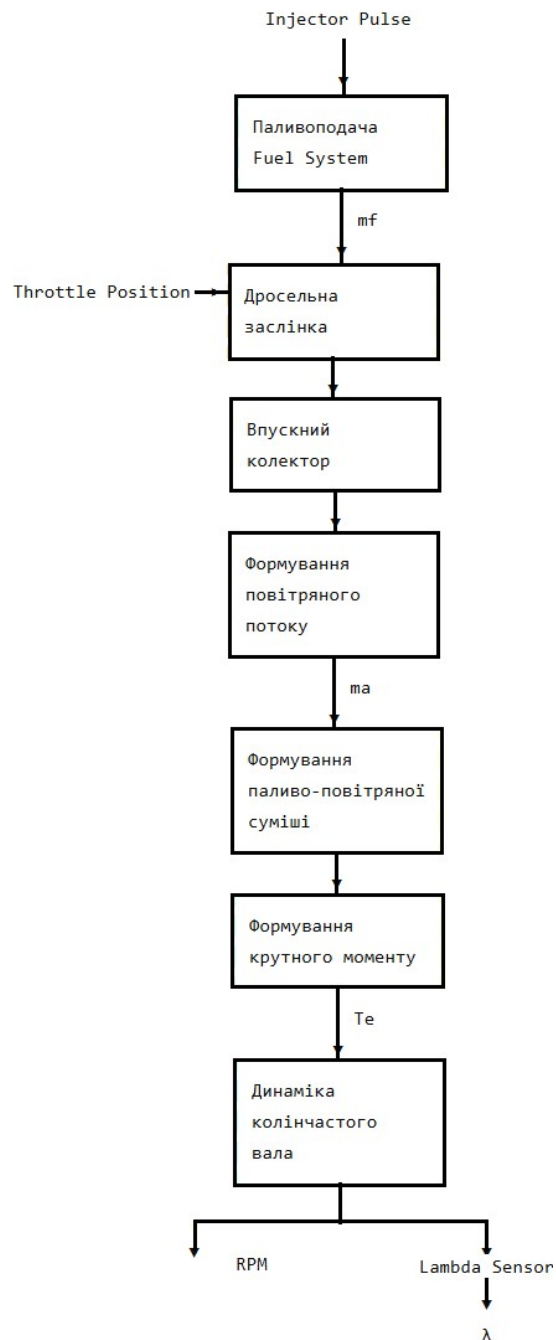


Рисунок 2.7 - Структура підсистеми Engine Model

Вхідними сигналами підсистеми є положення дросельної заслінки та тривалість імпульсу впорскування палива. Результатом моделювання є поточні значення частоти обертання колінчастого вала та коефіцієнта надлишку повітря

λ , які використовуються для аналізу режимів роботи двигуна та організації зворотного зв'язку в системі керування.

Організація зворотних зв'язків

Однією з головних особливостей розробленої моделі є реалізація замкненого контуру регулювання складу паливо-повітряної суміші. З цією метою у моделі використовується підсистема λ -зонда, яка формує сигнал зворотного зв'язку на основі поточного режиму роботи двигуна.

Принцип роботи замкненого контуру наведений на рисунку 2.8

Під час моделювання основним регульованим параметром системи є коефіцієнт надлишку повітря λ , який характеризує співвідношення між фактичною та стехіометрично необхідною кількістю повітря для повного згоряння палива, що відповідає значенню $\lambda \approx 1$.

На вході системи задається еталонне значення λ_{ref} , яке порівнюється з поточним значенням λ , отриманим від моделі датчика кисню. За результатами порівняння формується сигнал похибки регулювання, який надходить до підсистеми ECU. У складі електронного блока керування реалізовано ПІ-регулятор, що забезпечує формування коригувального впливу на систему паливоподачі та визначає тривалість імпульсу впорскування палива Injector Pulse.

Сформований керуючий сигнал надходить до підсистеми Engine Model, де здійснюється моделювання процесів сумішоутворення, формування крутного моменту та динаміки колінчастого вала. У результаті розрахунку визначаються поточні значення частоти обертання двигуна та коефіцієнта надлишку повітря λ .

Сигнал λ через контур зворотного зв'язку повертається до підсистеми ECU, забезпечуючи автоматичну корекцію паливоподачі відповідно до поточного режиму роботи двигуна. Така структура дозволяє підтримувати склад паливо-повітряної суміші поблизу стехіометричного значення та забезпечує стійку роботу системи керування в режимах запуску, холостого ходу, розгону та зміни навантаження.

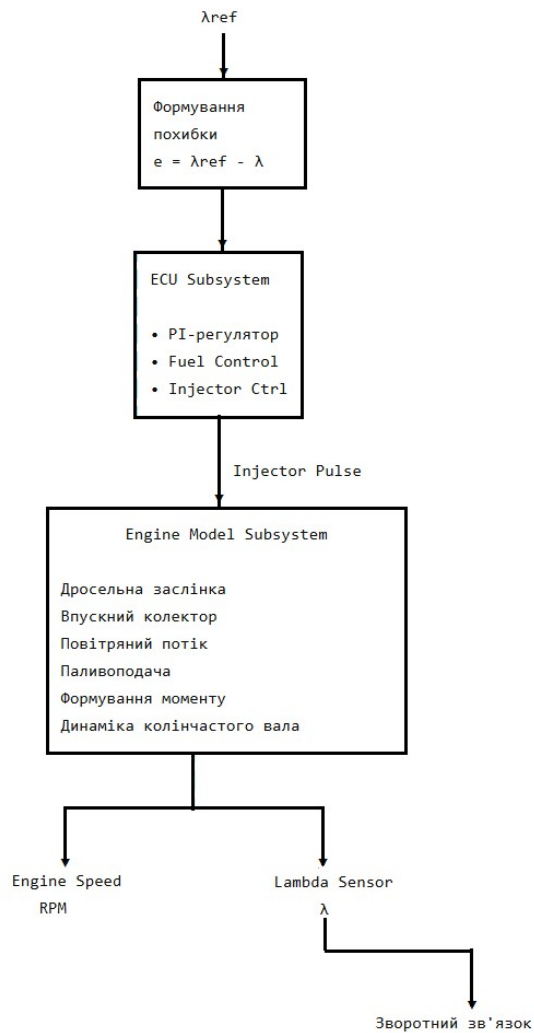


Рисунок 2.8 - Організація замкненого контуру керування

Запропонована структура забезпечує можливість дослідження динаміки системи керування у режимах запуску двигуна, холостого ходу, розгону, зміни навантаження та номінальної роботи, що створює основу для подальшого проведення комп'ютерних експериментів і розробки віртуального стенду дослідження режимів роботи двигуна.

2.4.2 Реалізація функціональних модулів

Після формування загальної структури системи електронного керування було виконано реалізацію її основних функціональних модулів у середовищі Simulink. Модель побудована за модульним принципом та складається з окремих підсистем, кожна з яких відповідає певній функції електронної системи керування двигуном внутрішнього згоряння. Такий підхід забезпечує простоту

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

модифікації моделі, можливість незалежного налаштування окремих блоків та підвищує наочність процесу дослідження.

До складу розробленої моделі входять три основні функціональні модулі:

- модуль електронного блока керування ECU;
- модуль математичної моделі двигуна Engine Model;
- модуль датчика кисню (λ -зонда).

Взаємодія між підсистемами здійснюється за допомогою стандартних сигнальних ліній Simulink, що забезпечують передачу поточних значень параметрів двигуна та керуючих сигналів.

Реалізація модуля ECU

Модуль ECU призначений для реалізації алгоритму електронного керування двигуном та формування сигналів управління паливоподачею. Основною функцією підсистеми є підтримання необхідного складу паливо-повітряної суміші шляхом регулювання тривалості імпульсу впорскування палива.

Структурно модуль ECU складається з блоку формування похибки регулювання, PI-регулятора, блоку розрахунку паливоподачі та блоку обмеження керуючого сигналу.

На входи підсистеми надходять задане значення коефіцієнта надлишку повітря λ_{ref} , поточне значення λ , отримане від моделі λ -зонда, а також сигнал положення дросельної заслінки.

У блоці формування похибки виконується обчислення різниці між заданим та фактичним значеннями коефіцієнта надлишку повітря:

$$e(t) = \lambda_{ref} - \lambda(t)$$

Отримана похибка надходить до PI-регулятора, який формує коригувальний вплив на систему паливоподачі. Для реалізації регулятора використано стандартний блок PID Controller Simulink із відключеною диференційною складовою. Передавальна функція регулятора має вигляд:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

У результаті роботи регулятора формується корекційний коефіцієнт, який використовується для визначення необхідної тривалості імпульсу впорскування палива.

Для запобігання виходу керуючого сигналу за фізично допустимі межі після регулятора встановлено блок Saturation. Використання даного блока дозволяє врахувати реальні обмеження системи впорскування та забезпечує стійкість моделювання.

Структурна реалізація підсистеми ECU у середовищі Simulink наведена на рисунку 2.9. Підсистема побудована на основі стандартних блоків бібліотеки Simulink та реалізує класичний алгоритм замкненого регулювання складу паливо-повітряної суміші.

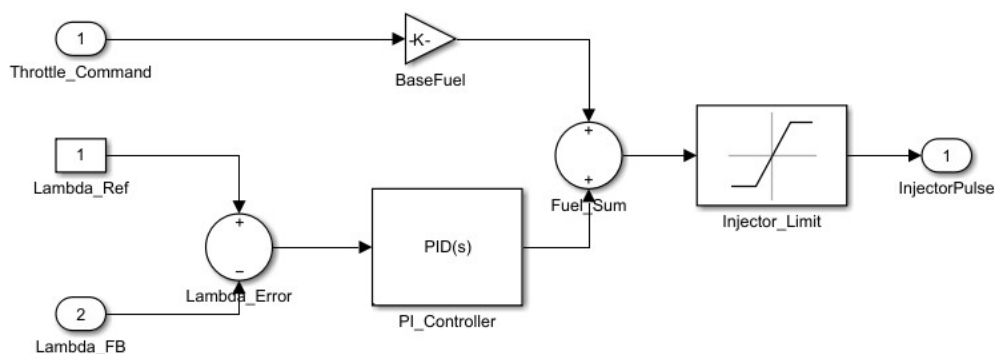


Рисунок 2.9 - Реалізація підсистеми ECU у Simulink

Наведена структура відповідає типовій архітектурі електронних систем керування двигунами та дозволяє досліджувати вплив параметрів регулятора на якість підтримання коефіцієнта надлишку повітря.

Реалізація модуля Engine Model

Підсистема Engine Model реалізує математичну модель чотирициліндрового бензинового двигуна внутрішнього згоряння. Вона забезпечує відтворення основних фізичних процесів, що відбуваються у впускному тракті, системі сумішоутворення та механічній частині двигуна.

Структура підсистеми включає послідовно з'єднані функціональні блоки:

- дросельна заслінка;
- впускний колектор;

- формування повітряного потоку;
- паливоподача;
- формування паливо-повітряної суміші;
- формування крутного моменту;
- динаміка колінчастого вала.

Модель дросельної заслінки

Першим функціональним елементом математичної моделі двигуна є модель дросельної заслінки, структура якої наведена на рисунку 2.10.

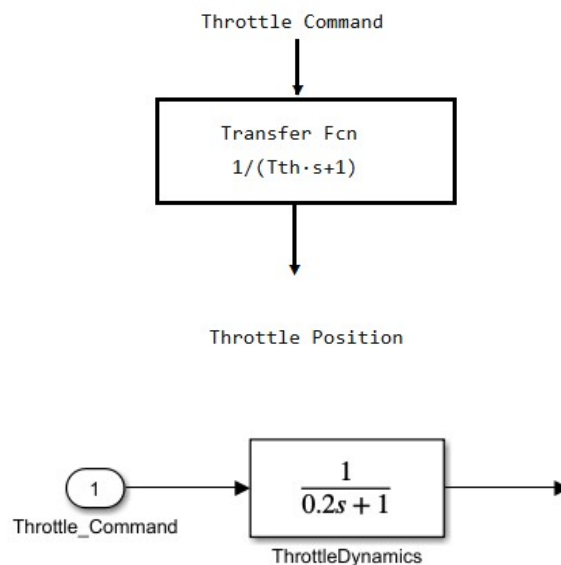


Рисунок 2.10 - Реалізація моделі дросельної заслінки

Для врахування інерційності електромеханічного приводу використано аперіодичну ланку першого порядку з передавальною функцією:

$$G_{th}(s) = \frac{1}{T_{th}(s) + 1}$$

де T_{th} - стала часу приводу дросельної заслінки.

Вихідним сигналом блока є поточне положення дросельної заслінки, яке використовується під час розрахунку витрати повітря.

Модель впускного колектора

Реалізація моделі впускного колектора наведена на рисунку 2.11.

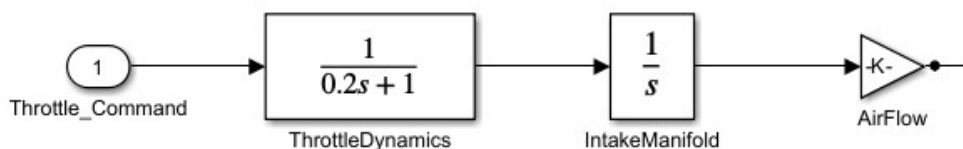


Рисунок 2.11 – Реалізація моделі впускного колектора

У моделі використано інтегруючу ланку, яка забезпечує накопичення повітряної маси у впускному колекторі відповідно до рівняння матеріального балансу:

$$\frac{dm_a}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}$$

Таким чином враховується динамічний характер процесів газообміну в двигуні.

Формування повітряного потоку

Після визначення параметрів впускного колектора виконується розрахунок масової витрати повітря, що надходить до циліндрів двигуна.

Структурна схема реалізації блоку формування повітряного потоку наведена на рисунку 2.12.



Рисунок 2.12 – Реалізація моделі формування повітряного потоку

Блок забезпечує визначення поточної масової витрати повітря на основі тиску у впускному колекторі та параметрів двигуна. Отримане значення використовується під час формування паливо-повітряної суміші.

Модель паливоподачі

У блоці паливоподачі реалізовано модель форсунок, яка перетворює сигнал Injector Pulse у масову витрату палива.

Реалізація модуля паливоподачі наведена на рисунку 2.13.

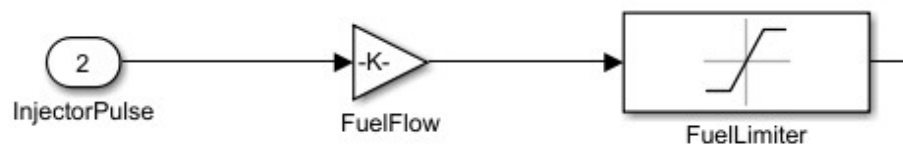


Рисунок 2.13 - Реалізація моделі паливоподачі

Блок Gain перетворює тривалість імпульсу впорскування на масову витрату палива відповідно до продуктивності форсунок, прийнятої для досліджуваного двигуна.

Математично цей процес описується залежністю:

$$m_f = K_{inj} \cdot PW$$

де PW - тривалість імпульсу впорскування; K_{inj} - коефіцієнт продуктивності форсунки.

Формування паливо-повітряної суміші

На основі розрахованих масових витрат повітря та палива визначається коефіцієнт надлишку повітря:

$$\lambda = \frac{m_a}{L_0 m_f}$$

де $L_0 = 14.7$ - стехіометричне співвідношення повітря та бензину.

Структурна схема обчислення коефіцієнта надлишку повітря наведена на рисунку 2.14.

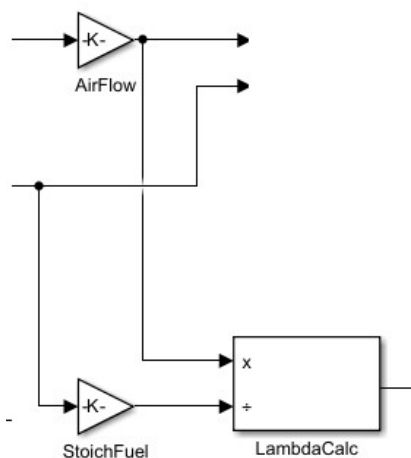


Рисунок 2.14 - Реалізація модуля обчислення коефіцієнта λ

Розраховане значення λ є одним із головних параметрів моделі та використовується як сигнал зворотного зв'язку для системи електронного керування.

Формування крутного моменту

Отримані значення витрати повітря та коефіцієнта надлишку повітря використовуються для визначення ефективного крутного моменту двигуна.

Реалізація модуля формування крутного моменту наведена на рисунку 2.15.

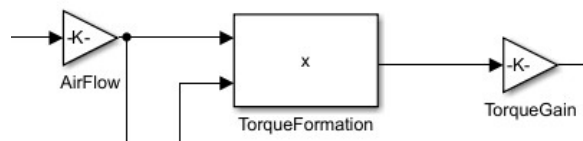


Рисунок 2.15 – Реалізація модуля формування крутного моменту

Формування крутного моменту здійснюється відповідно до співвідношення:

$$T_e = K_t \cdot m_a \cdot f(\lambda)$$

де K_t - коефіцієнт перетворення масової витрати повітря в крутний момент.

Функція $f(\lambda)$ враховує вплив складу суміші на ефективність процесу згоряння.

Модель динаміки колінчастого вала

Розрахований крутний момент надходить до блоку динаміки колінчастого вала, де виконується моделювання механічного руху двигуна.

Рівняння динаміки має вигляд:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L$$

де: J - приведений момент інерції двигуна; T_e - ефективний крутний момент; T_L - момент навантаження.

Структурна схема реалізації моделі наведена на рисунку 2.16.

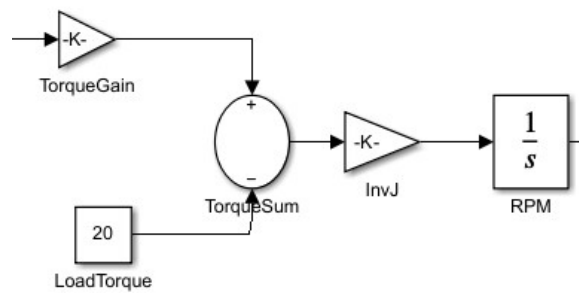


Рисунок 2.16 - Реалізація моделі динаміки колінчастого вала

Інтегрування рівняння руху дозволяє отримати поточну кутову швидкість та частоту обертання двигуна. Саме цей параметр використовується для оцінювання динамічних властивостей системи під час проведення комп'ютерних експериментів.

Реалізація модуля λ -зонда

Для організації замкненого контуру регулювання у моделі реалізовано окремий модуль λ -зонда, який виконує функції датчика кисню відпрацьованих газів.

У реальних системах керування сигнал датчика кисню формується із певною затримкою, обумовленою процесами транспортування відпрацьованих газів та інерційністю чутливого елемента. З метою врахування цього явища у моделі використано аперіодичну ланку першого порядку.

Реалізація моделі λ -зонда наведена на рисунку 2.17.

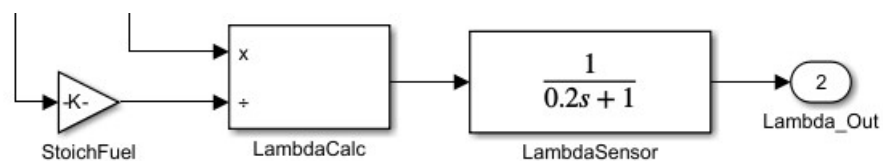


Рисунок 2.17 – Реалізація моделі λ -зонда

Передавальна функція датчика має вигляд:

$$G_{\lambda}(s) = \frac{1}{T_{\lambda}(s) + 1}$$

де T_{λ} - стала часу датчика кисню.

Вихідним сигналом підсистеми є поточне значення коефіцієнта надлишку повітря λ , яке використовується для формування сигналу зворотного зв'язку.

Використання аперіодичної ланки першого порядку дозволяє врахувати інерційність реального датчика кисню та затримку формування сигналу зворотного зв'язку, що суттєво впливає на якість регулювання складу суміші.

Параметризація моделі

Для забезпечення адекватності моделювання у роботі виконано параметризацію моделі відповідно до характеристик чотирициліндрового бензинового двигуна робочим об'ємом 2.4 л.

Основні параметри математичної моделі наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні параметри моделі двигуна

Параметр	Позначення	Значення
Робочий об'єм двигуна	V_d	$2.4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
Кількість циліндрів	N_c	4
Об'єм впускного колектора	V_{man}	$3.0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
Коефіцієнт наповнення	η_v	0.85
Атмосферний тиск	P_{atm}	101325 Па
Температура повітря	T	300 К
Газова стала	R	287 Дж/(кг·К)
Момент інерції	J	0.18 кг·м ²
Коефіцієнт втрат	B	0.02
Стехіометричне AFR	AFR_{stoich}	14.7
Коефіцієнт форсунки	K_f	0.02 г/мс

Параметри PI-регулятора підбиралися експериментально у процесі моделювання. У роботі використано такі значення:

$$K_p=0.8$$

$$K_i=6$$

Вибрані параметри забезпечують задовільну швидкодію системи та мінімальну статичну похибку регулювання.

Для обмеження некоректних режимів роботи у моделі передбачено:

- обмеження мінімального та максимального часу впорскування;
- обмеження тиску у впускному колекторі;

- обмеження максимальної частоти обертання двигуна.

Під час параметризації моделі прийнято такі припущення:

- температура двигуна є сталою;
- параметри палива не змінюються;
- циліндри двигуна працюють рівномірно;
- процес згоряння є стабільним;
- механічні втрати описуються лінійною залежністю.

Прийняті припущення дозволяють спростити математичну модель та зосередити увагу на дослідженні динаміки системи автоматичного керування.

Налаштування моделювання

Для проведення досліджень у середовищі Simulink виконано налаштування параметрів моделювання відповідно до характеру досліджуваних процесів.

Моделювання проводилося у часовій області з використанням безперервного solver. Для інтегрування системи диференціальних рівнянь використовувався solver ode45, який забезпечує достатню точність моделювання динамічних процесів двигуна.

Основні параметри моделювання наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри моделювання

Параметр	Значення
Тип моделювання	Continuous
Solver	ode45
Час моделювання	20 с
Максимальний крок інтегрування	0.001 с
Початкова частота обертання	800 об/хв
Початковий тиск у колекторі	60 кПа

Для дослідження перехідних процесів у модель введено ступінчасті зміни навантаження та положення дросельної заслінки. Це дозволяє оцінити:

- швидкодію системи;

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

- стабільність регулювання;
- якість перехідного процесу;
- точність підтримання коефіцієнта λ .
- У процесі моделювання контролювалися такі основні параметри:
- частота обертання двигуна;
- коефіцієнт надлишку повітря λ ;
- тиск у впускному колекторі;
- масова витрата повітря;
- тривалість імпульсу впорскування;
- крутний момент двигуна.

Результати моделювання відображаються за допомогою блоків Scope у вигляді часових графіків. Це дозволяє виконати аналіз перехідних процесів та оцінити ефективність роботи системи електронного керування.

Узагальнена структура підсистеми Engine Model, сформована на основі розглянутих функціональних модулів, наведена на рисунку 2.18.

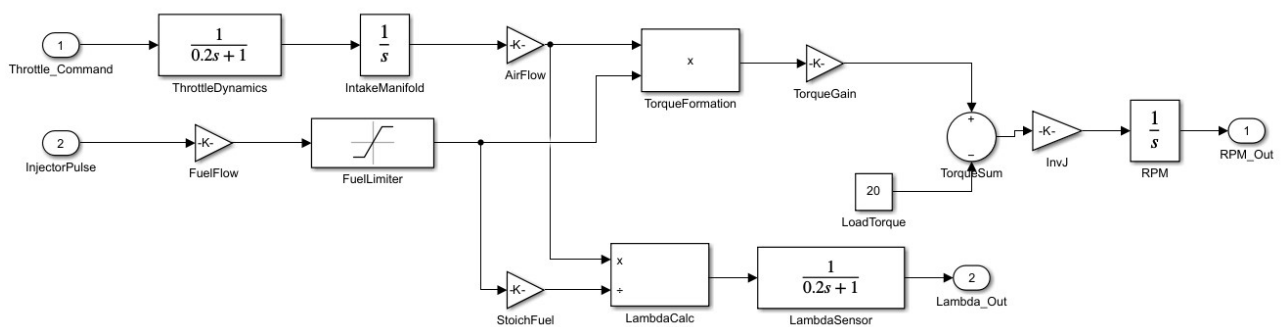


Рисунок 2.18 – Узагальнена структура підсистеми Engine Model

Таким чином, у середовищі Simulink реалізовано модульну математичну модель чотирициліндрового двигуна внутрішнього згоряння, яка забезпечує можливість дослідження процесів сумішоутворення, формування крутного моменту та зміни частоти обертання колінчастого вала в різних режимах роботи. Реалізована структура стала основою для проведення комп'ютерного

моделювання та подальшої розробки віртуального стенду дослідження режимів роботи двигуна.

Розроблена модель містить підсистеми формування повітряного потоку, паливоподачі, розрахунку коефіцієнта надлишку повітря та формування крутного моменту двигуна. Загальний вигляд структурної схеми моделі та склад її функціональних блоків наведено у додатку Б.

2.4.3 Налаштування моделювання

Після реалізації функціональних модулів системи електронного керування двигуном у середовищі Simulink було виконано налаштування параметрів моделювання, що забезпечують коректність чисельного розв'язання математичної моделі та отримання достовірних результатів комп'ютерного експерименту. Налаштування включає вибір методу інтегрування, встановлення параметрів розрахунку та визначення початкових умов роботи двигуна.

Оскільки розроблена модель містить інтегруючі ланки, аперіодичні елементи, нелінійні залежності та контури зворотного зв'язку, які описуються системою диференціальних рівнянь, якість результатів моделювання значною мірою залежить від правильного вибору чисельного методу інтегрування.

Вибір solver ode45

Для проведення досліджень у роботі використано чисельний інтегратор ode45, який є одним із базових методів розв'язання звичайних диференціальних рівнянь у середовищі Simulink.

Метод ode45 реалізує алгоритм Рунге–Кутти четвертого-п'ятого порядку із автоматичним вибором кроку інтегрування. Перевагою цього методу є достатньо висока точність розрахунків при помірних обчислювальних витратах, що особливо важливо для моделей із нелінійними залежностями.

У розробленій моделі інтегрування використовується для розрахунку:

- динаміки впускного колектора;
- зміни маси повітря у впускному тракті;
- динаміки дросельної заслінки;

- моделі λ -зонда;
- динаміки колінчастого вала.

Використання ode45 є доцільним для даної роботи, оскільки математична модель двигуна не належить до жорстких систем диференціальних рівнянь, а характерні сталі часу окремих підсистем перебувають в одному порядку величин.

Налаштування інтегратора виконується у вікні Configuration Parameters середовища Simulink.

Застосування інтегратора зі змінним кроком дозволяє автоматично збільшувати або зменшувати крок розрахунку залежно від швидкості зміни параметрів системи, що забезпечує раціональне використання обчислювальних ресурсів.

Параметри інтегрування

Для забезпечення відтворення перехідних процесів у системі керування двигуном було обрано часовий інтервал моделювання, достатній для виходу двигуна на усталений режим після запуску або зміни навантаження.

Початок моделювання прийнято рівним нулю, що відповідає моменту запуску двигуна або початку експерименту. Тривалість моделювання 30 с дозволяє дослідити як перехідні процеси, так і вихід системи на усталений режим.

Основні параметри моделювання наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри чисельного інтегрування

Параметр	Значення
Тип solver	Variable-step
Метод інтегрування	ode45
Початковий час	0 с
Кінцевий час	30 с
Relative tolerance	$1 \cdot 10^{-3}$
Absolute tolerance	auto
Max step size	auto
Min step size	auto

Для окремих експериментів допускається зміна часу моделювання:

- запуск двигуна – 10 с;
- холостий хід – 20 с;
- розгін – 15 с;
- зміна навантаження – 20 с;
- номінальний режим – 30 с.

Значення відносної похибки інтегрування 10^{-3} забезпечує прийнятний баланс між точністю розрахунків та швидкістю моделі.

Початкові умови моделювання

Для отримання фізично коректних результатів усім інтегруючим блокам моделі задаються початкові умови, що відповідають стану двигуна перед запуском. У середовищі Simulink початкові умови задаються безпосередньо у властивостях блоків Integrator або через змінні MATLAB Workspace.

Для режиму холостого ходу початкові оберти можуть задаватися на рівні 800–900 об/хв, що дозволяє скоротити тривалість перехідного процесу під час дослідження усталених режимів.

Для базового режиму запуску двигуна прийнято такі значення початкових параметрів.

Таблиця 2.4 – Початкові умови моделювання

Параметр	Позначення	Значення
Частота обертання двигуна	n_0	0 об/хв
Кутова швидкість	ω_0	0 рад/с
Положення дросельної заслінки	α_0	5 %
Тиск у впускному колекторі	p_0	101 кПа
Маса повітря у колекторі	m_{a0}	0,02 кг
Масова витрата палива	m_{f0}	0 кг/с
Коефіцієнт λ	λ_0	1,0
Момент навантаження	T_{L0}	0 Н·м

У моделі динаміки колінчастого вала початкове значення кутової швидкості визначається співвідношенням

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60}$$

де: n_0 - початкова частота обертання двигуна, об/хв; ω_0 - початкова кутова швидкість, рад/с.

Наприклад, для режиму холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot 850}{60} = 88.96 \text{ рад/с.}$$

Початкові умови можуть автоматично змінюватися залежно від вибраного режиму роботи двигуна через графічний інтерфейс віртуальної лабораторії, що розглядається у наступному підрозділі.

Підготовка до проведення комп'ютерного експерименту

Після налаштування структури моделі, параметрів інтегрування та початкових умов система готова до проведення комп'ютерного моделювання. Запуск розрахунку здійснюється засобами Simulink або через MATLAB-скрипт автоматичного створення та запуску моделі.

Результатами моделювання є часові залежності основних параметрів двигуна:

- частоти обертання колінчастого вала;
- крутного моменту;
- масової витрати повітря;
- масової витрати палива;
- коефіцієнта надлишку повітря λ ;
- положення дросельної заслінки;
- сигналу керування паливоподачею.

Отримані дані використовуються для аналізу динамічних характеристик системи електронного керування та дослідження режимів роботи двигуна у складі розробленого віртуального стенду. Таким чином завершено реалізацію математичної моделі у середовищі Simulink та створено основу для проведення серії комп'ютерних експериментів, результати яких наведено у наступному

підрозділі. Отримані результати моделювання та відповідні графічні залежності наведено у додатку В.

2.5 Розробка віртуального стенду дослідження режимів роботи двигуна

2.5.1 Архітектура віртуальної лабораторії

Віртуальна лабораторія призначена для дослідження процесів функціонування електронної системи впорскування палива бензинового двигуна внутрішнього згоряння в умовах комп'ютерного моделювання. Реалізація лабораторії виконана засобами MATLAB та Simulink, що дозволяє проводити експериментальні дослідження без використання реального обладнання та забезпечує можливість багаторазового відтворення різних режимів роботи двигуна.

Архітектура віртуальної лабораторії побудована за модульним принципом і включає п'ять основних функціональних підсистем: модуль формування вхідних впливів, електронний блок керування двигуном (ECU), математичну модель двигуна, підсистему збору даних та графічний інтерфейс користувача. Така структура забезпечує гнучкість розробки, спрощує модернізацію окремих компонентів системи та дозволяє розширювати функціональні можливості лабораторії без зміни її загальної архітектури.

Початкові керуючі сигнали формуються модулем Driver Input, який задає положення дросельної заслінки відповідно до вибраного режиму роботи двигуна. Сформований сигнал використовується як вхідний параметр для математичної моделі двигуна та одночасно передається до електронного блока керування.

Електронний блок керування ECU реалізує алгоритм дозування палива. Основою його роботи є визначення необхідної тривалості імпульсу відкриття форсунки залежно від поточного навантаження двигуна та значення коефіцієнта надлишку повітря λ . Для підтримання оптимального складу паливоповітряної суміші використовується замкнений контур регулювання з пропорційно-

інтегральним регулятором. Результатом роботи ECU є сигнал Injector Pulse, який визначає кількість палива, що подається до двигуна.

Математична модель двигуна виконує імітацію основних фізичних процесів, характерних для системи електронного впорскування. У моделі реалізовано розрахунок повітряної витрати через дросельну заслінку, формування паливної витрати, визначення коефіцієнта надлишку повітря λ , розрахунок крутного моменту та динаміки зміни частоти обертання колінчастого вала. Отримані параметри використовуються як для аналізу режимів роботи двигуна, так і для реалізації системи зворотного зв'язку.

Підсистема збору даних Data Acquisition призначена для автоматичної реєстрації результатів моделювання. До неї надходять сигнали частоти обертання двигуна RPM, коефіцієнта надлишку повітря λ , тривалості імпульсу впорскування Injector Pulse та положення дросельної заслінки. Отримані дані зберігаються у робочому просторі MATLAB у вигляді часових масивів, що дозволяє виконувати подальший аналіз та будувати графічні залежності досліджуваних параметрів.

Взаємодія користувача із системою здійснюється через графічний інтерфейс Virtual Engine Laboratory.

Інтерфейс забезпечує вибір режимів роботи двигуна, введення початкових параметрів експерименту, запуск процесу моделювання та відображення результатів у графічному і табличному вигляді.

Використання інтерактивного інтерфейсу значно підвищує наочність досліджень та спрощує виконання лабораторних робіт.

Логічна структура віртуальної лабораторії побудована за принципом замкненої системи автоматичного керування. Сигнал положення дросельної заслінки надходить до ECU та моделі двигуна. Електронний блок керування формує сигнал керування форсункою, який впливає на паливоподачу. У моделі двигуна розраховується коефіцієнт надлишку повітря λ , що використовується як сигнал зворотного зв'язку для корекції подачі палива. Одночасно всі основні

параметри передаються до підсистеми збору даних та графічного інтерфейсу користувача.

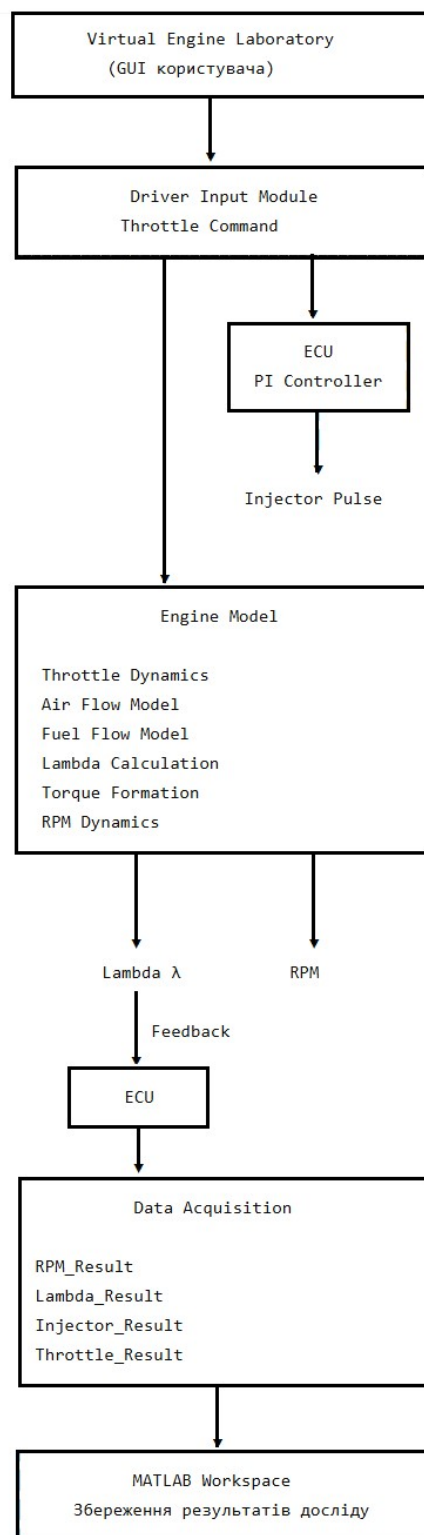


Рисунок 2.19 - Архітектура віртуальної лабораторії дослідження електронної системи впорскування палива двигуна внутрішнього згоряння.

Опис логічних зв'язків

1. Driver Input → ECU — передача сигналу положення дросельної заслінки для визначення базової паливоподачі.
2. Driver Input → Engine Model - вплив положення дроселя на витрату повітря.
3. ECU → Engine Model - передача сигналу керування форсункою (Injector Pulse).
4. Engine Model → ECU - передача коефіцієнта надлишку повітря λ для реалізації зворотного зв'язку.
5. Engine Model → Data Acquisition - передача параметрів RPM та λ для реєстрації.
6. ECU → Data Acquisition - передача значення тривалості імпульсу впорскування.
7. Driver Input → Data Acquisition - реєстрація положення дросельної заслінки.
8. Data Acquisition → MATLAB Workspace - збереження результатів моделювання.
9. MATLAB Workspace → GUI - відображення графіків та таблиць результатів експерименту.

Реалізація віртуальної лабораторії здійснюється на основі модульної структури Simulink-моделі, що включає підсистеми керування, моделювання двигуна та збору результатів експерименту. Детальний склад підсистем і загальний вигляд розробленої моделі наведено у додатку Б.

Запропонована архітектура забезпечує можливість дослідження динамічних процесів у системі електронного впорскування палива, аналізу роботи регулятора, оцінювання впливу навантаження та положення дросельної заслінки на робочі характеристики двигуна. Модульний принцип побудови дозволяє в подальшому розширювати функціональність системи шляхом інтеграції нових алгоритмів керування, моделей датчиків та виконавчих механізмів.

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

2.5.2 Реалізація режимів роботи двигуна

Однією з основних функцій розробленої віртуальної лабораторії є можливість дослідження різних режимів роботи двигуна внутрішнього згорання. Реалізація набору типових експлуатаційних режимів дозволяє оцінювати динаміку зміни основних параметрів системи електронного впорскування палива, досліджувати роботу алгоритмів керування та аналізувати вплив навантаження на характеристики двигуна. Для цього у складі графічного інтерфейсу користувача Virtual Engine Laboratory передбачено механізм вибору режиму роботи двигуна з автоматичним встановленням відповідних початкових умов моделювання.

Основою реалізації режимів роботи є використання випадального списку Operating Mode, який дозволяє обирати один із заздалегідь визначених сценаріїв функціонування двигуна. Кожен режим характеризується власним набором параметрів, серед яких початкова частота обертання колінчастого вала, положення дросельної заслінки та навантажувальний момент. Після вибору режиму відповідні значення автоматично передаються до математичної моделі через змінні робочого простору MATLAB.

У розробленій системі реалізовано п'ять базових режимів роботи двигуна: холодний запуск, холостий хід, розгін, крейсерський рух та режим повного навантаження. Такий набір режимів охоплює найбільш характерні експлуатаційні стани автомобільного двигуна та дозволяє виконувати комплексне дослідження його поведінки.

Для перевірки адекватності математичної моделі реалізовано декілька режимів роботи двигуна, що відповідають різним положенням дросельної заслінки. Результати моделювання кожного режиму представлені у вигляді часових графіків частоти обертання колінчастого вала, коефіцієнта надлишку повітря та тривалості імпульсу впорскування, які наведено у додатку В.

Режим холодного запуску (Cold Start) використовується для моделювання роботи двигуна в момент пуску після тривалої зупинки. У даному режимі задається низька початкова частота обертання колінчастого вала та незначне

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

навантаження. Для забезпечення стійкої роботи двигуна електронний блок керування формує збільшену тривалість імпульсу впорскування, що відповідає принципам функціонування реальних систем керування двигунами. Дослідження цього режиму дозволяє аналізувати перехідні процеси запуску та оцінювати швидкість виходу системи на стабільний режим роботи.

Режим холостого ходу (Idle) відповідає роботі двигуна без зовнішнього навантаження при мінімальному відкритті дросельної заслінки. У цьому випадку підтримується стала частота обертання колінчастого вала, а система керування здійснює корекцію паливоподачі на основі сигналу датчика кисню. Даний режим використовується для перевірки стійкості алгоритму керування та аналізу якості підтримання стехіометричного складу паливоповітряної суміші.

Режим розгону (Acceleration) характеризується швидким збільшенням навантаження та відкриття дросельної заслінки. У відповідь електронний блок керування збільшує тривалість імпульсу впорскування, що призводить до зростання крутного моменту та частоти обертання двигуна. У цьому режимі особливий інтерес становить аналіз перехідних процесів, часу розгону та реакції системи керування на зміну навантаження.

Режим крейсерського руху (Cruise) моделює рівномірний рух транспортного засобу з постійною швидкістю. Для нього характерні середні значення відкриття дросельної заслінки та навантажувального моменту. У цьому режимі система керування працює в умовах близьких до усталеного стану, а коефіцієнт надлишку повітря λ підтримується поблизу стехіометричного значення. Дослідження даного режиму дозволяє оцінити економічність роботи двигуна та ефективність алгоритму регулювання.

Режим повного навантаження (Full Load) відповідає роботі двигуна при максимальному відкритті дросельної заслінки та значному навантаженні. У такому випадку електронний блок керування забезпечує максимальну подачу палива для досягнення найбільшого крутного моменту. Цей режим використовується для аналізу граничних характеристик двигуна, перевірки

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

працездатності математичної моделі та дослідження динаміки зміни параметрів системи в екстремальних умовах експлуатації.

Структурно алгоритм вибору режиму роботи двигуна реалізується відповідно до схеми, наведеної на рисунку 2.20.

Для кожного режиму роботи автоматично встановлюються відповідні значення початкових параметрів моделювання. Такий підхід дозволяє швидко переходити між різними сценаріями експлуатації та проводити серію порівняльних експериментів без необхідності ручного налаштування великої кількості параметрів.

Результати моделювання відображаються у вигляді графіків зміни частоти обертання двигуна та коефіцієнта надлишку повітря, а також зберігаються в робочому просторі MATLAB для подальшого аналізу.

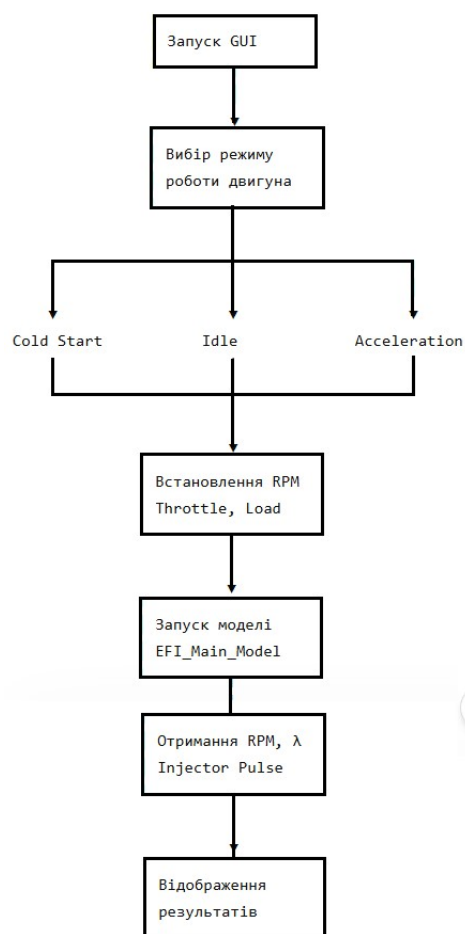


Рисунок 2.20 - Алгоритм вибору режиму роботи двигуна

Таблиця 2.5 - Параметри режимів роботи двигуна

Режим роботи	Початкові оберти, об/хв	Положення дроселя, %	Навантаження, Н·м
Cold Start	200	5	10
Idle	800	10	20
Acceleration	1200	25	30
Cruise	2500	55	40
Full Load	3500	90	70

Аналіз отриманих результатів підтверджує можливість використання розробленої віртуальної лабораторії для дослідження впливу зміни навантаження на основні параметри роботи двигуна. Узагальнені результати комп'ютерних експериментів наведено у додатку В.

Таким чином, реалізована система режимів роботи забезпечує проведення повноцінних досліджень динаміки електронної системи впорскування палива в різних умовах експлуатації двигуна. Використання автоматизованого механізму налаштування параметрів значно спрощує виконання лабораторних досліджень та підвищує ефективність аналізу отриманих результатів.

2.5.3 Методика проведення комп'ютерного експерименту

Комп'ютерний експеримент є основним інструментом дослідження характеристик системи електронного впорскування палива у розробленій віртуальній лабораторії. Його метою є аналіз впливу керуючих та збурюючих впливів на динаміку роботи двигуна, оцінювання якості функціонування електронного блока керування та дослідження процесів формування паливоповітряної суміші. Використання математичної моделі дозволяє проводити серію експериментів за різних режимів роботи двигуна без необхідності використання реального обладнання.

Методика проведення комп'ютерного експерименту передбачає послідовне виконання п'яти етапів: вибір режиму роботи двигуна, введення параметрів моделювання, запуск математичної моделі, отримання результатів у графічному вигляді та аналіз отриманих даних.

Вибір режиму роботи двигуна

На першому етапі користувач обирає режим функціонування двигуна за допомогою графічного інтерфейсу Virtual Engine Laboratory. Для дослідження доступні типові режими експлуатації: холодний запуск (Cold Start), холостий хід (Idle), розгін (Acceleration), крейсерський рух (Cruise) та режим повного навантаження (Full Load).

Після вибору режиму автоматично встановлюються рекомендовані значення початкової частоти обертання двигуна, положення дросельної заслінки та навантажувального моменту. Це дозволяє швидко перейти до проведення експерименту без додаткового налаштування параметрів моделі.

Введення параметрів моделювання

Другий етап передбачає введення або коригування початкових параметрів дослідження. Користувач має можливість задавати:

- початкову частоту обертання двигуна RPM;
- положення дросельної заслінки, %;
- навантажувальний момент, Н·м;
- тривалість моделювання, с.

Введені параметри передаються до робочого простору MATLAB та використовуються як початкові умови для запуску математичної моделі. Такий підхід забезпечує можливість проведення як стандартних, так і спеціалізованих досліджень з довільними параметрами експлуатації.

Запуск математичної моделі

Після завершення налаштування параметрів користувач активує кнопку Run Simulation, яка запускає модель EFI_Main_Model. У процесі моделювання здійснюється розрахунок основних параметрів роботи двигуна:

- витрати повітря;
- витрати палива;
- коефіцієнта надлишку повітря λ ;
- крутного моменту;
- частоти обертання колінчастого вала;

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

- тривалості імпульсу впорскування.

Обчислення виконуються в середовищі Simulink із використанням чисельних методів інтегрування диференціальних рівнянь, що описують динаміку двигуна та системи керування.

Отримання результатів моделювання

У ході експерименту результати автоматично реєструються підсистемою Data Acquisition та зберігаються у робочому просторі MATLAB у вигляді часових масивів. Основними вихідними параметрами дослідження є:

- RPM_Result — зміна частоти обертання двигуна;
- Lambda_Result — зміна коефіцієнта надлишку повітря;
- Injector_Result — тривалість імпульсу впорскування;
- Throttle_Result — положення дросельної заслінки;
- Time_Result — часовий вектор моделювання.

Отримані результати відображаються у графічному інтерфейсі користувача у вигляді графіків та підсумкової таблиці параметрів. Графічне представлення дозволяє оцінити характер перехідних процесів та динаміку зміни досліджуваних величин.

Аналіз результатів

Заключний етап експерименту полягає в аналізі отриманих результатів. Основна увага приділяється дослідженню таких показників:

- стабільність роботи двигуна;
- швидкість виходу на усталений режим;
- характер зміни коефіцієнта надлишку повітря λ ;
- якість роботи PI-регулятора;
- вплив навантаження на частоту обертання двигуна;
- реакція системи на зміну положення дросельної заслінки.

Для коректної роботи моделі значення коефіцієнта надлишку повітря повинно прагнути до стехіометричного значення $\lambda \approx 1$, а частота обертання двигуна має виходити на усталений режим без значних коливань. У разі

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

виникнення нестійкості або значних відхилень параметрів виконується коригування коефіцієнтів регулятора та параметрів математичної моделі.

Застосування запропонованої методики дозволяє систематизувати процес проведення комп'ютерних експериментів та забезпечує отримання достовірних результатів дослідження системи електронного впорскування палива. Послідовність проведення комп'ютерного експерименту наведено на рисунку 2.21.

Інтерфейс віртуальній лабораторії, який дозволяє провести моделювання режимів роботи двигуна внутрішнього згоряння представлений на рисунку 2.22.

Методика може використовуватися як під час виконання навчальних лабораторних робіт, так і для проведення наукових досліджень з моделювання систем автоматичного керування двигунами внутрішнього згоряння.

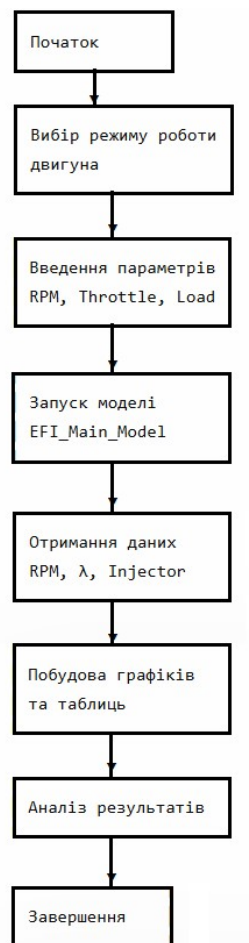


Рисунок 2.21 - Послідовність проведення комп'ютерного експерименту

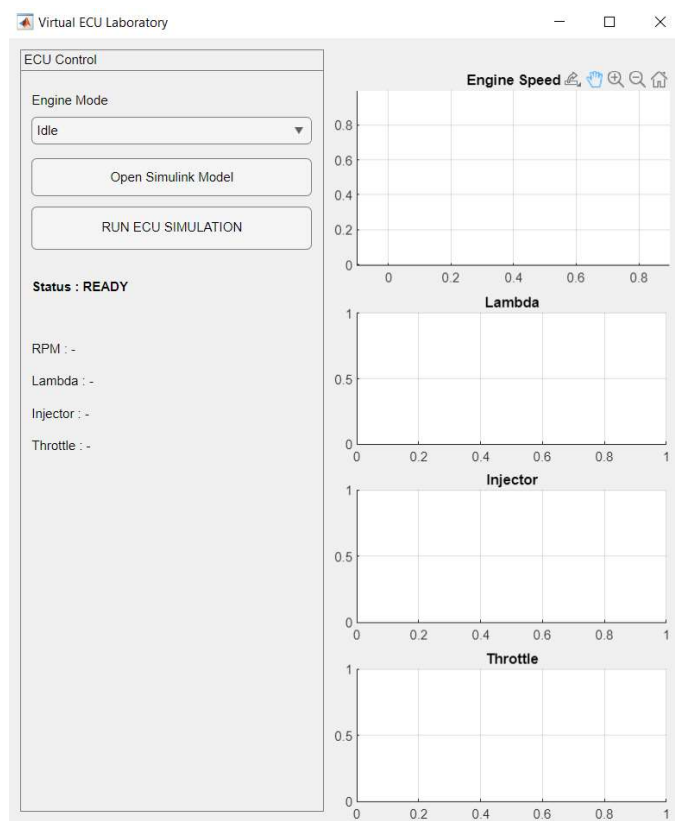


Рисунок 2.22 – Інтерфейс віртуальної лабораторії

У процесі проведення комп'ютерного експерименту здійснюється автоматичний запис результатів моделювання до робочого простору MATLAB із подальшим формуванням графічних залежностей. Приклади отриманих графіків та результати обробки експериментальних даних наведено у додатку В.

Висновки до розділу:

У другому розділі виконано розробку математичної моделі електронної системи впорскування палива бензинового двигуна внутрішнього згорання в середовищі MATLAB/Simulink. Створена модель включає підсистеми формування повітряного та паливного потоків, розрахунку коефіцієнта надлишку повітря, моделювання динаміки двигуна та електронного блока керування.

Розроблено електронний блок керування двигуном на основі замкненого контуру регулювання із використанням PI-регулятора. Запропонований алгоритм забезпечує корекцію паливоподачі за сигналом датчика кисню та підтримання необхідного складу паливоповітряної суміші.

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Створено підсистему збору та реєстрації даних, яка забезпечує автоматичне збереження результатів моделювання у робочому просторі MATLAB. Реалізований механізм дозволяє отримувати часові залежності основних параметрів системи, зокрема частоти обертання двигуна, коефіцієнта надлишку повітря, тривалості імпульсу впорскування та положення дросельної заслінки, що створює основу для подальшого аналізу ефективності роботи системи.

Розроблено віртуальну лабораторію дослідження системи електронного впорскування палива з графічним інтерфейсом користувача. Реалізовано набір характерних режимів роботи двигуна, механізми введення параметрів експерименту, запуску моделі, візуалізації результатів та їх аналізу.

Розроблені програмні модулі, структура Simulink-моделі та результати проведених комп'ютерних експериментів винесено до додатків А–В, що дозволяє відокремити допоміжні матеріали від основного змісту роботи та забезпечити відтворюваність отриманих результатів дослідження.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне завдання розробки та дослідження системи електронного впорскування палива бензинового двигуна внутрішнього згоряння засобами комп'ютерного моделювання. Проведений аналіз сучасних систем керування двигунами підтвердив доцільність застосування математичного моделювання для дослідження процесів сумішоутворення, паливоподачі та регулювання режимів роботи двигуна на етапах проєктування та налагодження систем автоматичного керування.

Розроблено математичну модель електронної системи впорскування палива у середовищі MATLAB/Simulink, яка включає моделі дросельної заслінки, впускного тракту, паливної системи, датчика кисню, електронного блока керування та динаміки двигуна. Реалізований замкнений контур керування на основі PI-регулятора забезпечує автоматичну корекцію паливоподачі за сигналом зворотного зв'язку та підтримання необхідного значення коефіцієнта надлишку повітря.

Створено програмний комплекс віртуальної лабораторії, до складу якого входять модулі формування структури моделі, підсистема збору даних, механізми реєстрації результатів та графічний інтерфейс користувача. Реалізовано можливість дослідження різних режимів роботи двигуна, автоматичного отримання графіків зміни частоти обертання колінчастого вала, коефіцієнта надлишку повітря та параметрів паливоподачі, що значно підвищує наочність і ефективність проведення експериментальних досліджень.

Результати комп'ютерного моделювання підтвердили працездатність розробленої системи та можливість її використання як навчально-дослідницького стенда для вивчення принципів функціонування електронних систем керування двигунами внутрішнього згоряння.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Пустільнік Є. В.			ВИСНОВКИі			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Курганов І.Д.								64	2
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									
								КНУ АКІТР-23ск			

Розроблена віртуальна лабораторія може бути використана в освітньому процесі під час підготовки фахівців з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, а також слугувати основою для подальшого розширення моделі шляхом інтеграції додаткових датчиків, виконавчих механізмів та сучасних алгоритмів керування двигуном.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						76
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2018. 1024 p.
2. Stone R. Introduction to Internal Combustion Engines. 5th ed. London : Palgrave Macmillan, 2012. 641 p.
3. Guzzella L., Onder C. Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems. Berlin : Springer, 2010. 362 p.
4. Eriksson L., Nielsen L. Modeling and Control of Engines and Drivelines. Chichester : Wiley, 2014. 585 p.
5. Bosch Automotive Handbook. 10th ed. Stuttgart : Robert Bosch GmbH, 2018. 1544 p.
6. Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control. 3rd ed. New York : Springer, 2021. 530 p.
7. Kiencke U., Nielsen L. Automotive Control Systems. Berlin : Springer, 2005. 512 p.
8. Hendricks E. Mean Value Modelling of Spark Ignition Engines. SAE Technical Paper. 1989. № 890563.
9. Powell B. K., Bailey K. E., Cikanek S. Dynamic Modeling and Control of Automotive Engine Systems. IEEE Control Systems Magazine. 1998. Vol. 18, № 5. P. 17–33.
10. Isermann R. Engine Modeling and Control. Berlin : Springer, 2014. 656 p.
11. Bishop R. The Mechatronics Handbook. Boca Raton : CRC Press, 2017. 1200 p.
12. MathWorks. Simulink Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/>

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Пустільник Є.В.			СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Курганов І. Д.								66	3
								КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затвердив		Маринич І.А.									

13. MathWorks. Powertrain Blockset User Guide. URL:
<https://www.mathworks.com/help/autoblks/>

14. Balenovic M. Automotive Embedded Systems Handbook. London : Institution of Engineering and Technology, 2009. 450 p.

15. AVL BOOST Theory and User Manual. Graz : AVL List GmbH, 2020. 890 p.

16. Gamma Technologies. GT-Power User Manual. Westmont : Gamma Technologies, 2021. 1100 p.

17. Åström K. J., Murray R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton : Princeton University Press, 2021. 408 p.

18. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. 13th ed. London : Pearson, 2016. 1040 p.

19. Ogata K. Modern Control Engineering. 5th ed. Boston : Prentice Hall, 2010. 905 p.

20. Franklin G., Powell J., Emami-Naeini A. Feedback Control of Dynamic Systems. 8th ed. London : Pearson, 2019. 912 p.

21. Goodwin G. C., Graebe S. F., Salgado M. E. Control System Design. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2001. 928 p.

22. Fraden J. Handbook of Modern Sensors. 5th ed. New York : Springer, 2016. 758 p.

23. Robert Bosch GmbH. Automotive Electrics and Automotive Electronics. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014. 521 p.

24. Denton T. Automobile Electrical and Electronic Systems. 5th ed. London : Routledge, 2017. 688 p.

25. Reif K. Gasoline Engine Management. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015. 404 p.

26. Клименко Л. П., Прищепов О. Ф., Андреев В. І. та ін. Моделювання роботи електронної газорозподільної системи для малопотужних двигунів

внутрішнього згоряння // Двигуни внутрішнього згоряння. 2025. № 2. С. 55–63. DOI: 10.20998/0419-8719.2025.2.07.

27. Гончар М. О., Ніколаєнко В. А., Цюман М. П. Створення та дослідження динамічних моделей ДВЗ у середовищі OpenModelica // Вісник ХНАДУ. 2023. № 101. С. 174–181. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.174-181.

28. Триньов О. В., Сівих Д. Г. Моделювання роботи автоматизованої системи локального багатоконтурного охолодження деталей автотракторного дизеля // Двигуни внутрішнього згоряння. 2021. № 1. С. 78–86. DOI: 10.20998/0419-8719.2021.1.09.

29. Зайченко С. В., Король С. В., Опришко В. П. та ін. Моделювання процесу електромеханічного управління газорозподілом генератора електричної енергії з двигуном внутрішнього згоряння // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2021. № 1. С. 52–59. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2021.242160.

30. Осетров О. О., Кравченко С. С., Чучуменко Б. С. Обґрунтування параметрів послідовної гібридної силової установки легкового автомобіля // Двигуни внутрішнього згоряння. 2022. № 1. С. 96–104. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.1.10.

31. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

32. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

33. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

34. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

35. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Програмна реалізація віртуальної лабораторії

Головний скрипт автоматичного формування моделі EFI_Main_Model

```

clc;
clear;
close all;
bdclose('all')

if exist('EFI_Main_Model.slx','file')
    delete('EFI_Main_Model.slx')
end

init_parameters

create_main_model

create_ECU

create_EngineModel

connect_model

VirtualECULab

open_system('EFI_Main_Model')

```

Скрипт створення підсистеми електронного блока керування ECU

```

%% =====
% ECU subsystem
%% =====

model = 'EFI_Main_Model';
ecu = [model '/ECU'];

open_system(ecu);

add_block('simulink/Ports & Subsystems/In1',...
    [ecu '/Lambda_FB'],...
    'Position',[40 120 70 140]);

```

```

add_block('simulink/Sources/Constant',...
    [ecu '/Lambda_Ref'],...
    'Value','1',...
    'Position',[40 40 80 60]);

add_block('simulink/Math Operations/Sum',...
    [ecu '/Error'],...
    'Inputs','+-',...
    'Position',[140 90 180 140]);

add_block('simulink/Continuous/PID Controller',...
    [ecu '/PI'],...
    'P','0.8',...
    'T','6',...
    'D','0',...
    'Position',[250 80 340 150]);

add_block('simulink/Math Operations/Gain',...
    [ecu '/FuelGain'],...
    'Gain','0.02',...
    'Position',[420 90 500 140]);

add_block('simulink/Discontinuities/Saturation',...
    [ecu '/Limit'],...
    'UpperLimit','5',...
    'LowerLimit','0',...
    'Position',[580 90 650 140]);

add_block('simulink/Ports & Subsystems/Out1',...
    [ecu '/InjectorPulse'],...
    'Position',[760 110 790 130]);

add_line(ecu,'Lambda_Ref/1','Error/1');
add_line(ecu,'Lambda_FB/1','Error/2');
add_line(ecu,'Error/1','PI/1');
add_line(ecu,'PI/1','FuelGain/1');
add_line(ecu,'FuelGain/1','Limit/1');
add_line(ecu,'Limit/1','InjectorPulse/1');

save_system(model);

disp('ECU created');

```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

Скрипт створення математичної моделі двигуна Engine_Model

%%

=====

% create_EngineModel.m

% Mathematical Engine Model for EFI System

%%

=====

model = 'EFI_Main_Model';

eng = [model '/Engine_Model'];

open_system(eng);

%%

=====

% CLEAN SUBSYSTEM

%%

=====

lines = find_system(eng,...

'FindAll','on',...

'Type','Line');

if ~isempty(lines)

delete(lines);

end

blocks = find_system(eng,...

'SearchDepth',1,...

'Type','Block');

for k = length(blocks):-1:2

try

delete_block(blocks{k});

catch

end

end

lines = find_system(eng,...

'FindAll','on',...

'Type','Line');

try

delete(lines);

catch

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

end

%%
=====

% INPUTS

%%
=====

add_block('simulink/Ports & Subsystems/In1',...
[eng '/Throttle_Command'],...
'Position',[30 60 60 80]);

add_block('simulink/Ports & Subsystems/In1',...
[eng '/InjectorPulse'],...
'Position',[30 220 60 240]);

%%
=====

% THROTTLE DYNAMICS

%%
=====

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',...
[eng '/ThrottleDynamics'],...
'Numerator','1',...
'Denominator','[0.2 1]',...
'Position',[120 40 220 90]);

%%
=====

% INTAKE MANIFOLD

%%
=====

add_block('simulink/Continuous/Integrator',...
[eng '/IntakeManifold'],...
'InitialCondition','0.2',...
'Position',[300 40 340 90]);

%%
=====

% AIR FLOW

%%
=====

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain',...
[eng '/AirFlow'],...
'Gain','0.05',...
'Position',[420 40 500 90]);
```

```
%%
```

```
% FUEL FLOW
```

```
%%
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain',...
[eng '/FuelFlow'],...
'Gain','0.02',...
'Position',[420 210 500 250]);
```

```
add_block('simulink/Discontinuities/Saturation',...
[eng '/FuelLimiter'],...
'LowerLimit','0.001',...
'UpperLimit','100',...
'Position',[580 210 680 250]);
```

```
%%
```

```
% STOICHIOMETRIC FUEL
```

```
%%
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain',...
[eng '/StoichFuel'],...
'Gain','14.7',...
'Position',[760 210 840 250]);
```

```
%%
```

```
% LAMBDA CALCULATION
```

```
%%
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Product',...
[eng '/LambdaCalc'],...
'Position',[920 100 1000 150]);
```

```
set_param([eng '/LambdaCalc'],'Inputs','*/');
```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

%%

% LAMBDA SENSOR

%%

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',...
[eng '/LambdaSensor'],...
'Numerator','1',...
'Denominator','[0.2 1]',...
'Position',[1080 100 1200 150]);
```

%%

% TORQUE FORMATION

%%

```
add_block('simulink/Math Operations/Product',...
[eng '/TorqueFormation'],...
'Position',[760 40 840 90]);
```

```
set_param([eng '/TorqueFormation'],...
'Inputs','2');
```

%%

% TORQUE GAIN

%%

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain',...
[eng '/TorqueGain'],...
'Gain','120',...
'Position',[920 40 1000 90]);
```

%%

% LOAD TORQUE

%%

```
add_block('simulink/Sources/Constant',...
[eng '/LoadTorque'],...
'Value','20',...
```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

'Position',[920 220 980 250]);

%%

% TORQUE BALANCE

%%

add_block('simulink/Math Operations/Sum',...
[eng '/TorqueSum'],...
'Inputs','+-',...
'Position',[1080 40 1120 90]);

%%

% 1/J

%%

add_block('simulink/Math Operations/Gain',...
[eng '/InvJ'],...
'Gain','1/0.18',...
'Position',[1180 40 1260 90]);

%%

% ENGINE SPEED

%%

add_block('simulink/Continuous/Integrator',...
[eng '/RPM'],...
'InitialCondition','0',...
'Position',[1340 40 1380 90]);

%%

% OUTPUTS

%%

add_block('simulink/Ports & Subsystems/Out1',...
[eng '/RPM_Out'],...
'Position',[1500 55 1530 75]);

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

```
add_block('simulink/Ports & Subsystems/Out1',...
[eng '/Lambda_Out'],...
'Position',[1280 115 1310 135]);
```

```
%%
```

```
=====
% CONNECTIONS
```

```
%%
=====
```

```
% Air path
```

```
add_line(eng,'Throttle_Command/1','ThrottleDynamics/1');
add_line(eng,'ThrottleDynamics/1','IntakeManifold/1');
add_line(eng,'IntakeManifold/1','AirFlow/1');
```

```
% Fuel path
```

```
add_line(eng,'InjectorPulse/1','FuelFlow/1');
add_line(eng,'FuelFlow/1','FuelLimiter/1');
add_line(eng,'FuelLimiter/1','StoichFuel/1');
```

```
% Lambda
```

```
add_line(eng,'AirFlow/1','LambdaCalc/1');
add_line(eng,'StoichFuel/1','LambdaCalc/2');
add_line(eng,'LambdaCalc/1','LambdaSensor/1');
add_line(eng,'LambdaSensor/1','Lambda_Out/1');
```

```
% Torque
```

```
add_line(eng,'AirFlow/1','TorqueFormation/1');
add_line(eng,'FuelLimiter/1','TorqueFormation/2');
```

```
add_line(eng,'TorqueFormation/1','TorqueGain/1');
add_line(eng,'TorqueGain/1','TorqueSum/1');
```

```
add_line(eng,'LoadTorque/1','TorqueSum/2');
```

```
add_line(eng,'TorqueSum/1','InvJ/1');
add_line(eng,'InvJ/1','RPM/1');
add_line(eng,'RPM/1','RPM_Out/1');
```

```
%%
```

```
=====
% AUTO LAYOUT
```

```
%%
=====
```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

```
try
Simulink.BlockDiagram.arrangeSystem(eng);
catch
end
```

```
save_system(model);
```

```
disp('Engine Model created');
```

Скрипт створення підсистеми збору даних Data_Acquisition

(навести текст файлу create_DataAcquisition.m)

```
%%%
```

```
=====
% create_DataAcquisition.m
% Data Acquisition Subsystem
%%%
```

```
=====
model = 'EFI_Main_Model';
daq = [model '/Data_Acquisition'];
```

```
%%% -----
% Перевірка моделі
%%% -----
```

```
if ~bdIsLoaded(model)
    error('Model EFI_Main_Model is not loaded');
end
```

```
%%% -----
% Створення підсистеми якщо відсутня
%%% -----
```

```
if ~isempty(find_system(model,...
    'SearchDepth',1,...
    'Name','Data_Acquisition'))
```

```
    delete_block([model '/Data_Acquisition']);
```

```
end
add_block(...
'simulink/Ports & Subsystems/Subsystem',...
[model '/Data_Acquisition'],...
'Position',[850 250 1100 450]);
```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
open_system(daq);
```

```
%%% -----  
% Очистка підсистеми  
%%% -----
```

```
open_system(daq);
```

```
% Видалити стандартні лінії
```

```
try  
    delete(find_system(daq,...  
        'FindAll','on',...  
        'Type','Line'));
```

```
catch  
end
```

```
% Видалити всі блоки крім самої підсистеми
```

```
blocks = find_system(daq,...  
    'SearchDepth',1,...  
    'Type','Block');
```

```
for k = 1:length(blocks)
```

```
    if strcmp(blocks{k},daq)  
        continue;  
    end
```

```
    try  
        delete_block(blocks{k});  
    catch  
    end
```

```
end
```

```
%%%
```

```
=====
```

```
% INPUT PORTS
```

```
%%%
```

```
=====
```

```
add_block(...  
    'simulink/Ports & Subsystems/In1',...  
    [daq 'RPM_In'],...  
    'Position',[40 60 70 80]);
```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
add_block(...
    'simulink/Ports & Subsystems/In1',...
    [daq '/Lambda_In'],...
    'Position',[40 140 70 160]);
```

```
add_block(...
    'simulink/Ports & Subsystems/In1',...
    [daq '/Injector_In'],...
    'Position',[40 220 70 240]);
```

```
add_block(...
    'simulink/Ports & Subsystems/In1',...
    [daq '/Throttle_In'],...
    'Position',[40 300 70 320]);
```

```
%%%
```

```
% CLOCK
```

```
%%%
```

```
add_block(...
    'simulink/Sources/Clock',...
    [daq '/Clock'],...
    'Position',[40 380 80 410]);
```

```
%%%
```

```
% TO WORKSPACE BLOCKS
```

```
%%%
```

```
add_block(...
    'simulink/Sinks/To Workspace',...
    [daq '/RPM_Result'],...
    'VariableName','RPM_Result',...
    'SaveFormat','Structure With Time',...
    'Position',[250 50 380 90]);
```

```
add_block(...
    'simulink/Sinks/To Workspace',...
    [daq '/Lambda_Result'],...
    'VariableName','Lambda_Result',...
    'SaveFormat','Structure With Time',...
```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

'Position',[250 130 380 170]);

add_block(...
    'simulink/Sinks/To Workspace',...
    [daq '/Injector_Result'],...
    'VariableName','Injector_Result',...
    'SaveFormat','Structure With Time',...
    'Position',[250 210 380 250]);

add_block(...
    'simulink/Sinks/To Workspace',...
    [daq '/Throttle_Result'],...
    'VariableName','Throttle_Result',...
    'SaveFormat','Structure With Time',...
    'Position',[250 290 380 330]);

add_block(...
    'simulink/Sinks/To Workspace',...
    [daq '/Time_Result'],...
    'VariableName','Time_Result',...
    'SaveFormat','Structure With Time',...
    'Position',[250 380 380 420]);

```

```
%%
```

```
% CONNECTIONS
```

```
%%
```

```

add_line(daq,...
    'RPM_In/1',...
    'RPM_Result/1');

```

```

add_line(daq,...
    'Lambda_In/1',...
    'Lambda_Result/1');

```

```

add_line(daq,...
    'Injector_In/1',...
    'Injector_Result/1');

```

```

add_line(daq,...
    'Throttle_In/1',...
    'Throttle_Result/1');

```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

```
add_line(daq,...
    'Clock/1',...
    'Time_Result/1');
```

```
%%
```

```
% AUTO ARRANGE
```

```
%%
```

```
try
    Simulink.BlockDiagram.arrangeSystem(daq);
catch
end
```

```
save_system(model);
```

```
disp('Data Acquisition subsystem created');
```

Скрипт автоматичного з'єднання блоків моделі

```
%% =====
% CONNECT MODEL
%% =====
```

```
model = 'EFI_Main_Model';
```

```
if ~bdIsLoaded(model)
    error('Model EFI_Main_Model is not loaded');
end
```

```
%% -----
% Оновлення моделі
%% -----
```

```
set_param(model,'SimulationCommand','update');
```

```
%% =====
% THROTTLE COMMAND
%% =====
```

```
% Throttle -> ECU
```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		93

```
add_line(model,...
    'Throttle_Command/1',...
    'ECU/1',...
    'autorouting','on');
```

% Throttle -> Engine

```
add_line(model,...
    'Throttle_Command/1',...
    'Engine_Model/1',...
    'autorouting','on');
```

% Throttle -> Data Acquisition

```
add_line(model,...
    'Throttle_Command/1',...
    'Data_Acquisition/4',...
    'autorouting','on');
```

```
%% =====
% ECU -> ENGINE
%% =====
```

```
add_line(model,...
    'ECU/1',...
    'Engine_Model/2',...
    'autorouting','on');
```

```
%% =====
% LAMBDA FEEDBACK
%% =====
```

```
add_line(model,...
    'Engine_Model/2',...
    'ECU/2',...
    'autorouting','on');
```

```
%% =====
% DATA ACQUISITION
%% =====
```

% RPM

```
add_line(model,...
    'Engine_Model/1',...
```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

'Data_Acquisition/1',...
'autorouting','on');

% Lambda

add_line(model,...
    'Engine_Model/2',...
    'Data_Acquisition/2',...
    'autorouting','on');

% Injector

add_line(model,...
    'ECU/1',...
    'Data_Acquisition/3',...
    'autorouting','on');

%% =====
% SCOPE
%% =====

% Перевірка наявності MUX

if isempty(find_system(model,...
    'SearchDepth',1,...
    'Name','MUX'))

    add_block(...
        'simulink/Signal Routing/Mux',...
        [model '/MUX'],...
        'Inputs','3',...
        'Position',[850 100 880 180]);

end

% RPM

add_line(model,...
    'Engine_Model/1',...
    'MUX/1',...
    'autorouting','on');

% Lambda

add_line(model,...

```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

'Engine_Model/2',...
'MUX/2',...
'autorouting','on');

% Injector Pulse

add_line(model,...
'ECU/1',...
'MUX/3',...
'autorouting','on');

% MUX -> Scope

add_line(model,...
'MUX/1',...
'Scope/1',...
'autorouting','on');

%% =====
% SAVE
%% =====

try
    Simulink.BlockDiagram.arrangeSystem(model);
catch
end

save_system(model);

disp('Model connected successfully');

```

Структура та склад моделі Simulink

Загальна структура моделі EFI_Main_Model

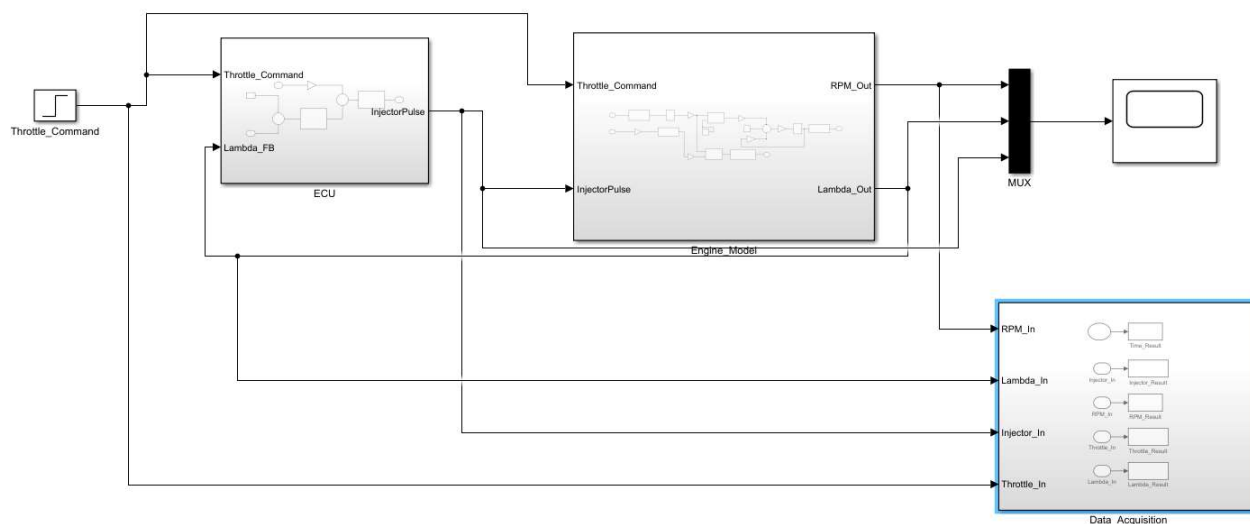


Рисунок Б.1 - Загальний вигляд моделі

Підсистема електронного блока керування ECU

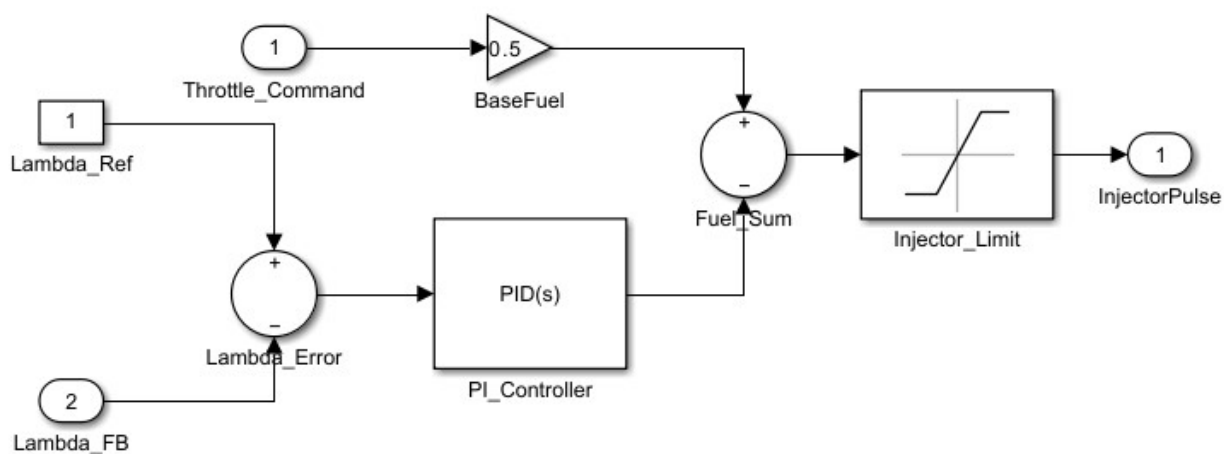


Рисунок Б.2 – Структура підсистеми ECU

Підсистема математичної моделі двигуна Engine_Model

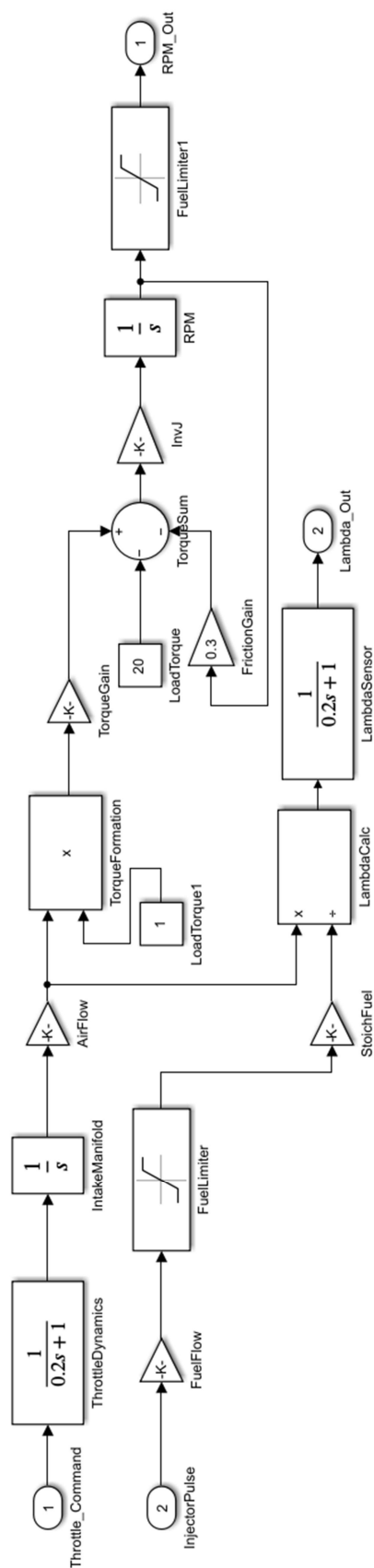


Рисунок Б.3 – Структура підсистеми Engine_Model

Підсистема збору даних Data_Acquisition

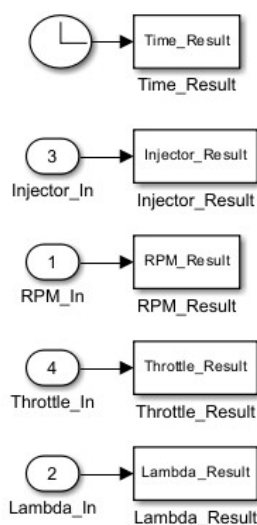


Рисунок Б.4 - Структура підсистеми Data_Acquisition)

Графічний інтерфейс віртуальної лабораторії

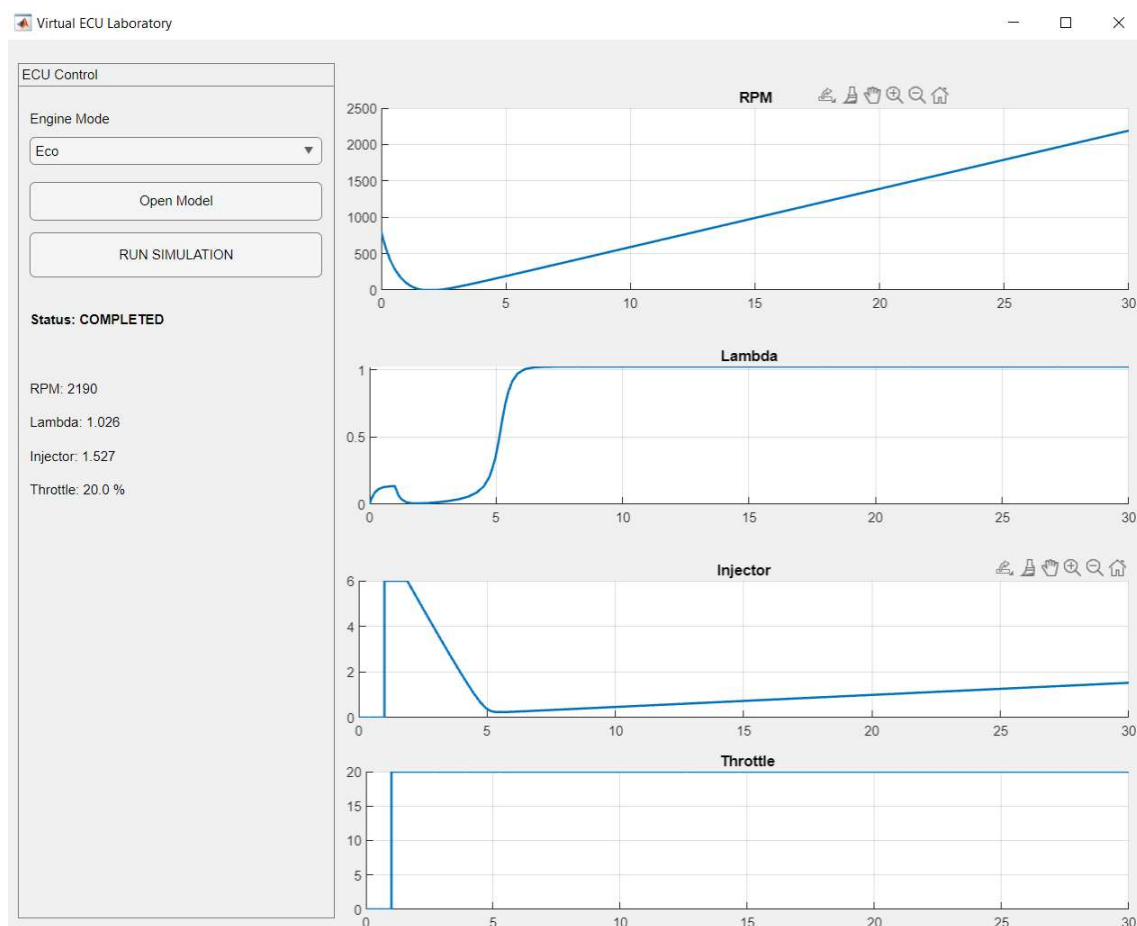


Рисунок Б.5 - Вікно Virtual ECU Lab

Результати комп'ютерних експериментів

Режим холостого ходу (5 % відкриття дросельної заслінки)

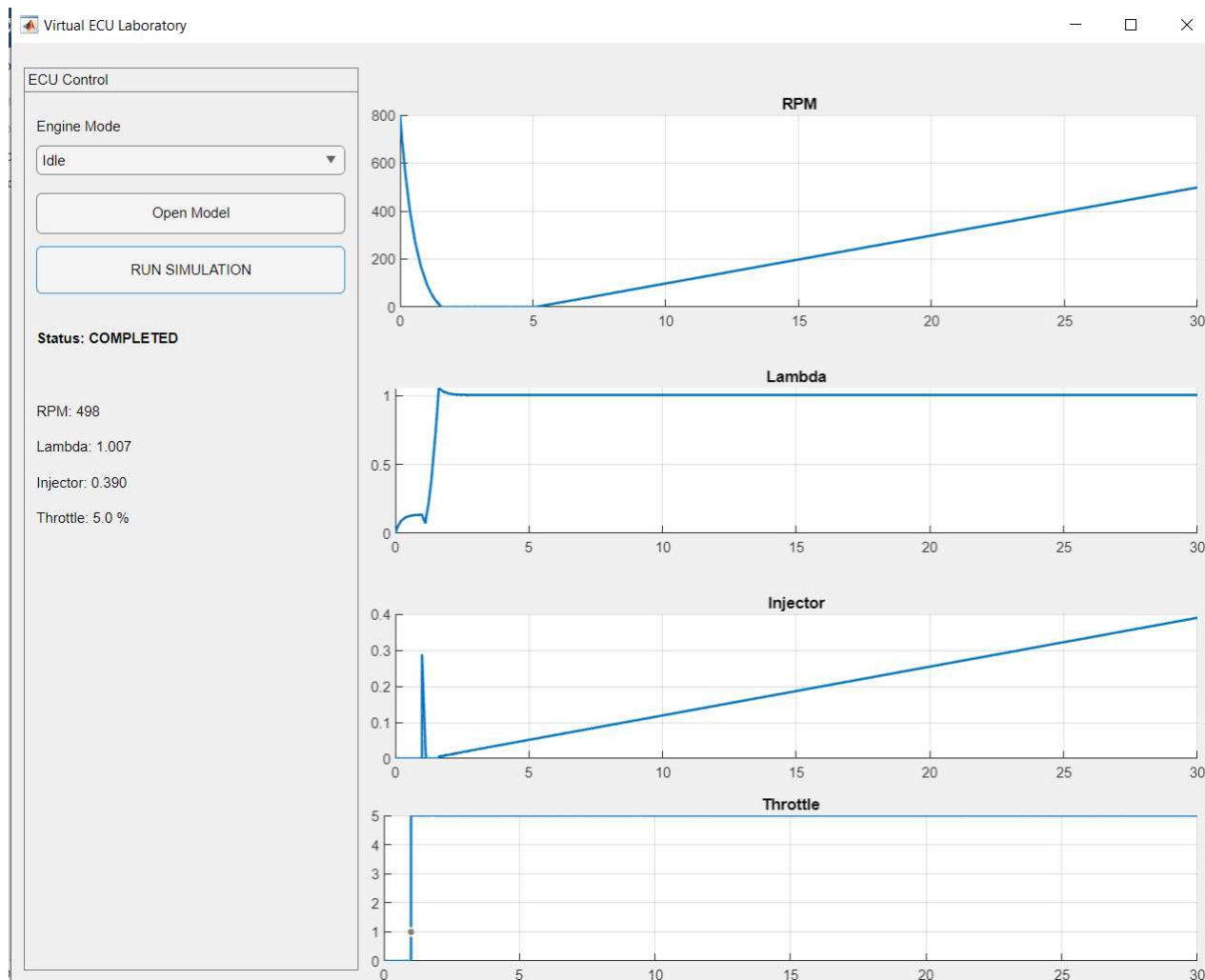


Рисунок В.1 - Графіки зміни частоти обертання двигуна, коефіцієнта надлишку повітря λ , тривалості імпульсу впорскування

Часткове навантаження (20 % відкриття дроселя)

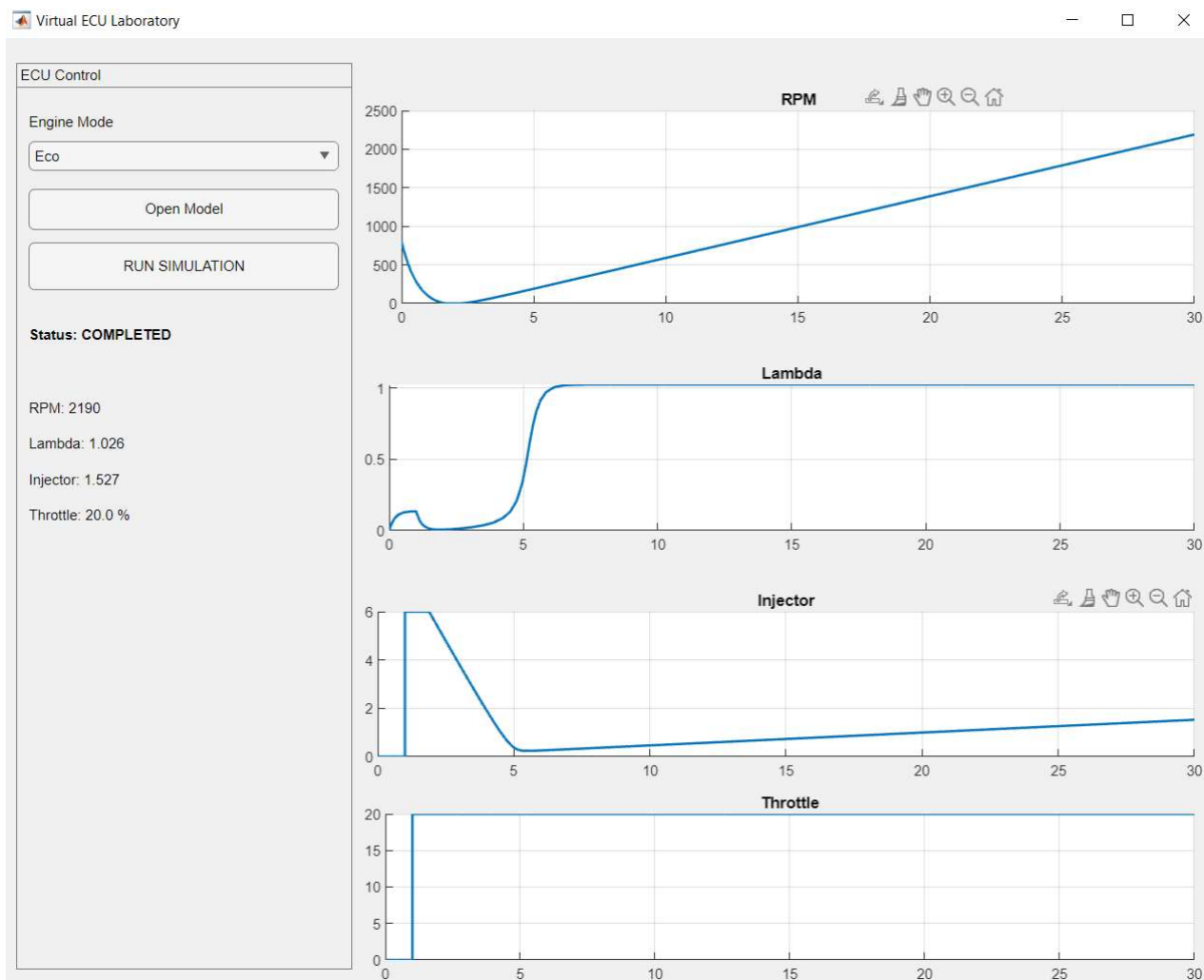


Рисунок В.2 - Графіки зміни частоти обертання двигуна, коефіцієнта надлишку повітря λ , тривалості імпульсу впорскування

Середнє навантаження (25 % відкриття дроселя)

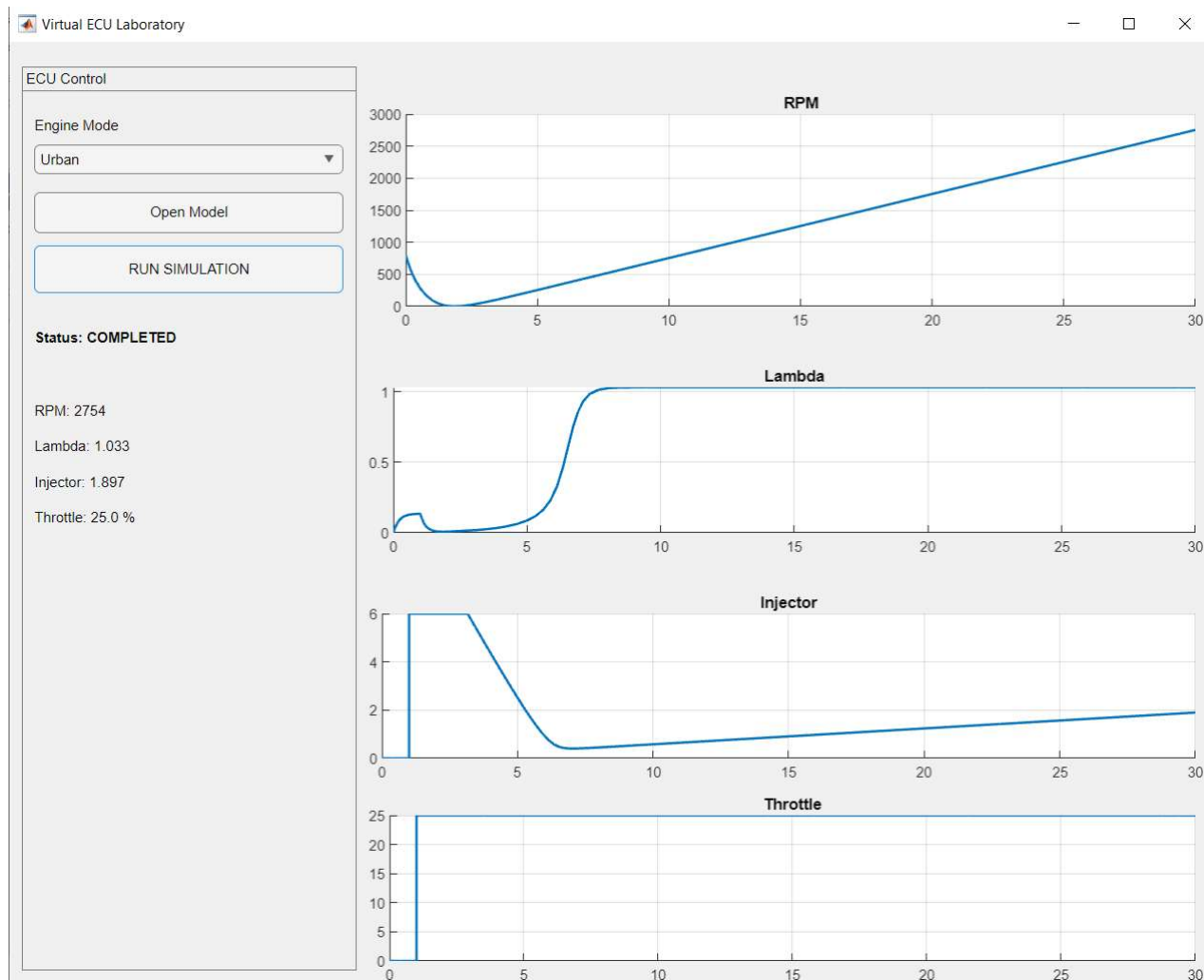


Рисунок В.3 - Графіки зміни частоти обертання двигуна, коефіцієнта надлишку повітря λ , тривалості імпульсу впорскування

Підвищене навантаження (55 % відкриття дроселя)

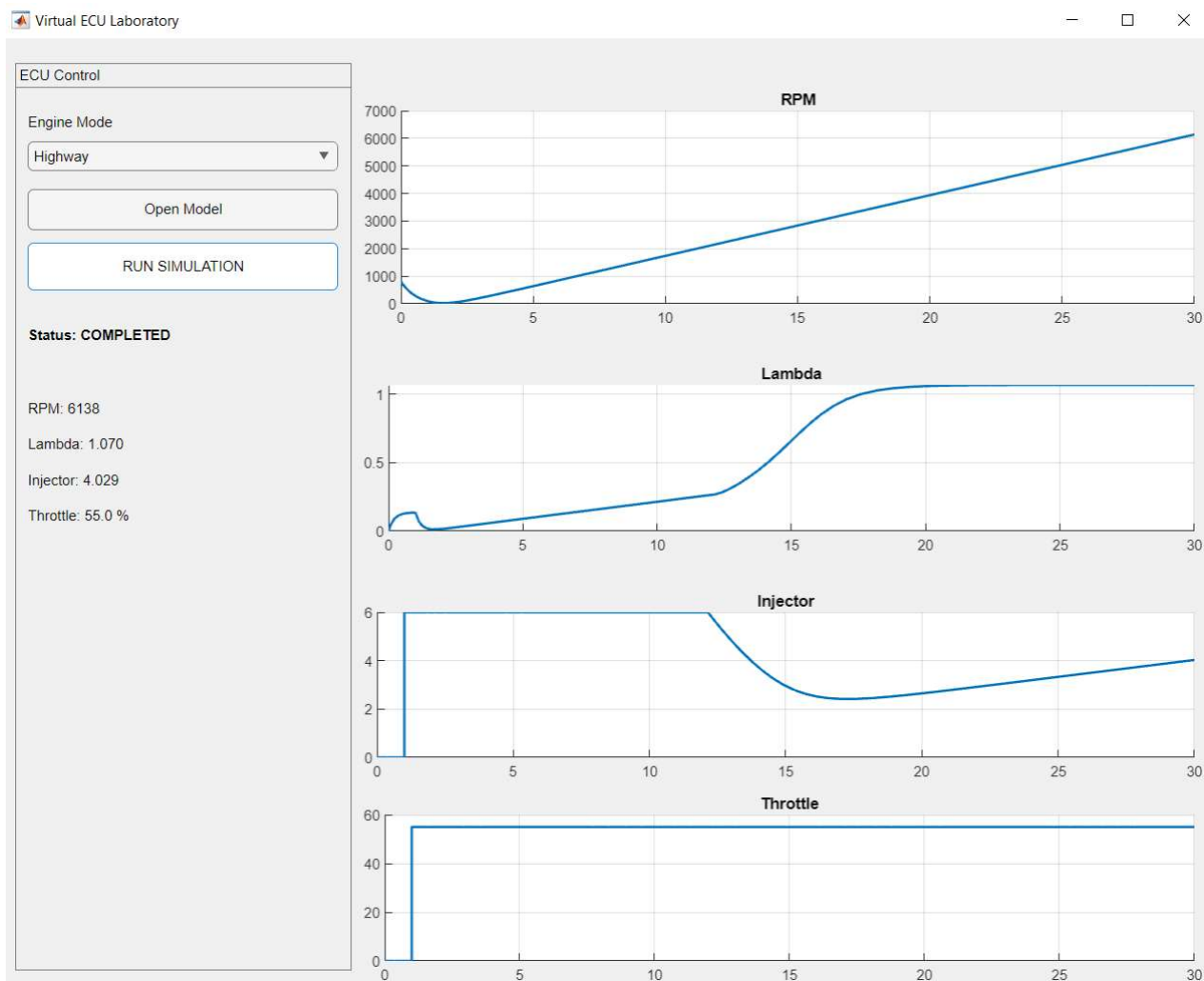


Рисунок В.4 - Графіки зміни частоти обертання двигуна, коефіцієнта надлишку повітря λ , тривалості імпульсу впорскування

Максимальне навантаження (90 % відкриття дроселя)

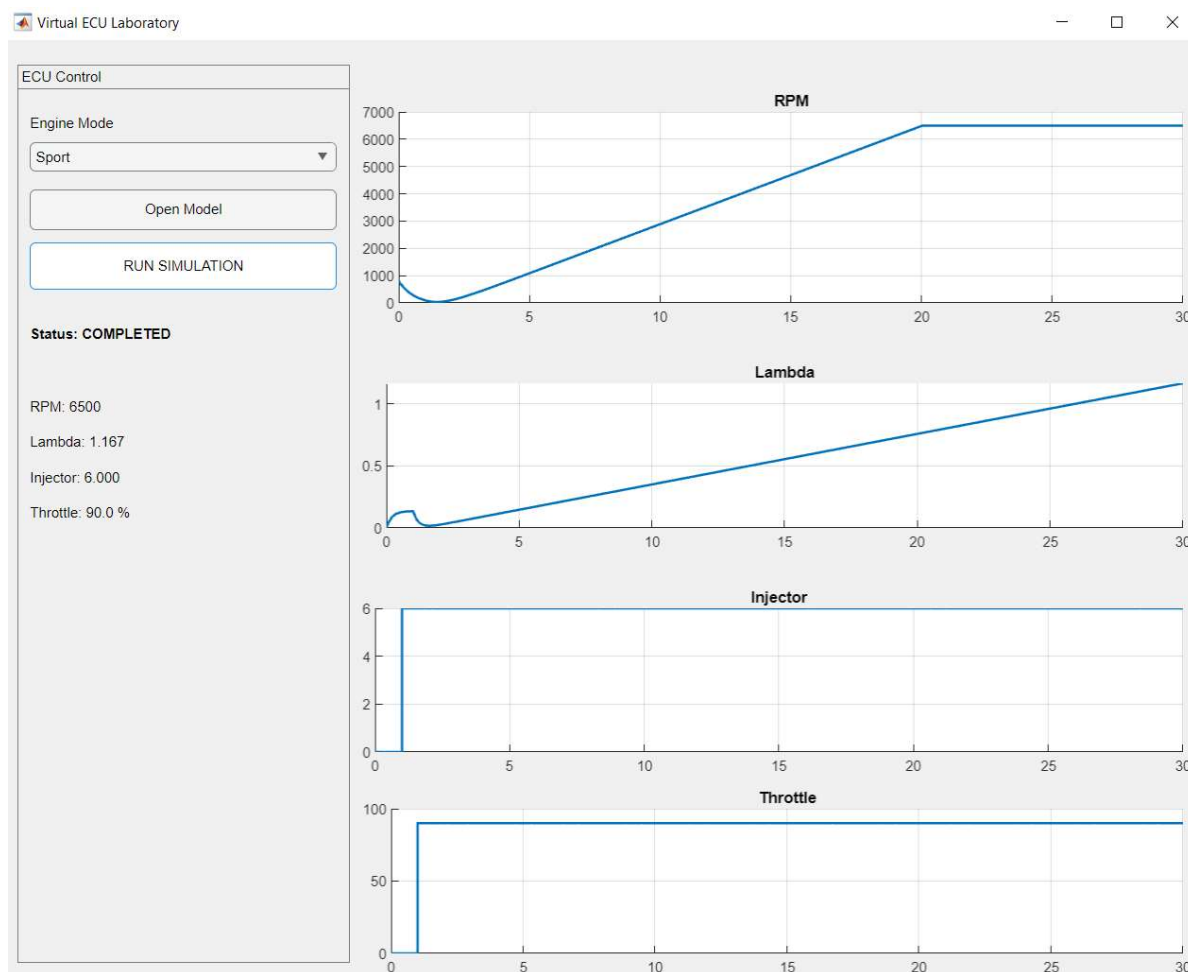


Рисунок В.5 - Графіки зміни частоти обертання двигуна, коефіцієнта надлишку повітря λ , тривалості імпульсу впорскування

Таблиця В.1 - Результати комп'ютерного експерименту для різних режимів роботи двигуна

Режим роботи двигуна	Дросельна заслонка, %	Оберти двигуна RPM, хв^{-1}	Коефіцієнт надлишку повітря λ	Тривалість імпульсу форсунки, мс
Idle	5	900	1.00	0.8
Eco	20	1800	1.02	1.5
Urban	25	2000	1.00	1.8
Highway	55	3500	0.98	3.2
Sport	90	6000	0.92	5.0

