

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики**

**Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем**

**Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису**

**РОМАНОВСЬКИЙ ОЛЕГ СЕРГІЙОВИЧ**

**УДК 621.43**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Розробка системи діагностування несправностей  
дизельних двигунів з турбонаддувом**

**208 “Агроінженерія”**

**Подається на здобуття освітнього ступеня магістр**

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ О.С. Романовський

**Керівник роботи**

**Куликівський В.Л.**

**кандидат технічних наук**

**Житомир – 2020**

## АНОТАЦІЯ

**Романовський Олег Сергійович. Розробка системи діагностування несправностей дизельних двигунів з турбонаддувом. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Дизельний двигун це складна система, яка в процесі функціонування забруднює навколишнє середовище. Суттєве зростання забруднення спостерігається при виникненні несправностей, саме тому необхідно застосовувати бортові системи діагностики, які виявляють несправність на ранніх стадіях.

За допомогою методів математичного моделювання розроблені моделі оцінки несправностей, які виникають при функціонуванні дизельних двигунів з турбонаддувом.

Для опису еволюції всіх станів системи, а саме тиску, температури, швидкості обертання та повітряних потоків, була побудована нелінійна модель поведінки дизельного двигуна. Ця модель була використана під час моделювання в *simuln/Matlab* завдяки використанню "S\_functions".

Модель має два входи управління, які є потоком палива і параметр змінної геометрії турбіни  $G_v$ , та тривожний вхід, яким є крутний момент.

Ефективним вдосконаленням системи діагностування дизельних двигунів є використання на першому кроці багатолінійної моделі для проектування багатолінійного фільтра (виявлення несправностей та ізоляційний оцінювач), а потім замінити багатолінійний оцінювач оригінальною нелінійною моделлю. Це вдосконалення дозволяє зменшити кількість лінійних моделей, що наближається до нелінійної моделі, і збільшити частоту змін вхідних сигналів.

*Ключові слова: дизельний двигун, несправність, модель, крутний момент, потік палива, нелінійна модель.*

## ANNOTATION

**Romanovsky Oleg Sergeevich. Development of a system for diagnosing malfunctions of turbocharged diesel engines.** – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

A diesel engine is a complex system that pollutes the environment during operation. A significant increase in contamination is observed in the event of malfunctions, which is why it is necessary to use on-board diagnostic systems that detect malfunctions in the early stages.

With the help of mathematical modeling methods, models for estimating faults that occur during the operation of turbocharged diesel engines have been developed.

To describe the evolution of all states of the system, namely pressure, temperature, speed and air flows, a nonlinear model of the behavior of a diesel engine was built. This model was used during simulation in simulin / Matlab using "S\_functions".

The model has two control inputs, which are the fuel flow and the variable geometry parameter of the turbine  $G_v$  and the alarm input, which is the torque.

An effective improvement of the diesel engine diagnostic system is to use a multi-line model in the first step to design a multi-line filter (fault detection and isolation estimator) and then replace the multi-line estimator with the original nonlinear model. This improvement reduces the number of linear models approaching the nonlinear model and increases the frequency of changes in the input signals.

*Keywords: diesel engine, malfunction, model, torque, fuel flow, nonlinear model.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРИНЦИПУ РОБОТИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ТА ПРИЧИН ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	7
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ В ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ.....	13
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ В SIMULINK/MATLAB ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ НЕСПРАВНОСТЕ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ З ТУРБОНАДДУВОМ.....	17
ВИСНОВКИ.....	25
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	27

## ВСТУП

Тривалий час дизельні двигуни вважались більш шкідливі для навколишнього середовища в порівнянні з бензиновими двигунами, на сьогодні ж дизельні і бензинові двигуни по кількості шкідливих викидів знаходяться на одному рівні [1-4]. Зростання кількості викидів спостерігається при виникненні несправностей, тому виробники автомобілів встановлюють системи визначення і усунення несправностей. В більшості випадків діагностується складові частини двигуна, а не двигун загалом, саме тому необхідно розробити сучасну систему діагностики яка б визначала технічний стан всього об'єкта (двигуна).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження підвищити якість діагностування дизельних двигунів з турбонадувом за рахунок використання нелінійних моделей оцінки несправностей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- Провести аналіз принципу роботи дизельного двигуна та причин забруднення навколишнього середовища;
- Провести моделювання процесу виникнення несправностей дизельного двигуна;
- Шляхом моделювання в Simulink/Matlab оцінити можливість застосування запропонованого підходу.

**Об'єкт дослідження:** процес діагностування дизельних двигунів з турбонаддувом.

**Предмет дослідження:** залежність виникнення відмов дизельного двигуна від величини подачі палива і параметра змінної геометрії турбіни та крутного моменту.

**Методи дослідження.** Дослідження виконано з використанням методів теорії ймовірності, математичного підходу Такагі-Сугено, теорії управління та комп'ютерного моделювання в Simulink/Matlab.

### **Перелік публікацій за темою роботи:**

1. **Романовський О. С.** Моделювання процесу виявлення несправностей в дизельних двигунах. Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 9-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 156-157.

2. Куликівський В. Л., **Романовський О. С.** Моделювання процесу забруднення навколишнього середовища вихлопними газами дизельних двигунів. Збірник тез доповідей V-її міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 113-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) *«Крамаровські читання»* 20-21 лютого 2020 року м. Київ : НУБІП України. С. 168-169.

3. **Романовський О. С.** Особливості роботи дизельних двигунів. Матеріали XXI Міжнародної наукової конференції *„Сучасні проблеми землеробської механіки”* присвяченої 90-річчю Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка та 120-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. 17 – 18 жовтня 2020 року Харків : ХНТУСГ ім. П. Василенка. С. 78-79.

**Практичне значення одержаних результатів.** Основні результати магістерської роботи спрямовані на вдосконалення системи діагностування дизельних двигунів з турбонаддувом і можуть бути використанні в процесі діагностування сільськогосподарської техніки.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 21 найменування. Загальний обсяг роботи становить 28 сторінок комп'ютерного тексту, містить 8 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПРИНЦИПУ РОБОТИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ТА ПРИЧИН ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Основний принцип роботи двигуна полягає у забезпеченні механічної енергії за рахунок перетворення хімічної енергії, що міститься в дизельному паливі. Основний механічний вузол складається з поршня, ковзаючого в циліндрі і з'єданого з колінчатим валом шатунно-кривошипним вузлом (рис. 1.1) [5].

Обертання відбувається в циклі, що складається з чотирьох тактів, а саме: всмоктування, стиснення, відскоку та вихлопу.

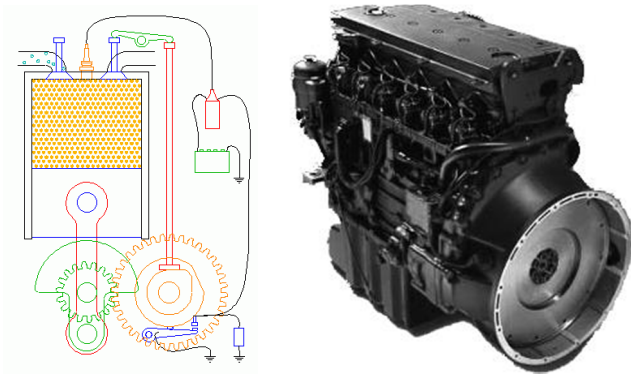


Рис. 1.1 З'єднання шатуна, кривошипа та колінчастого вала

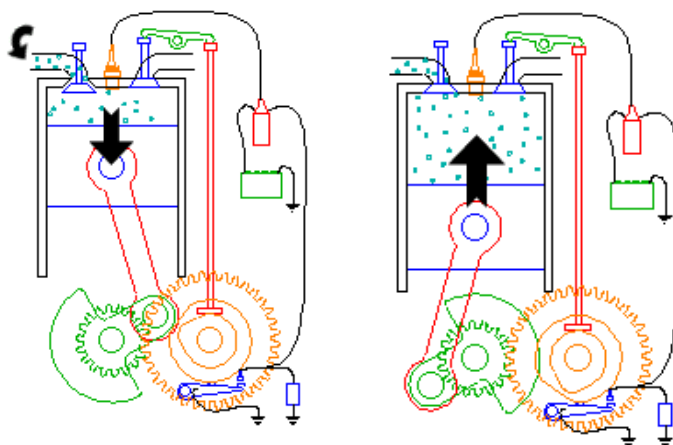


Рис. 1.2. Фаза впуску та стиснення

Фаза впуску починається з відкриття впускних клапанів із закритим випускним клапаном. Поршень рухається вниз від верхньої мертвої точки (ВМТ) до нижньої мертвої точки (НМТ) всмоктуючи повітря ззовні [5].

Під час фази стиснення обидва клапани (випускний і впускний) закриваються, а поршень піднімається, стискаючи газ. Потім, незадовго до того, як циліндр досягає ВМТ, у циліндр впорскується паливо.

Після затримки займання температура та тиск в камері згоряння такі, що відбувається самозаймання повітряно-паливної суміші та виробляється енергія, корисна для обертання двигуна.

Під час фази розширення обидва клапани закриті. Відбувається згоряння повітряно-паливної суміші, що спричинює рух поршня у напрямку до НМТ. Фаза характеризується збільшенням об'єму зайнятого газами і падінням тиску в камері згоряння.

Фаза вихлопу починається з відкриття випускного клапана, що призводить до розрідження в камері згоряння. Коли поршень піднімається до ВМТ, згорілі гази викидаються назовні. Кінець фази прийому починає наступний цикл.

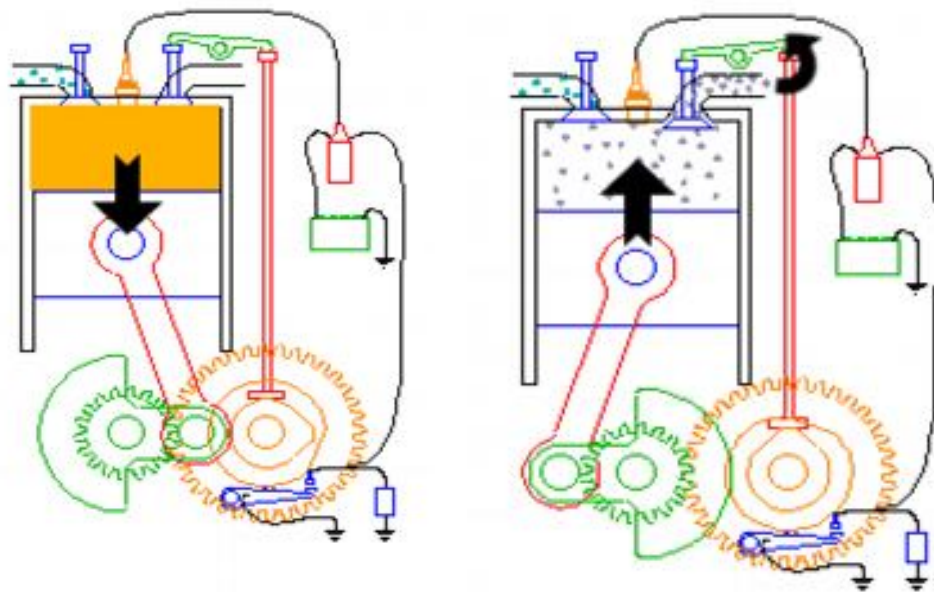


Рис. 1.3 Фаза розширення та виходу



На відміну від бензинового двигуна запалювання здійснюється стисненням повітряної паливної суміші, а суміш вводиться в циліндри окремо. Горіння зазвичай описується трьома фазами [5]:

- Перша фаза починається з впорскування палива в циліндр.
- Друга фаза – це займання суміші.
- Третя фаза – згоряння шляхом дифузії суміші, під час якої спалюється більше 75% палива.

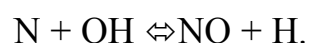
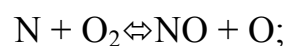
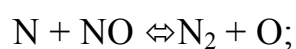
Повітря, що потрапляє під всмоктуванням, недостатньо для хорошого згоряння суміші, і продуктивність двигуна погіршується для певних діапазонів роботи, щоб подолати цей недолік, двигун наддувається повітрям. Наддув передбачає збільшення тиску повітря на впуску, що в свою чергу збільшує потужність двигуна. Компресор приводиться в дію або механічно від колінчастого вала, або від самої турбіни, яка може приводитися в рух вихлопними газами [5].

Дизельний двигун характеризується викидами оксидів азоту та шкідливих частинок. Однак, в результаті спалювання палива в дизельних двигунах дизеля утворюються чотири типи забруднення [6-9]:

- оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ )
- вуглеводні (HC)
- чадний газ (CO)
- частинки.

До оксидів азоту належать дві хімічні речовини – монооксид та діоксид азоту ( $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$ ). Вони сприяють появі кислотних дощів і шкодять здоров'ю людей, своєю дією на слизові оболонки. Основним джерелом цих викидів є окислення азоту з повітря при високих температурах.

Основні реакції такі [6-9]:



Викиди незгорілих вуглеводнів є результатом неповного згорання, пов'язаного з кількома явищами [6-9]:

- надмірне збагачення паливної суміші. Це збагачення пояснюється великими краплинами палива, що вводяться зі зниженими швидкостями. Тому їх складніше випаровувати та спалювати.

- горіння біля «стін». Температура біля стінок значно нижча за температуру горіння, що спричиняє додаткову кількість незгорівших матеріалів.

Оксид вуглецю (CO) утворюється при високих температурах. Однак він майже повністю окислюється під час фази розширення. Викиди CO, як правило, низькі для дизельного двигуна.

Враховуючи суттєву конструктивну різницю в будові дизельних двигунів, викиди також суттєво різняться. Так існує дві категорії дизельних двигунів, які відрізняються способом впорскування, це двигуни непрямого та прямого впорскування [6-9].

При прямому впорскуванні інжектор відкривається безпосередньо в циліндр. Основне розмежування відбувається між процесами розсіювання палива у повітрі та розсіювання плівки на стінках.

При непрямому впорскуванні, інжектор відкривається в камеру попереднього спалювання. Такий двигун був розроблений для усунення проблеми шуму від горіння. Через брак повітря в камері згорання кількість викинутої сажі більше, ніж для прямого впорскування.

Сучасними рішеннями впливу на кількість шкідливих викидів дизельних двигунів є [6-9]:

- рециркуляція газу;
- зміна геометрії турбокомпресора;
- регулювання вприску.

Викиди  $\text{NO}_x$  збільшуються з температурою спалених газів та концентрацією кисню. Одним з ефективних способів зменшити ці викиди є використання рециркуляції вихлопних газів.

Ця методика полягає у відновленні частини вихлопних газів на виході з циліндрів та у повторній циркуляції їх до впускного колектору за допомогою електромагнітного клапана.

До забруднювачів навколишнього середовища, які характеризують дизельні транспортні засоби належать оксиди азоту та складові частини вихлопних газів. При аналізі забруднення особливу увагу слід звертати на пари вихлопних газів, які в своєму складі мають вуглець, що здатен адсорбувати вуглеводні. На даний час показник екологічності вихлопних газів (згідно діючих нормативних документів) є прозорість вихлопних газів [6-9].

Складність явищ, що протікають одночасно участь при утворенні вихлопних газів призводять до того, що більшість моделей, запропонованих у літературі не є лінійними. Таким чином, деякі автори провели моделювання процесу утворення вихлопних газів та вплив всіх факторів (частота обертання, насиченість, температура вихлопних газів та ін.) на непрозорість газів з використанням методів штучного [10]:

$$O_p = f_1(\omega, T_e) \cdot m_{ao}^{f_2(\omega)} \omega \quad (1.1)$$

Ми пропонуємо розглядати більш реалістичну модель, припустивши, що непрозорість залежить не тільки від оборотів двигуна та збагачення суміші згоряння, але також і частини газів, що спалюються у фазі  $\beta$ :

$$\frac{O_p}{O_{p_{ref}}} = a \cdot \left(\frac{w}{w_{ref}}\right)^b \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_{ref}}\right)^c \cdot \exp\left(d \cdot \frac{1-\beta}{1-\beta_{ref}}\right) \quad (1.2)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $d$  – константи.

Моделювання процесу  $\beta$  повинно враховувати явища горіння всередині навіть при кінці циклу двигуна, зокрема в момент вприскування палива. Тут для простоти ми опускаємо цю останню залежність в моделі непрозорості, що означає, що параметри моделі непрозорості залежатимуть від неявного часу введення. Розглядаючи дизельний двигун як хімічну систему, що працює на повітрі та дизелі на основі хімічної кінетики отримуємо залежність:

$$O_p = (k_0 + k_1 \cdot w) \cdot m_{ao}^{a_0 + a_1 \cdot w} \cdot m_f^{b_0 + b_1 \cdot w} \quad (1.3)$$

Дана залежність дозволяє більш об'єктивно описувати процес утворення непрозорих продуктів згорання дизельних двигунів, які забруднюють навколишнє середовище.

### **Висновки по розділу 1.**

Дизельний двигун це складна система, яка в процесі функціонування забруднює навколишнє середовище. Суттєве зростання забруднення спостерігається при виникненні несправностей, саме тому необхідно застосовувати бортові системи діагностики, які виявляють несправність на ранніх стадіях.

## РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ В ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ

Для моделювання процесу виявлення несправностей використана багатолінійна модель типу Такагі-Сугено. Умови спостереження для системи впливають з матричних лінійних нерівностей, які можливо ефективно вирішити використовуючи нові методи оптимізації. Ці методи засновані на утворення та оцінці залишків: фільтруванням різниці між оціненим випуском та вимірним обсягом виробництва, що відображає зміну динаміки системи. Для досягнення надійності за наявності збурень та невизначеностей були запропоновані схеми, які засновані на оптимізації, де правильно підібраний показник продуктивності одночасно підвищує чутливість до несправностей та відхиляє порушення. Більшість методів вважають нелінійні системи лінійними системами, які інваріантні щодо часу навколо певної робочої точки. Помилка, обумовлена таким підходом, стає великою для збурень навколо робочої точки.

Однак нелінійна система може бути апроксимована багатолінійною системою Такагі-Сугено, яка складається з набору локально лінійних моделей. Вони плавно інтерполюються ваговими функціями, що є результатом нечіткого розбиття простору станів. Тоді нечітка система Такагі-Сугено є точним наближенням вихідної нелінійної системи.

У цьому підході використовується показник ефективності, який базується на мінімізації різниці між оцінками змінними стану та вимірними змінними стану.

Крім того, додається фільтр для виявлення низькочастотних параметрів, які, як правило є несправностями, а також для фільтрації високих частот, які зазвичай відображають порушення та шум.

Ефективним вдосконаленням цієї схеми є використання на першому етапі багатолінійної моделі для проектування багатолінійного фільтра (виявлення

несправностей та оцінки ізоляції), а потім заміна багатолінійної оцінки на модель оригінальних нелінійних рівнянь

Це вдосконалення дозволяє зменшити кількість лінійних моделей, що наближається до нелінійної моделі, оскільки за допомогою нелінійного оцінювача це дозволяє зменшити помилку моделювання між сигналами, що надходять від датчиків та оцінювачем дизельного двигуна, який може бути джерелом помилкових тривог. Крім того, кожна лінійна система контролера може контролювати похибку між оціненими та вимірними змінними станами до нуля на великій площі простору станів.

Нелінійна система може бути апроксимована локальними лінійними системами, які плавно інтерполюються ваговими функціями, що є результатом нечіткого розбиття простору станів нелінійної системи. Тоді нечітка модель Такагі-Сугено є точним наближенням нелінійної системи. Ці локальні лінійні моделі пов'язані з локальною лінеаризацією за допомогою ряду Тейлора початкової нелінійної системи навколо робочої точки.

У попередніх роботах було доведено, що нечітка модель Такагі-Сугено призводить до точного наближення нелінійної системи для будь-якої довільної траєкторії.

Розглянемо нелінійну систему форми:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, p) \\ y &= g(x, p) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$f: R^n \times R^m \times R^s \rightarrow R$  Не лінійна функція

$g: R \times R \rightarrow R$  Вимірювальна функція/

$x \in R^n$  : Основний вектор,  $u \in R^m$ : вхідний вектор,  $p \in R^s$  : вектор змінних в часі параметрів,  $y \in R^p$ : вихідний вектор.

Система Такагі-Сугено включає набір нечітких правил, де кожне правило "і" має вигляд:

$\alpha = \alpha \dots \alpha \in R$  вектор вимірних змінних, що є результатом множини  $\{x, u, p(t)\}$

$$ij : R \rightarrow [0,1]$$

Систему матриць  $(A_i, B_i, C_i, D_i)$  можна отримати лінеаризацією нелінійної системи навколо робочої точки  $(x_i, u_i, p_i)$ , що відповідає  $a^i$  в нечіткій області, описаній кожним правилом «і».

$$\begin{aligned} A_i &= \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(x_i, u_i, p_i)} & B_i &= \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{(x_i, u_i, p_i)} \\ C_i &= \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{(x_i, p_i)} & D_i &= \left. \frac{\partial g}{\partial u} \right|_{(x_i, p_i)} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Зверніть увагу, що  $(x_i, u_i, p_i)$  не є точкою рівноваги, це означає, що константу або афінний член у кожній підсистемі "і" можна отримати, якщо:

$$\begin{aligned} a_i &= f(x_i, u_i, p_i) - A_i x - B_i u \\ c_i &= g(x_i, p_i) - C_i x - D_i u \end{aligned} \quad (2.3)$$

Потім глобальна нечітка система Такагі-Сугено записується наступним чином:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^l \omega_i(\alpha) (A_i x + B_i u + a_i) + f_{um,x} = A(\alpha) x + B(\alpha) u + a(\alpha) + f_{um,x} \\ y &= \sum_{i=1}^l \omega_i(\alpha) (C_i x + D_i u + c_i) + f_{um,y} = C(\alpha) x + D(\alpha) u + c(\alpha) + f_{um,y} \\ A(\alpha) &= \sum_{i=1}^l \omega_i(\alpha) A_i \quad ; \quad B(\alpha) = \sum_{i=1}^l \omega_i(\alpha) B_i \quad ; \quad a(\alpha) = \sum_{i=1}^l \omega_i(\alpha) a_i \\ C(\alpha) &= \sum_{i=1}^l \omega_i(\alpha) C_i \quad ; \quad D(\alpha) = \sum_{i=1}^l \omega_i(\alpha) D_i \quad ; \quad c(\alpha) = \sum_{i=1}^l \omega_i(\alpha) c_i \end{aligned} \quad (2.4)$$

Цю функцію можна виконати за допомогою трикутних або гауссових функцій. Ми вибрали функції Гауса, зосереджені навколо різних точок лінеаризації, оскільки вони дозволяють плавно інтерполювати між різними системами.

$$\begin{aligned} h_i(\alpha) &= \prod_{j=1}^r \mu_j^i(\alpha_j) = \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{(\alpha_1(t) - \alpha_{1i})^2}{\sigma_{p1}^2} + \frac{(\alpha_2(t) - \alpha_{2i})^2}{\sigma_{p2}^2} + \dots + \frac{(\alpha_n(t) - \alpha_{ni})^2}{\sigma_{pn}^2} \right) \right) \\ \alpha(t) &= [\alpha_1(t), \dots, \alpha_r(t)] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Стандартні відхилення були обрані пропорційними відстані між двома сусідніми точками лінеаризації.

У стандартизованій формі їх можна записати:

$$\omega_i(\alpha) = \frac{h_i(\alpha)}{\sum_{k=1}^l h_k(\alpha)} \quad ;$$
$$\sum_{i=1}^l \omega_i(\alpha) = 1$$
(2.6)

### **Висновки по другому розділу.**

В другому розділі магістерської роботи за допомогою методів математичного моделювання розроблені моделі оцінки несправностей, які виникають при функціонуванні дизельних двигунів з турбонадувом.



### РОЗДІЛ 3

## МОДЕЛЮВАННЯ В SIMULINK/MATLAB ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ НЕСПРАВНОСТЕ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ З ТУРБОНАДДУВОМ

Модель дизельного двигуна оснащена трьома датчиками, які вимірюють:

1 – тиск вихлопних газів;

2 – Швидкість обертання;

3 – Тиск на вході (для деяких несправностей можна використовувати лише два датчики: тиск на вході та швидкість обертання).

У нашому випадку ми маємо три невідомі входи:

1 – параметр несправності (наприклад: 1 – діаметр отвору у впускній камері 2 – коефіцієнт зниження стиснення ...)

2 – Резистивний крутний момент;

3 – адитивна несправність датчика швидкості обертання (зміщення).

Система наступних матриць представляє лінеаризацію дизельної моделі, що змінюється між [1 мг/с-10мг/с] з кроком 1 мг/с. І  $G_v$  (коефіцієнт управління змінної геометрії турбіни), що змінюється між [0-1] з кроком 0,2. Резистивний крутний момент постійний і дорівнює 500 Нм. Отримуємо 60 лінійних моделей.

Як приклад ми можемо показати наступні матриці:

$$\dot{m}_f = 2 \text{ mg/s}; \quad Cr = 500 \text{ N.m} \quad ; Gv = 0$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.5291 & 1.864 & -113.58 & -1.6139 \\ -0.0130 & -27.707 & 3266.2 & 3.6604 \\ 0.0001 & 0 & -30.251 & -0.0270 \\ 81.761 & 0 & -14938 & -50.708 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 2.52 \cdot 10^6 & 0 & -14938 & 0 \\ 6.85 \cdot 10^7 & 0 & 2.46 \cdot 10^5 & 0 \\ 1.83 \cdot 10^6 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.78 \cdot 10^8 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{m}_f = 2mg/s; \quad Cr = 500 \text{ N.m} \quad ; Gv = 0.5$$

$$A = \begin{bmatrix} -1.0864 & 1.3428 & -107.41 & -0.1404 \\ -0.1850 & -16.85 & 3605.2 & 3.8019 \\ 0.0026 & 0 & -33.636 & -0.0322 \\ 158.21 & 0 & -19971 & -165.18 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 2.71 \cdot 10^6 & 0 & -10224 & 0 \\ 6.76 \cdot 10^6 & 0 & 3.22 \cdot 10^5 & 0 \\ 1.95 \cdot 10^6 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5.78 \cdot 10^8 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ми помічаємо, що матриці слабо обумовлені (у матриці “В” є дуже великі числа “-5.78.108” і дуже малі числа “-5”), отже це свідчить про відсутність задовільного результату, тому ми використовуємо стандартизаційні матриці для поліпшення кондиціонування матриць.

Для порівняння багатолінійної системи з нелінійною системою ми провели імітацію з використанням входів рис. 3.1 (витрата палива, змінна геометрія турбіни) [11-21].

На рис. 3.1 показано відповідність між нелінійною моделлю та багатолінійною моделлю для резистивного крутного моменту  $C_r = 500$  Нм та синусоїдальної варіації 5 мг/с і 10 мг/с і з періодом 30 секунд, а  $G_v$  коливається від 0,2 до 1 і з періодом 5 секунд. Вибір синусоїдальних входів може бути виправданий тим, що будь-який сигнал може бути розкладений на ряд синусоїдальних функцій.

Змодельювали отвір у впускній камері діаметром  $d=10$  мм при  $t=12$  с і зміщення в датчику швидкості 50 рад/с при  $t=10$  с. Несправність датчика швидкості, а також витік у впускній камері моделювались ступінчастою функцією.

Вважається, що швидкість потоку палива є змінною від 5 мг/с до 10 мг/с, а також змінний коефіцієнт геометрії турбіни  $G_v$  від 0,2 до 1, а резистивний момент  $C_r$  від 400 до 600 Нм.

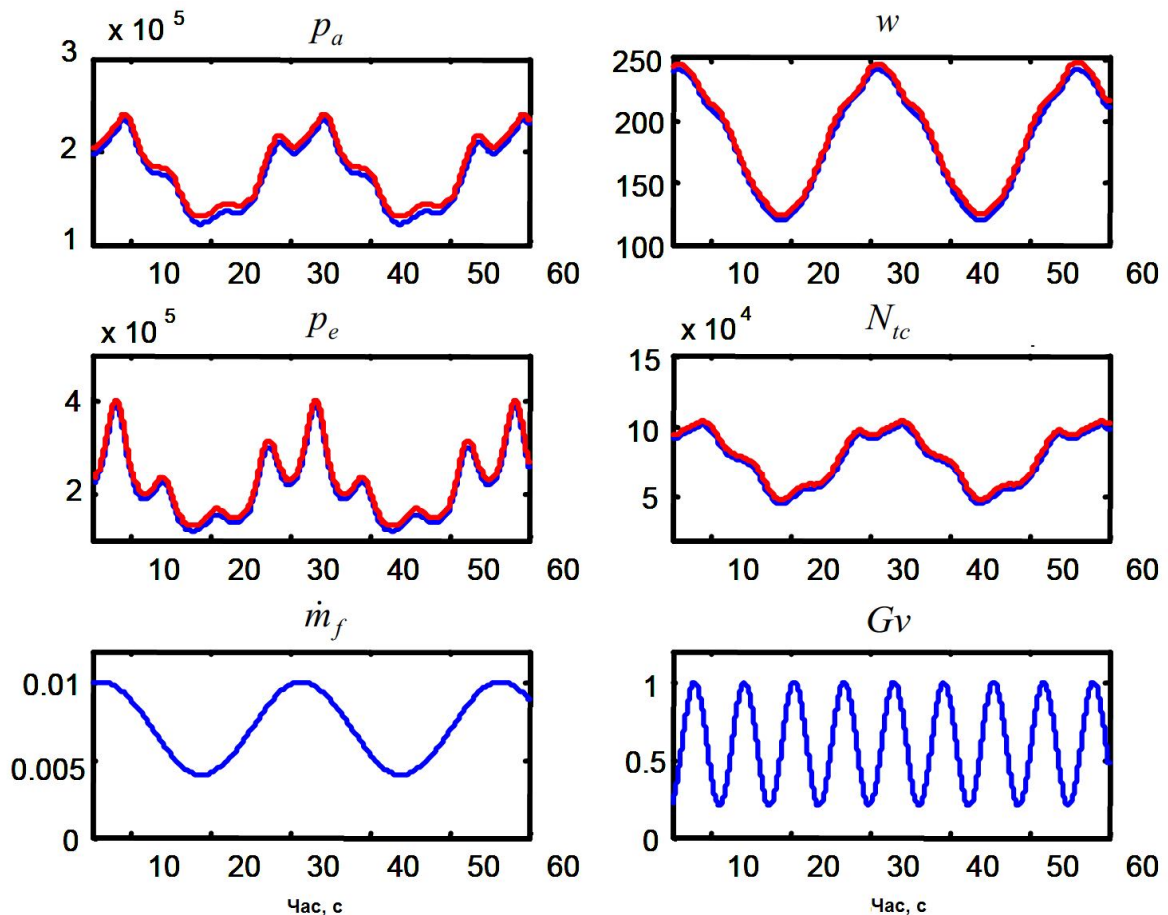


Рис. 3.1. Порівняння між багатолінійною та нелінійною моделями

Змодельовали отвір у впускній камері діаметром  $d=10$  мм при  $t=12$  с і зміщення в датчику швидкості  $50$  рад/с при  $t=10$  с. Несправність датчика швидкості, а також витік у впускній камері моделювались ступінчастою функцією.

Вважається, що швидкість потоку палива є змінною від  $5$  мг/с до  $10$  мг/с, а також змінний коефіцієнт геометрії турбіни  $G_v$  від  $0,2$  до  $1$ , а резистивний момент  $C_r$  від  $400$  до  $600$  Нм.

Ми вибрали синусоїдальну варіацію, оскільки будь-яка варіація може бути зведена до суми синусоїд шляхом чотирьохмірного розкладання.

З рис. 3.2 видно, що модель правильно оцінила діаметр отвору, зміщення в датчику швидкості та резистивний крутний момент  $C_r$ .

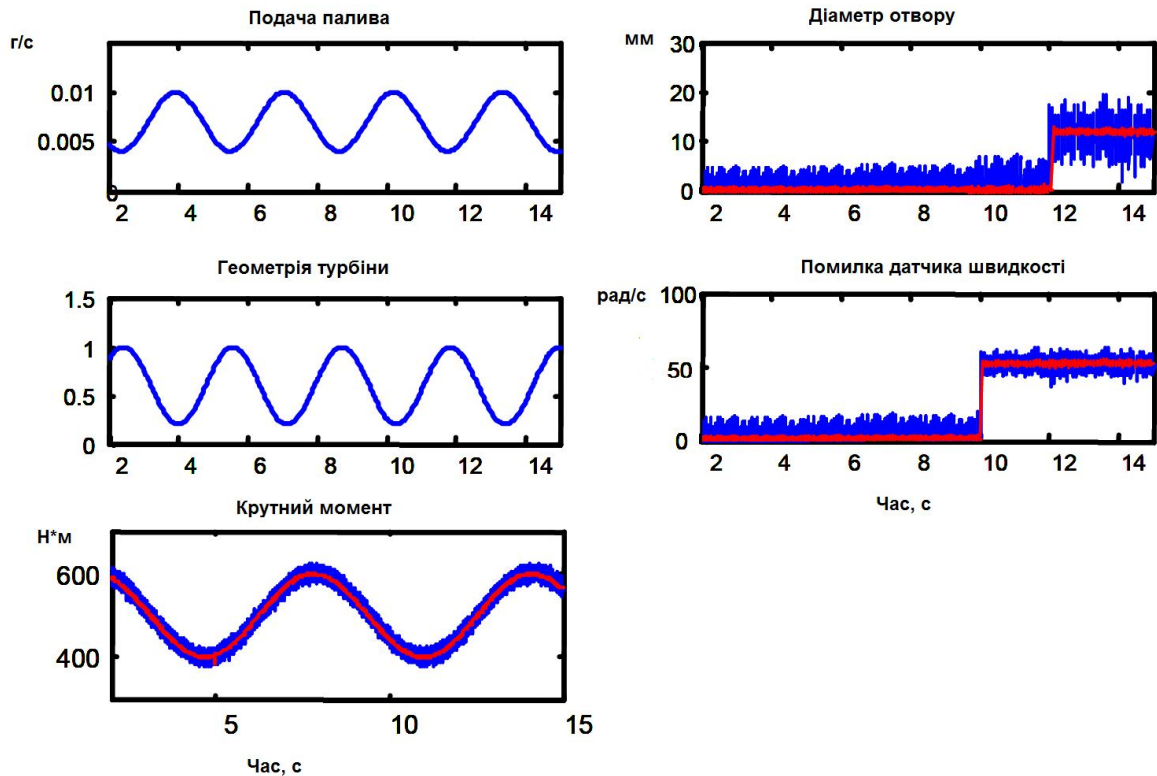


Рис. 3.2. Оцінка діаметра отвору у вхідній камері та зміщення датчика швидкості та резистивного моменту (розрахункові криві позначені червоним кольором).

На рисунку 3.3 показано моделювання несправності теплообмінника зі зниженням ефективності на 10% при  $t = 5\text{c}$  для, витрати палива та змінного резистивного моменту. Гауссів шум вводили в резистивний крутний момент і зниження коефіцієнта теплообмінника, щоб наблизити моделювання до реальності.

Як показано на рис. 3.3, діагност правильно виявив коефіцієнт зменшення обмінника, а також резистивний крутний момент фільтруючи шум.

Це показує ефективність управління послідовністю підсилення на основі «спостерігача» навіть за наявності шуму.

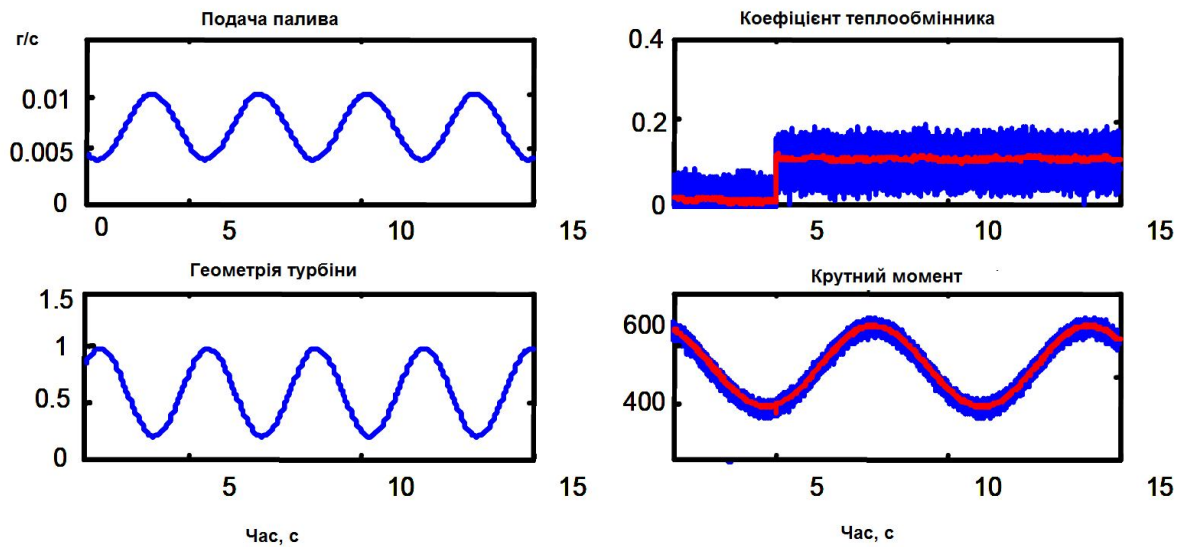


Рис. 3.3. Оцінка коефіцієнта відновлення теплообмінника та крутного моменту (розрахункові криві позначені червоним кольором).

На рис. 3.4 змодельовано дефект змінної геометрії турбіни від 10% до  $t=3$ с, таким же чином спостерігач виявив при  $t=3$  с коефіцієнт зменшення геометрії турбіни, рівний 10%, а також крутний момент.

На рис. 3.5 імітується несправність впускного клапана, змодельована коефіцієнтом зменшення витрати впускного повітря, який змінюється від нуля до 0,1 при  $t = 3$  с.

Шум вводився в крутний момент і коефіцієнт зменшення споживання. Як показано на рис. 3.5, було правильно оцінено коефіцієнт зменшення споживання, а також крутний момент навіть за наявності шуму.

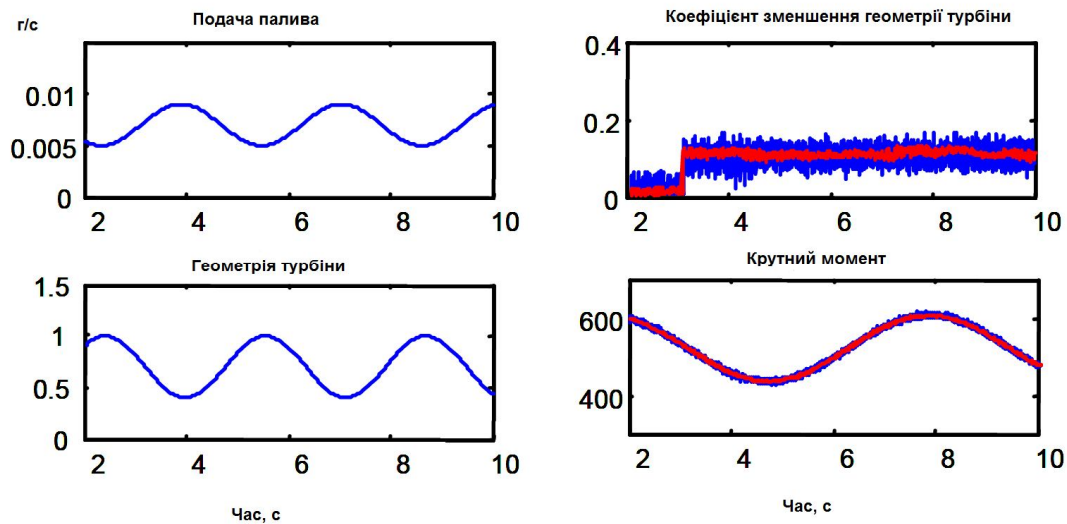


Рис. 3.4. Оцінка коефіцієнта зниження регулювання змінної геометрії та крутного моменту (розрахункові криві позначені червоним кольором)

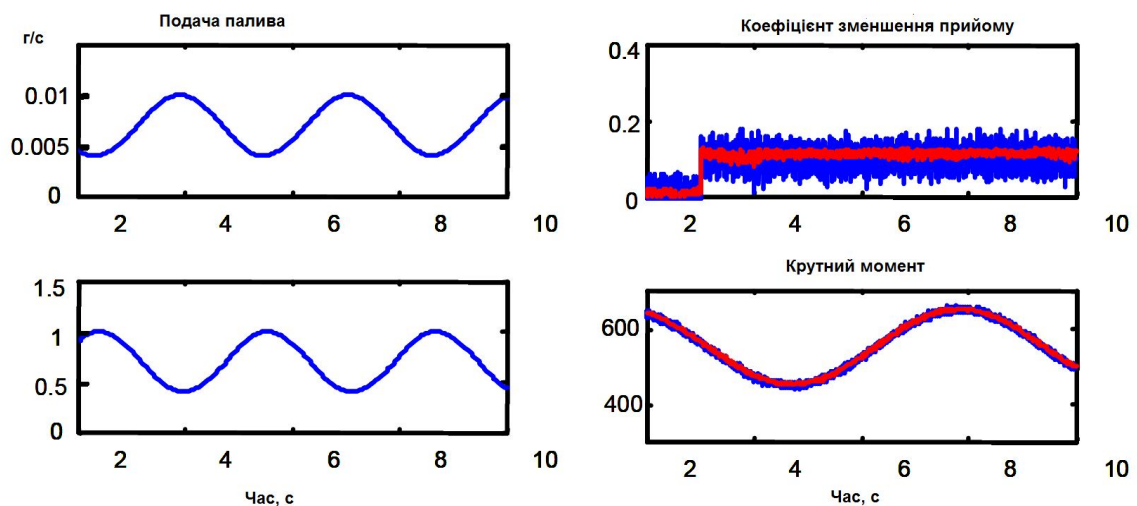


Рис. 3.5. Оцінка коефіцієнта зменшення споживання і крутного моменту, що містить гауссовий шум (розрахункові криві позначені червоним кольором).

### Висновки по розділу 3

В третьому розділі магістерської роботи представлено новий підхід до виявлення несправностей та ізоляції в нелінійній системі

Був використаний новий план оцінки, а саме невідомий спостерігач входу, заснований на теорії “Контроль за графіком посилення”. Розроблений

підхід був протестований на перевірній моделі дизельного двигуна та представлено результати моделювання.



## ВИСНОВКИ

Для опису еволюції всіх станів системи, а саме тиску, температури, швидкості обертання та повітряних потоків, була побудована нелінійна модель поведінки дизельного двигуна. Ця модель була використана під час моделювання в *simulink/Matlab* завдяки використанню "S\_functions".

Модель має два входи управління, які є потоком палива і параметр змінної геометрії турбіни  $G_v$  та тривожний вхід, яким є крутний момент.

Шляхом моделювання в *Simulink/Matlab* встановлено, що вплив кожної несправності на змінну стану дизельного двигуна не обов'язково однаковий і може залежати від робочої точки дизеля, а також від значення параметра несправності, оцінка параметрів кожної несправності стає важливою для полегшення завдання ізоляції.

Підхід до проектування виконавчого механізму діагностування дизельного двигуна та фільтра виявлення та ізоляції датчиків на основі теорії управління "послідовністю посилення" представлений у розділі 3. Для того, щоб розробити цей підхід, нелінійна система, що описує роботу дизеля апроксимується багатолінійною моделлю типу Такагі-Сугено (розділ 2).

Для того, щоб перетворити проблему спостереження на проблему управління, ми запропонували багатолінійний оцінювач змінних стану системи. Відповідно до цього методу різниця між змінними стану системи та висновком дозволяють побудувати багатолінійну систему помилок. Досить контролювати похибку оцінки до нуля, щоб отримати відповідний результат.

Умови спостереження є результатом квадратичних характеристик. Цими умовами є опуклі матричні лінійні нерівності, які можна ефективно вирішити, використовуючи нові методи оптимізації. Ефективним вдосконаленням є використання на першому кроці багатолінійної моделі для проектування багатолінійного фільтра (виявлення несправностей та ізоляційний оцінювач), а потім замінити багатолінійний оцінювач оригінальною нелінійною моделлю.

Це вдосконалення дозволяє зменшити кількість лінійних моделей, що наближається до нелінійної моделі, і збільшити частоту змін вхідних сигналів. Цей підхід був протестований на перевірній моделі дизельного двигуна у присутності шуму та були представлені результати моделювання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автомобиль и окружающая среда: Учеб. пособие / под. ред. П.М. Канило. Харьков : Прапор, 2000. 304 с.
2. Гутаревич Ю. Ф. Екологія автомобільного транспорту : навч. посіб. Національна транспортна академія. Київ : Основа, 2002. 312 с.
3. Гарсія Камачо Ернан Улліанодт, Сільва Рубіо Луїс Антоніо, Васильківський І. В. Контроль викидів двигунів внутрішнього згорання. “IV Всеукраїнський з’їзд екологів з міжнародною участю” (Екологія/Ecology-2017), 20-22 вересня, 2017. Збірник наукових праць. Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 182.
4. Марков В. А. Токсичность отработавших газов дизелів. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
5. Дубенко О.Я., Дубенко И.О. Расчеты параметров автомобильных двигателей. Ростов на Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2011. 420 с.
6. A. Ludu, T. Bouche, G. Lustgarten Emission compliance strategy for multiapplication medium speed engines . CIMAC Congress 2007, Vienna. №.258, 13p.
7. Мельник Г. В. Технологии снижения выбросов и ресурсосбережения в двигателестроении. *Двигателестроение*. 2011. №2. С.45-46.
8. Мельник Г. В. Технологии снижения вредных выбросов дизелей. Состояние и перспективы развития. *Двигателестроение*. 2011. №4. С.48-56.
9. Кухаренок Г. М. Обеспечение экологических показателей уровня ЕВРО-4 и ЕВРО-5 на автомобильных дизелях Минского моторного завода. *Вести автомобільно-дорожного інститута*. 2012. №1(14). С. 95–105.
10. Кухаренок Г. М. Снижение выбросов вредных веществ дизельных двигателей : монография. Москва : Новое знание, 2014. 220 с.
11. Шароглазов Б. А., Фарафонов М. Ф., Клементьев В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов : Учебник по

курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания». Челябинск : Изд. ЮУрГУ, 2005. 403 с.

12. Abell J. MATLAB and SIMULINK. Modeling Dynamic Systems. 2016. 196 p.
13. Abell J. MATLAB and SIMULINK. Simulink Introduction. Simulink Introduction. 2016. 185p.
14. Attaway S. Matlab: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving. Butterworth-Heinemann, 2013. 542 p.
15. Attaway S. MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving. Butterworth-Heinemann, 2019. 610 p.
16. Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смиронова Е. Н. MATLAB 7. Наиболее полное руководство. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург 2005 1104 с.
17. Васильев А. Н. Matlab. Самоучитель. Практический поход. 2-е издание. Санкт-Петербург : Наука и Техника, 2015. 448 с.
18. Дашенко А. Ф. и др. MATLAB в инженерных и научных расчетах Одесса : Астропринт, 2003. 214 с.
19. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1./7+Simulink5/6 - Основы применения. Москва : СОЛОН-Пресс, 2005. 800 с.
20. Потемкин В. Введение в MATLAB. М.: Диалог-МИФИ, 2000. 256 с.
21. Щербаков В. С., Руппель А. А., Глушец В. А. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде Matlab и Simulink. Учебное пособие. Омск : Издательство СибАДИ, 2003. 160 с.