

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій,
мехатроніки і робототехніки
Кафедра механічної інженерії та автомобільного транспорту**

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
освітнього ступеня магістр

Галузь знань 27 - «Транспорт»
Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»

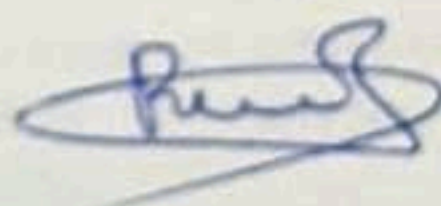
на тему: «Дослідження токсичності викидів сучасних автомобільних
атмосферних двигунів у процесі їздового циклу»

Виконав: студент групи ААГ - 22м



Керім ГУРЧИН

Керівник



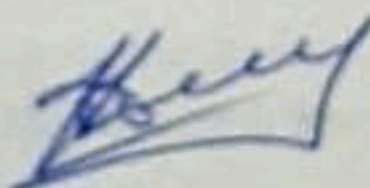
Дмитро РУБАН

Завідувач кафедри



Олександр МЕЛЬНИК

Рецензент



Дмитро Гетерський

Житомир - 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет: комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки

Кафедра: механічної інженерії та автомобільного транспорту

Освітній ступінь: «магістр»

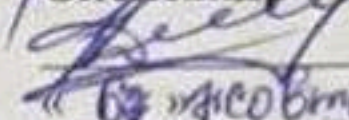
Галузь знань: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 274 - Автомобільний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МІ та АТ

Олександр МЕЛЬНИК


« 03 » жовтня 2025р.

ЗАВДАННЯ

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня магістр

Гурчина Керіма Костянтинівича

1.Тема роботи: «Дослідження токсичності викидів сучасних автомобільних атмосферних двигунів у процесі їздового циклу» затверджена наказом вищого навчального закладу від «6» жовтня 2025р. №569-с

Керівник роботи: д.т.н., проф. Дмитро РУБАН

2. Строк подання студентом завершеної роботи: 29.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: довідникова література, наукові розробки та публікації, державні стандарти.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, аналіз наукової літератури про методи зменшення токсичності сучасних автомобільних двигунів, методології оцінки емісій, розробка програмної моделі для обробки експериментальних даних, щодо токсичності викидів, огляд результатів експериментальних досліджень та моделювання токсичності в процесі їздового циклу, список використаних джерел.

5. Пояснювально - роздавальний матеріал (презентація) - 21 слайд.

Дата видачі завдання « 10 » вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

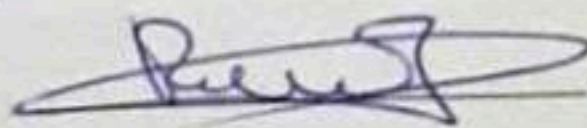
№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Аналіз наукової літератури про методи зменшення токсичності сучасних автомобільних двигунів	27.09.2025	виконано
2.	Методології оцінки емісій	28.10.2025	виконано
3.	Розробка програмної моделі для обробки експериментальних даних, щодо токсичності викидів	16.11.2025	виконано
4.	Огляд результатів експериментальних досліджень та моделювання токсичності в процесі їздового циклу	29.11.2025	виконано
5.	Оформлення роботи	10.12.2025	виконано
6.	Рецензування	29.12.2025	виконано
7.	Захист роботи	30.12.2025	виконано

Студент



Керім ГУРЧИН

Керівник роботи



Дмитро РУБАН

РЕФЕРАТ

Магістерської роботи на тему: «Дослідження токсичності викидів сучасних автомобільних атмосферних двигунів у процесі їздового циклу», виконаної студентом групи ААГ-22м, факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки державного університету «Житомирська політехніка» Гурчиним Керімом Костянтиновичем, керівник д.т.н., проф. Рубан Д.П.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

Магістерська робота присвячена дослідженню шляхів зниження токсичності сучасних автомобільних атмосферних двигунів. У роботі виконано аналіз наукової літератури, щодо механізмів утворення шкідливих викидів у бензинових та дизельних двигунах, розглянуто конструктивні та експлуатаційні фактори, що впливають на рівень емісії забруднюючих речовин, а також проаналізовано чинні екологічні нормативи та їздові цикли випробувань.

Значну увагу приділено методологіям оцінки емісій автомобільного транспорту, зокрема моделям середньої швидкості та миттєвих викидів, а також порівнянню підходів до експериментального та модельного визначення токсичності. У роботі представлено результати експериментальних досліджень, виконаних із використанням сучасного програмного середовища комп'ютерного моделювання та обробки даних, що дозволило здійснювати аналіз викидів у реальному часі, дослідити вплив холодного старту та параметрів їздового циклу на рівень токсичності вихлопних газів.

У результаті виконання роботи встановлено, що стиль керування транспортним засобом, режими руху та умови експлуатації мають суттєвий вплив на рівень викидів шкідливих речовин. Застосування комплексного підходу, який поєднує експериментальні вимірювання та моделювання їздового циклу, дозволяє підвищити точність оцінки емісій і визначити ефективні напрями зниження токсичності атмосферних двигунів. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем контролю викидів та підвищення екологічних показників сучасних автомобілів.

Ключові слова: *атмосферний двигун, токсичність, шкідливі викиди, їздовий цикл, емісія, моделювання, екологічні нормативи.*

ABSTRACT

Master's thesis on the topic: « Research on the toxicity of emissions of modern automobile atmospheric engines during the driving cycle, performed by a student of the AAG-22m group, the Faculty of Computer-Integrated Technologies, Mechatronics and Robotics of the Zhytomyr Polytechnic State University, Gurchyn Kerim Konstantinovich, supervisor: Doctor of Technical Sciences, Professor Ruban D.P.

The work consists of an introduction, four chapters, conclusions and a list of sources used.

The master's thesis is devoted to the study of ways to reduce the toxicity of modern automobile atmospheric engines. The work analyzes the scientific literature on the mechanisms of harmful emissions in gasoline and diesel engines, considers design and operational factors that affect the level of pollutant emissions, and also analyzes current environmental standards and driving test cycles.

Considerable attention is paid to methodologies for assessing emissions from motor vehicles, in particular models of average speed and instantaneous emissions, as well as a comparison of approaches to experimental and model determination of toxicity. The paper presents the results of experimental studies performed using a modern software environment for computer modeling and data processing, which allowed for real-time emission analysis, and to investigate the influence of cold start and driving cycle parameters on the level of exhaust gas toxicity. As a result of the work, it was established that the driving style of the vehicle, driving modes and operating conditions have a significant impact on the level of emissions of harmful substances. The use of an integrated approach that combines experimental measurements and driving cycle modeling allows to increase the accuracy of emissions assessment and identify effective directions for reducing the toxicity of atmospheric engines. The results obtained can be used to improve emission control systems and increase the environmental performance of modern cars.

Key words: *naturally aspirated engine, toxicity, harmful emissions, driving cycle, emission, modeling, environmental standards.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
Розділ 1. Аналіз наукової літератури, щодо методів зменшення токсичності сучасних автомобільних двигунів.....	10
1.1 Проблеми зниження токсичності автомобільного транспорту.....	10
1.2 Методи зменшення викидів забруднюючих речовин у бензинових та дизельних двигунах автомобілів	14
1.2.1 Система рециркуляції відпрацьованих газів (EGR).....	14
1.2.2 Потужність та ефективність мотора.....	15
1.2.3 Пропорція повітря та палива.....	16
1.2.4 Пристрої для очищення відпрацьованих газів.....	17
1.2.5 Дизельний сажовий фільтр.....	18
1.3 Будова і використання бензинових двигунів та дизельних агрегатів....	20
1.4 Спалювання викопного енергоносія.....	20
1.5 Утворення забруднюючих речовин.....	22
1.5.1 Викиди NO_x	24
1.5.2 Емісії вуглеводнів (HC).....	24
1.5.3 Тверді частки.....	26
1.5.4 Діаграми ефективності мотора.....	28
1.5.5 Вплив конструктивних та експлуатаційних факторів на обсяг емісії...28	
1.5.6 Бензинові двигуни.....	28
1.5.7 Момент запалювання.....	29
1.5.8 Синхронізація клапанів.....	30
1.6 Законодавство про викиди та випробування.....	31
1.6.1 Їздовий цикл.....	32
1.6.2 Міський цикл та позаміський цикл.....	33
1.6.3 Емісійні ліміти. Легкові автомобілі та малотоннажний транспорт (до 2500 кг).....	36
Висновки до розділу.....	38
Розділ 2. Методології оцінки емісій(викидів).....	39
2.1 Методики підрахунку емісій(викидів) та інформаційні масиви.....	39
2.1.1 Модель середньої швидкості.....	39
2.1.2 Модель миттєвих викидів.....	40

2.2 Аналіз та порівняння методик оцінки емісій автотранспорту.....	40
2.3 Аналіз та зіставлення підходів до моделювання емісії автотранспорту...	45
Висновки до розділу.....	47
Розділ 3. Розробка програмної моделі для обробки експериментальних даних, щодо токсичності викидів.....	48
3.1 Модель реалізації LabVIEW.....	48
3.1.1 Функціонал реального часу для аналізу емісій.....	48
3.1.2 Модуль для процедури холодного старту.....	52
3.1.3 Дослідження та аналіз моментальної швидкості та прискорення транспортного засобу з метою визначення їздового профілю.....	53
3.1.4 Модуль аналізу даних.....	53
3.2 Типи викидів та підходи до моделювання.....	54
Висновки до розділу.....	56
Розділ 4. Огляд результатів експериментальних досліджень та моделювання токсичності в процесі їздового циклу.....	57
4.1 Аналіз результатів вимірів під час проведення експериментів.....	57
4.1.1 Тестування в режимі очікування.....	57
4.1.2 Короткий міський маршрут.....	62
4.1.3 DCU-випробування на автомагістралі.....	65
4.2 Порівняння результатів.....	69
4.2.1 Тестування вулично-дорожньої мережі та швидкісних трас.....	69
4.2.2 Визначення коефіцієнтів викидів.....	71
4.3 Підбиття підсумків дослідження.....	77
4.3.1 Визначення початкового циклу водіння.....	77
4.3.2 Аналіз споживання енергії під час руху.....	78
Висновки до розділу.....	81
Висновки.....	82
Список використаних джерел.....	83

ВСТУП

Актуальність роботи та наукова значущість цього дослідження.

Проблема вмісту шкідливих домішок в атмосфері набуває все більшої уваги у сфері транспорту, переважно через забруднення, що створюється автомобільними вихлопами в населених пунктах. Актуальність оцінювання реального обсягу забруднюючих речовин у повітрі поширюється, як на територію Європи, так і на світові масштаби. Шкода, що завдається екосистемі та здоров'ю людей вихлопами з транспортних засобів, є значною. Чадний газ (CO), наприклад, є летальною загрозою в не вентилюваних приміщеннях, що підтверджено науковими роботами. Також виділяється канцерогенний ефект від впливу речовин, які у автомобільних вихлопах, що підвищує рівень тривоги серед населення контексті збільшення глобальної транспортної активності. Водночас, питання ефективності використання енергоресурсів у транспортній сфері у низці країн, що розвиваються, залишаються недостатньо освітленими в порівнянні з прогресом у промислово розвинених державах. Враховуючи стрімке зростання чисельності та мобільності населення в країнах, що перебувають на шляху розвитку, нагальним завданням стає запровадження стратегій щодо зниження рівня вуглецевих викидів та розробка стійких транспортних систем.

Таким чином, вивчення методів мінімізації шкідливих викидів сучасних автомобільних двигунів в атмосферу є значною проблематикою для магістерського дослідження.

Метою роботи є дослідження шляхів зниження токсичності сучасних автомобільних атмосферних двигунів.

Досягнення поставленої мети забезпечується вирішенням наступних задач:

- проаналізувати науково-технічну літературу, щодо проблем токсичності викидів автомобільного транспорту та способів її зменшення;
- розглянути основні чинники, що впливають на утворення забруднюючих речовин у бензинових і дизельних атмосферних двигунах;

- розробити та реалізувати програмну модель для обробки експериментальних даних, щодо токсичності викидів автомобільного двигуна;
- виконати аналіз експериментальних даних і здійснити порівняльну оцінку токсичності викидів автомобільного двигуна в різних режимах руху.

Об'єкт дослідження. Атмосферний двигун внутрішнього згоряння автомобіля.

Предмет дослідження. Шляхи зниження токсичності атмосферного двигуна внутрішнього згоряння автомобіля.

Практична цінність полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем контролю викидів та підвищення екологічних показників сучасних автомобілів.

РОЗДІЛ 1. Аналіз наукової літератури, щодо методів зменшення токсичності сучасних автомобільних двигунів

Атмосферне забруднення в урбанізованих районах визначається як критична екологічна загроза здоров'ю глобального співтовариства [1]. У контексті нещодавно прийнятих екологічних норм та законів, постало актуальне завдання розробки ефективних методик для оцінки обсягів викидів від автомобільного транспорту. Розроблені технології для вимірювання емісії повинні гарантувати точний моніторинг рівня токсичних газів, що викидаються автотранспортом, що виходять з їх вихлопних систем. Серед шкідливих речовин, що випускаються в атмосферу, зустрічаються вуглеводні (НС), оксиди азоту (NO_x), чадний газ (CO), двоокис вуглецю (CO_2), частинки сажі (PM) та сірчаний ангідрид (SO_x). Екологічна шкода від таких викидів проявляється у формуванні атмосферного забруднення, виникненні смогу, кислотних опадів, пошкодженні легеневої та печінкової тканини, ризик розвитку онкології та серцево-судинних захворювань, а також у прискоренні процесів глобальної зміни клімату.

1.1 Проблеми зниження токсичності автомобільного транспорту

Автовиробники та автолюбители мають можливість сприяти зменшенню забруднюючих викидів, застосовуючи три різні методики (рис. 1.1):

- оптимізація роботи двигуна через впровадження електронного управління запаленням, інжекторних систем подачі палива, та використання ЕБУ (електронних блоків управління) для регулювання обсягів палива, що споживається двигуном;
- покращення продуктивності автомобіля через використання легких матеріалів, мінімізацію аеродинамічного опору, оптимізацію роботи трансмісії та впровадження системи рекуперації енергії при гальмуванні;
- уніфіковані методи керування автомобілем, вільні від перешкод дорожні умови, підтримання максимально ефективної швидкості транспортного засобу та зменшення кількості пусків двигуна на холодну.



Рис. 1.1 - Підходи до скорочення викидів

Як ілюстрація методу зменшення вихлопів за допомогою моторної інновації сьогодні застосовується трикомпонентна каталітична система (рис. 1.2), що одночасно вирішує три функції [2]:

- процес редукції оксидів азоту, що призводить до утворення молекулярного азоту та кисню (1):
- процес трансформації монооксиду вуглецю (чадного газу) у діоксид вуглецю (вуглекислий газ) (2):
- перетворення незгорілих вуглеводнів на вуглекислий газ і воду відбувається через процес окислення (3).

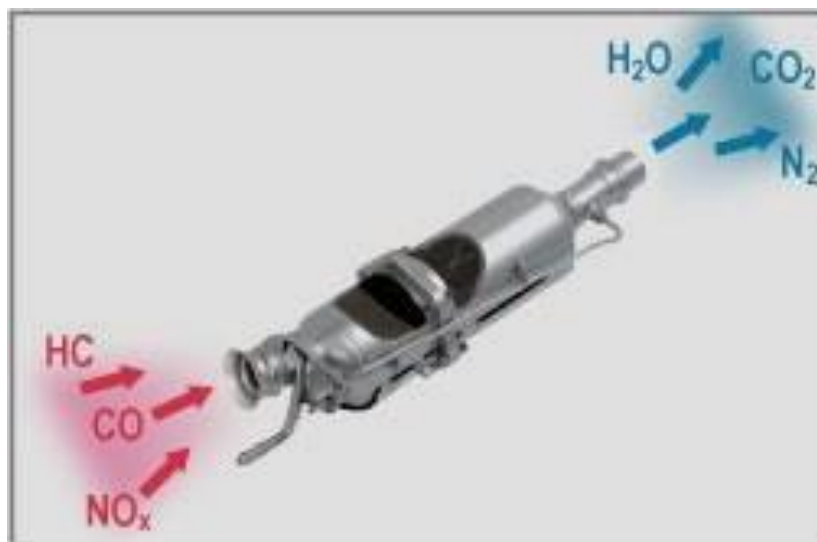


Рис. 1.2 - Трикомпонентні каталітичні нейтралізатори

- відновлення оксидів азоту шляхом перетворення в азот та кисень (1.1):



де NO_x - оксиди азоту NO або NO_2 ;

O_2 - кисень;

N_2 - азот;

- окиснення чадного газу до чадного газу (1.2):



де CO - оксид вуглецю;

CO_2 - діоксид вуглецю;

- окислення вуглеводнів (HC), що не згоріли, до чадного газу та води (1.3):



де C_xH_y - вуглеводні, в яких;

x - кількість атомів вуглецю у молекулі вуглеводню, y - кількість атомів

водню у молекулі вуглеводню, H_2O - вода.

Каталізатори служать для зменшення емісії шкідливих компонентів з вихлопних газів автомобілів, у світі періодично впроваджуються оновлені норми екологічної безпеки, метою яких є посилення вимог до рівня викидів від нової автотехніки [3].

Дані розрахунки дозволяють оцінити теоретичні рівні емісії для кожного типу шкідливих речовин, які, незважаючи на свою високу точність, все ж таки не враховують індивідуальний вплив стилю водіння окремих водіїв на реальні викиди. Детальний аналіз цих аспектів буде представлений у наступному літературному огляді (рис. 1.3) [4].



Рис. 1.3 - Методика оперативного усунення забруднення вулиць

Застосування пристрою аналізу даних системи бортової діагностики автомобілів (OBD), званого сканером Elm 5, сприяє вимірюванню рівнів емісії забруднюючих речовин. Цей пристрій також здатний фіксувати характеристики руху авто. Даний водійський цикл надає інформацію про середній режим руху

дорогами, включаючи стиль керування транспортним засобом [5].

Газоаналізатор Autologic - це компактний прилад для аналізу газів, сумісний з кишеньковими ПК та пристроями на базі ОС Windows, включаючи персональні комп'ютери та ноутбуки, як зазначено на рис. 1.4. Цей аналізатор розроблено для застосування в умовах реальної експлуатації транспортних засобів, де особливо цінуються його надійність та висока точність вимірів. Шляхом підключення зонда до вихлопної системи автомобіля газоаналізатор здійснює відбір проб викидів, які потім аналізуються. Передача зібраних даних здійснюється через Bluetooth на кишеньковий ПК. Спеціалізоване ПЗ Autologic обробляє результати та візуалізує інформацію про склад викидів на дисплеї. Газоаналізатор здатний визначати концентрацію п'яти видів газів: вуглеводні (HC), оксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO₂), оксиди азоту (NO_x) та кисень (O₂).



Рис. 1.4 - Газоаналізатор [5]

1.2 Методи зменшення викидів забруднюючих речовин у бензинових та дизельних двигунах автомобілів

1.2.1 Система рециркуляції відпрацьованих газів (EGR)

У процесі роботи двигуна внутрішнього згоряння вихлопні гази змішуються

з відпрацьованим газом, що залишився від попередніх етапів робочого циклу, формуючи в камері згоряння сукупність продуктів горіння. Ця суміш виступає у ролі дилуента, що зменшує концентрацію кисню і цим впливає процес горіння в циліндрі [6]. Це, у свою чергу, сприяє зменшенню утворення оксидів азоту (NO_x), що є позитивним аспектом використання системи рециркуляції газів, що відпрацьовали (EGR). Однак, застосування даної системи пов'язане зі збільшенням вуглеводнів, що викидаються в атмосферу, що обумовлено уповільненням реакції згоряння і посиленням відмінностей у процесах горіння від циклу до циклу через зниження ступеня збагачення суміші.

1.2.2 Потужність та ефективність мотора

Часто використовуваним методом демонстрації продуктивності двигуна внутрішнього згоряння різних рівнях його роботи служить складання кривої витрати палива, що відображається на двовісній сітці, де горизонтальна вісь представляє обороти двигуна, а вертикальна - його завантаження. До ключових елементів, що визначають завантаження, входять такі фактори, як аеродинамічний опір, зчеплення шин з поверхнею дороги, інтенсивність прискорення транспортного засобу, кут підйому або спуску дороги, внутрішнє тертя механічних компонентів двигуна та споживання енергії допоміжними системами, наприклад, системою кондиціонування повітря [14].

У ході наукового аналізу, спрямованого на виявлення взаємозв'язку між кутом нахилу проїжджої частини та рівнем забруднення, було виявлено суттєве підвищення викидів при ухилі 3,8%. Попередні дослідження вказували на зростання вмісту NO_x та CO зі збільшенням питомої потужності, демонструючи безпосередньо пропорційний зв'язок цих параметрів (1.4) [7].

$$P_s = \frac{F_e \cdot v}{M \cdot v}, \quad (1,4)$$

де P_s - питома потужність;

F_e - опір руху автомобіля;

v - швидкість обертання;

M - крутний момент двигуна.

Дослідження також охоплювало аналіз того, як стиль керування впливає на рівень виділення шкідливих речовин. Поведінка за кермом класифікувалася на три типи: спокійна, помірна і агресивна, кожному з яких притаманні унікальні моделі акселерації та уповільнення. Один і той самий водій проводив експерименти у всіх режимах. В результаті агресивний стиль водіння призвів до чотириразового зростання емісії шкідливих речовин у порівнянні з помірним [8].

1.2.3 Пропорція повітря та палива

Баланс між повітрям та паливом критично впливає на виробничі показники мотора. У процесі тестування двигуна безпосередньо проводяться вимірювання споживання палива та повітряного потоку [9].

Ефективність згоряння палива в двигуні регулюється системою подачі палива, компонування якої має на увазі точне порівняння з об'ємом повітря, що надходить у двигун, забезпечуючи оптимальні умови його роботи. Робочі параметри двигуна залежать від пропорції між повітрям та паливом, вираженої через відносне значення чи коефіцієнт надлишку повітря ϕ . У контексті іскрових двигунів термін «бідна» суміш свідчить про переважання повітря над паливом, тоді як «багата» суміш передбачає надлишок палива проти повітрям, що критично впливає процес горіння (рис. 1.5) [10].

Ключові параметри, що впливають на генерацію забруднюючих речовин, включають рівень вмісту кисню та максимальні температури згоряння циліндрів двигуна. Тому пропорція повітря до палива відіграє важливу роль у регулюванні цих факторів. Як показано на графіку в дослідженні, недостатньо збагачена паливна суміш сприяє підвищенню рівня емісії вуглеводневих сполук, викликаного недоліком кисню для повного окислення частинок, що не згоріли [5].

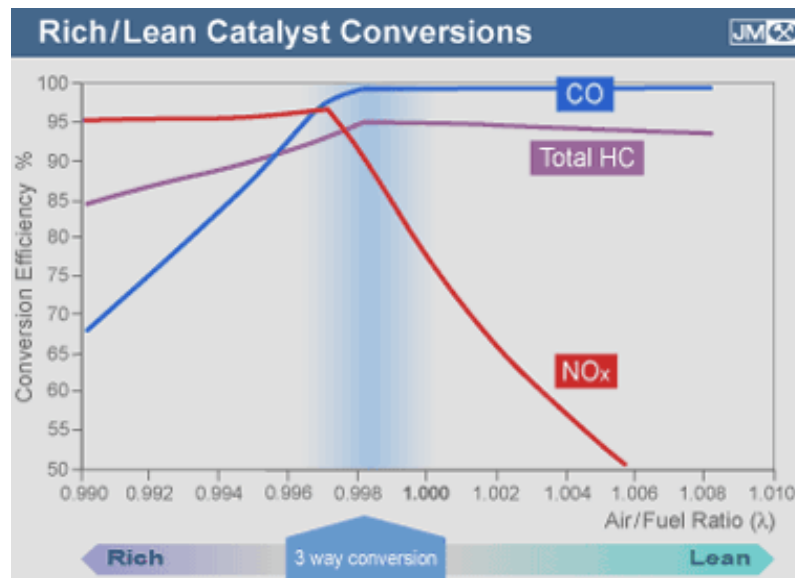


Рис. 1.5 - Вплив складу суміші (відношення повітря до палива $1/\alpha$) на викиди двигуна з іскровим запалюванням [19]

У разі застосування збіднених сумішей процес не повного згоряння призводить до експоненційного зростання рівня викидів вуглеводнів, обумовленого або неповними циклами згоряння, або відсутністю іскри запалювання [11].

1.2.4 Пристрої для очищення відпрацьованих газів

В автомобілі між випускним колектором та глушником розміщується ключова екологічна система, відома як трикомпонентний каталітичний нейтралізатор.

Каталітичний конвертер (рис. 1.6) являє собою пристрій, що містить камеру каталітичної реакції для перетворення шкідливих вихлопних газів їх менш небезпечні аналоги. Стандартний трикомпонентний каталітичний нейтралізатор здатний перетворювати понад 95% чадного газу (CO), оксидів азоту (NO_x) і вуглеводнів (HC) в діоксид вуглецю (CO₂), азот (N₂) та водяні пари (H₂O) відповідно [12].

Каталітичний конвертер, виконаний з корпусу з нержавіючої сталі, містить усередині керамічну сотоподібну структуру. Нанесений на цю структуру алюмінієвий оксид є основою для дорогоцінних металів - платини та родію.

Платина ефективно сприяє хімічному окисленню чадного газу та вуглеводнів, тоді як родій бере активну участь у процесі редукції оксидів азоту [13].

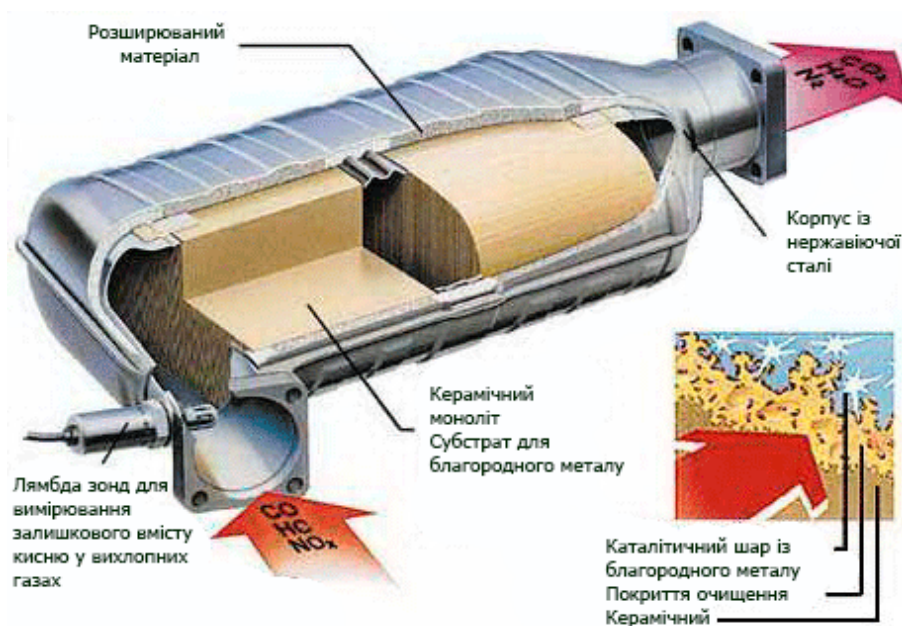


Рис. 1.6 - Схема трикомпонентного каталітичного нейтралізатора [20]

Каталітичний конвертер починає функціонувати приблизно 300°C. В інтервалі 800°C до 1000°C каталізатор зазнає руйнування своїх активних компонентів, таких як платина та родій. Підвищення температури до значень понад 1000 С прискорює деградацію каталізатора. Використання етилованого палива або надмірно потрапляє масло сприяють його отруєнню [14].

1.2.5 Дизельний фільтр сажі

Дизельний фільтр сажі (DPF), представлений на рис. 1.7 вважається ключовим компонентом системи очищення вихлопних газів автомобіля, метою якого є ефективне видалення забруднювачів з газів, що виробляються двигуном, перед їх викидом у навколишнє середовище. У відповідь на суворіші норми Євросоюзу обмеження вихлопних газів, розробка та впровадження інноваційних методів фільтрації, здатних утримувати частки сажі та знижувати концентрацію токсичних компонентів у вихлопах до їх виведення із системи вихлопу, стає пріоритетним завданням. DPF забезпечує скорочення шкідливих викидів за

рахунок використання сучасних технологій, що фільтрують. [21].

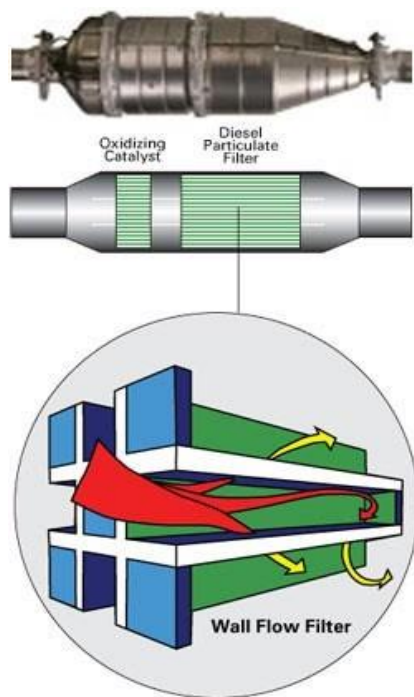


Рис. 1.7 - Дизельний фільтр сажі [22]

При досягненні порогу активується механізм регенерації DPF, який значно підвищує температуру всередині фільтра (до 300-350 °C), ініціюючи процес згоряння сажі [15].

У певних ситуаціях, коли досягнення необхідної температури неможливе, наприклад, через безліч коротких поїздок або зупинок двигуна, процес регенерації дизельного фільтра сажі (DPF) може не ініціюватися. Активація індикатора DPF сигналізує необхідність втручання для початку регенерації, що вимагає руху на таких оборотах двигуна, які сприятимуть збільшенню температури вихлопних газів до оптимального рівня. У випадку, коли ці дії не вживаються і світловий індикатор продовжує горіти, це вказує на накопичення сажі, що загрожує ефективності роботи DPF [16].

Коли кілька індикаторів освітлення активуються одночасно, доцільно негайно звернутися до сервісного центру для регенерації. Нехтування цією порадою може призвести до зменшення вихідної потужності двигуна і, як наслідок, блокування фільтра твердих частинок (DPF). У випадку, якщо

блокування DPF досягає рівня, при якому регенерація стає неможливою, буде потрібно його заміну [17].

1.3 Будова та використання бензинових двигунів та дизельних агрегатів

У дизельному двигуні повітря стискається в камері, після чого вводиться паливо, що самозаймається від високого тиску, що призводить до роботи двигуна. Таким чином, згоряння в дизельних двигунах відбувається при стабільному тиску, тоді як у бензинових двигунах воно відбувається при стабільному обсязі [18].

Двигуни внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням (SI) та дизельні двигуни (CI) відносяться до категорії поршневих двигунів. У таких двигунах поршні виконують зворотно-поступальні рухи всередині циліндрів, трансформуючи цим хімічну енергію палива в механічну роботу. Ця робота передається на колінчастий вал через систему шатунів і кривошипів, забезпечуючи його постійне обертання і рухаючи транспортний засіб. Для здійснення цього процесу застосовуються різні робочі цикли, включаючи двотактні та чотиритактні. Двотактний цикл дозволяє завершити процес згоряння та випуску за один повний оберт колінвала, тоді як чотиритактний - за два обороти. У сучасних легкових автомобілях найчастіше використовують чотиритактні двигуни, що було також підтверджено в рамках цього аналізу [20].

1.4 Спалювання викопного енергоносія

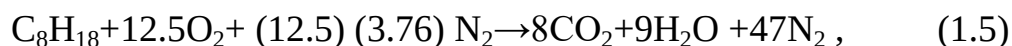
Паливо може бути охарактеризовано як будь-який ресурс, здатний до окислювального розкладання з метою вивільнення енергії рахунок хімічних процесів. Основна хімічна реакція, що відбувається у процесі використання палива, відома як окисне горіння. Щоб процес горіння міг протікати повністю, необхідно наявність певної кількості кисню, одержуваного з атмосферного повітря. Цей обсяг кисню, що ідеально відповідає необхідній пропорції для

повного згоряння палива, визначається як стехіометричний або теоретично необхідне повітря. Процес, при якому все паливо реагує з доступним киснем для згоряння, називається стехіометричним горінням, що демонструється на рис. 1.8 [23].



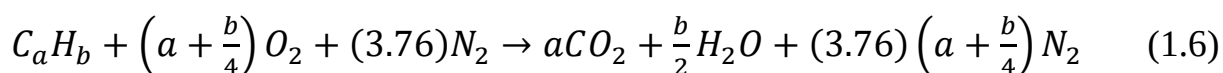
Рис. 1.8 - Ідеальне згоряння вуглеводневого палива в камері згоряння

У результаті горіння вихідні речовини на початок хімічного процесу визначаються як реагенти, а речовини, що утворилися результаті хімічної реакції, називаються продуктами реакції. Закон збереження маси є основою балансування хімічних рівнянь, стверджуючи, що сумарна маса кожного з елементів залишається незмінною у процесі хімічної трансформації. Нижче наведено приклад хімічного рівняння, що демонструє повне окислення октану (C_8H_{18}), який активно застосовується як вуглеводневе паливо, в умовах кисню атмосфери (1.5) [24]:



де C_8H_{18} - октан.

Це рівняння можна доповнити для виведення універсальної формули, як демонструється далі (1.6):



де a - кількість атомів вуглецю;

b - кількість атомів водню.

З аналізу представлених рівнянь ми можемо зробити висновок, що вуглекислий газ (CO_2), вода (H_2O), та азот (N_2) є основними продуктами теоретично досконалого стехіометричного горіння вуглецевмісного палива в атмосфері кисню та азоту. Тим не менш, у реальних умовах процес згоряння супроводжується утворенням додаткових продуктів через такі фактори, як розкладання молекул під впливом температури (дисоціація), домішок добавок у паливо, а також модифікація пропорції повітря до палива для підвищення ефективності двигуна. У разі застосування концепції октанового числа оптимальне співвідношення мас повітря до маси палива виражається через рівняння (1.7) [25]:

$$\frac{A}{F} = \frac{59.5 \cdot 28.96}{1.114} = 15.1 \quad (1.7)$$

де A - маса повітря; F - маса палива

1.5 Утворення забруднюючих речовин

Проблематика забруднення атмосфери в урбаністичних зонах залишається нагальною та важливою. Протягом минулих п'яти десятиліть, емісії від автомобільних двигунів внутрішнього згоряння привернули особливу увагу у контексті їхнього негативного впливу на якість повітря у міських агломераціях [26].

Емісії класифікують на три основні категорії:

- викиди автомобіля виникають з паливної апаратури авто, включаючи карбюратор, ємність, що акумулює, і трубопроводи, що транспортують. Ці емісії зумовлені леткістю бензину та денними коливаннями температур [27];
- емісії двигуна. Емісії двигуна охоплюють викиди до хімічних перетворень, що відбуваються всередині вихлопної системи [28];

– емісії, що походять з вихлопних систем автомобілів, є концентрацією забруднюючих речовин, що формуються після процесів каталітичного перетворення в каталізаторі. Ці концентрації, які часто називають лімітами викидів, підлягають строгому регулюванню. Утворення оксиду вуглецю (CO) безпосередньо пов'язане з балансом між кількістю споживаного повітря та палива, маючи більш виражене значення, на відміну від інших менш значущих змінних. Формування CO у вихлопі обумовлено перериванням хімічної реакції (1.8), що типово відбувається при температурі близько 1700 Кельвінів [29].



На рис. 1. 9 зображено, як співвідношення повітря до палива впливає на емісію чадного газу. Демонструється, що при надмірному паливі концентрація CO у десять разів перевищує рівні, виявлені при стехіометричному змішуванні.

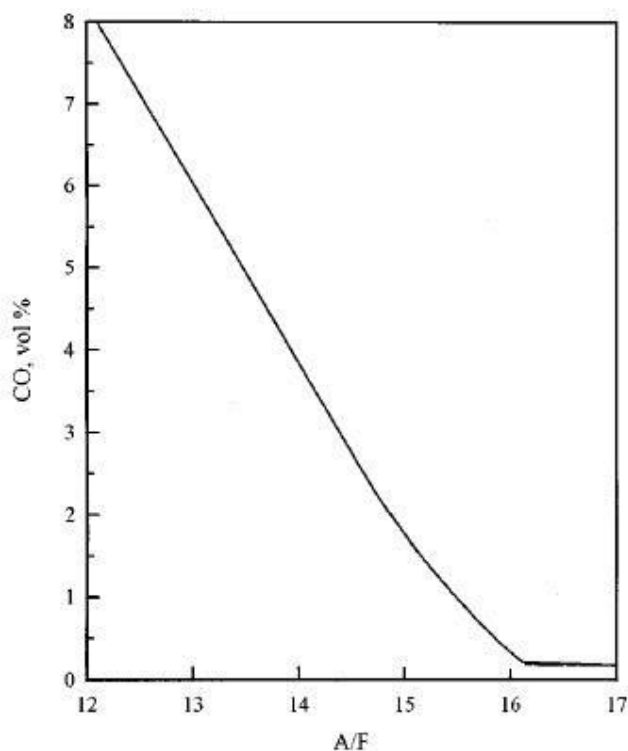


Рис. 1.9 - Діаграма викидів CO від двигуна SI залежно від співвідношення повітря/паливо [30]

1.5.1 Викиди NO_x

Процес перетворення кисню NO каталізується через реакцію Зельдовича (1.9, 1.10, 1.11).



Рівень емісії оксидів азоту (NO_x) тісно пов'язаний із температурними умовами процесу згоряння та наявністю кисню. Відзначається експоненційне зростання концентрації NO зі збільшенням температури, особливо це помітно при використанні сумішей з низьким вмістом палива щодо кисню (коефіцієнт надлишку повітря $\phi=0,9$), що підтверджує дослідження. Крім того, з рівняння Арреніуса слід, що швидкість формування NO прямо залежить від температурних параметрів та концентрації кисню у системі [31].

1.5.2 Емісії вуглеводнів (НС)

Вуглеводні означають, як частини палива, що залишилися незгорілими і не зазнали змін у ході горіння, так і сполуки, що виникають через різноманітні вуглеводневі процеси [32]. У дослідженнях точно виділено чотири ключові шляхи, через які відбувається емісія вуглеводнів (НС) [33]. На графічному зображенні, що на рис. 1.10 демонструється процес формування НС за допомогою ліній різної довжини.

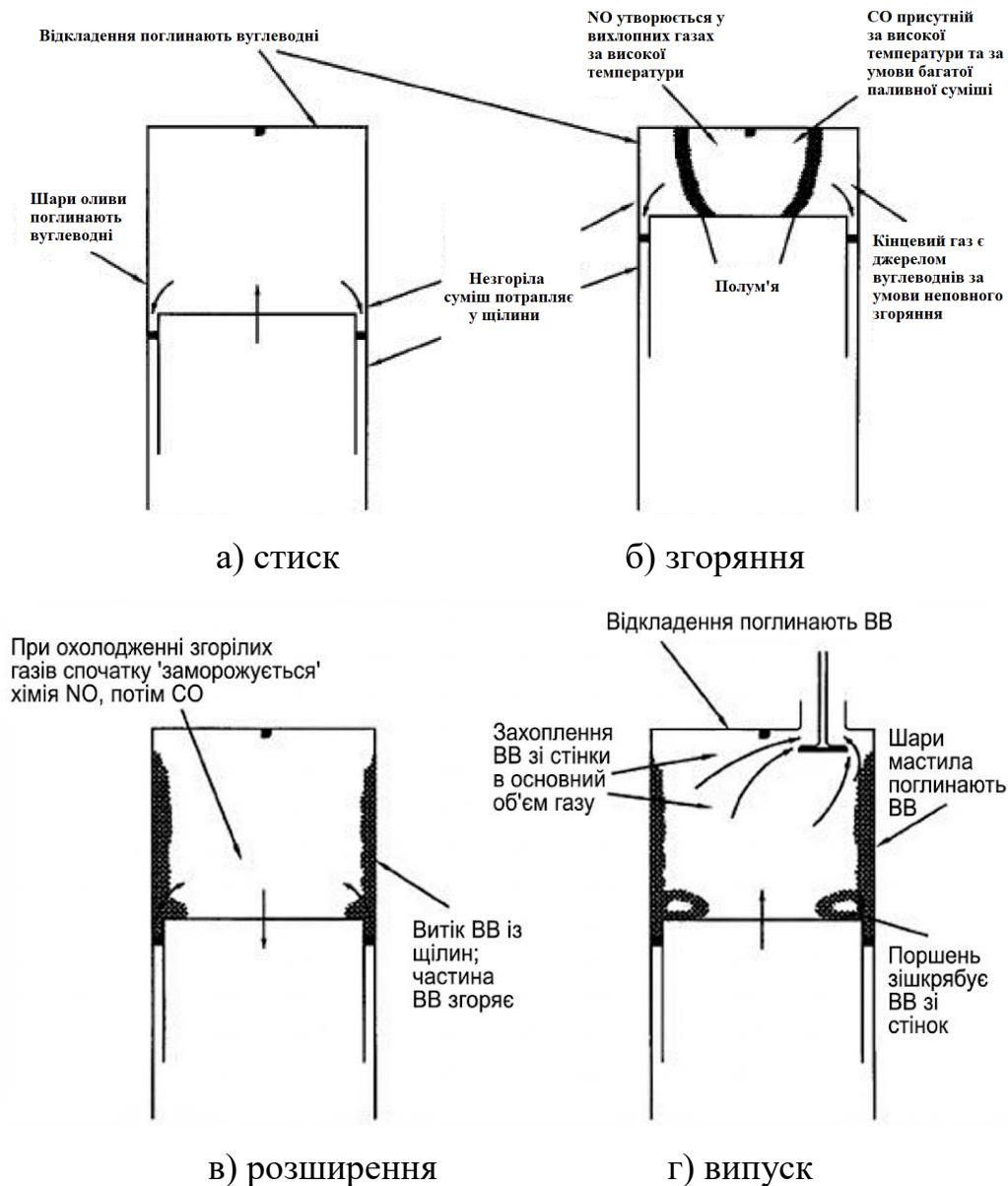


Рис. 1.10 - Формування вуглеводневих механізмів у двигуні внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням [33]

1.5.2.1 Гасіння полум'я

Гасіння полум'я тривалий час визнавалося ключовим джерелом емісії вуглеводнів. Це явище реалізується на поверхнях камери згоряння, де охолодні стінки функціонують як теплообмінник, знижуючи тим самим циліндричну температуру і впливаючи на процес окислення палива [34].

1.5.2.2 Поглинання парів палива масляними плівками всередині циліндра при процесах стиснення та впуску

Аналізи демонструють, що введення мастил у паливну суміш може викликати зростання емісії вуглеводнів удвічі чи втричі порівняно з роботою на чистому паливі. Передбачається, що це явище обумовлено абсорбцією паливних парів багат шаровими структурами моторного масла [35].

1.5.3 Тверді частки

Формування канцерогенних та мутагенних елементів сажі відбувається через термічний розрив довгих вуглеводневих ланцюгів в умовах оксигенового дефіциту. Викиди твердих частинок є поєднанням твердої фракції і аерозолі. На рис. 1.11 демонструється комплексний аналіз складових вихлопних газів, що випускаються дизельними агрегатами [36].

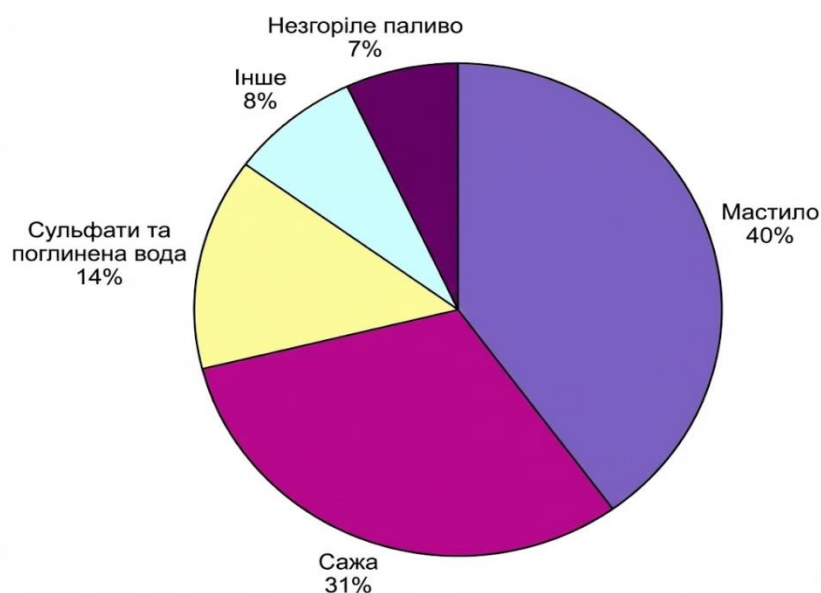


Рис. 1.11 - Склад твердих частинок дизельного двигуна

1.5.4 Діаграми ефективності двигуна

На рис. 1.12 представлена характеристична карта викидів оксидів азоту (NO_x). Зауважте, що в даній ситуації для вимірювання оксидів азоту (NO_x) використовують кілограми на годину. За допомогою цих карт можна вивчити патерни споживання палива та викидів у різноманітних режимах роботи [37].

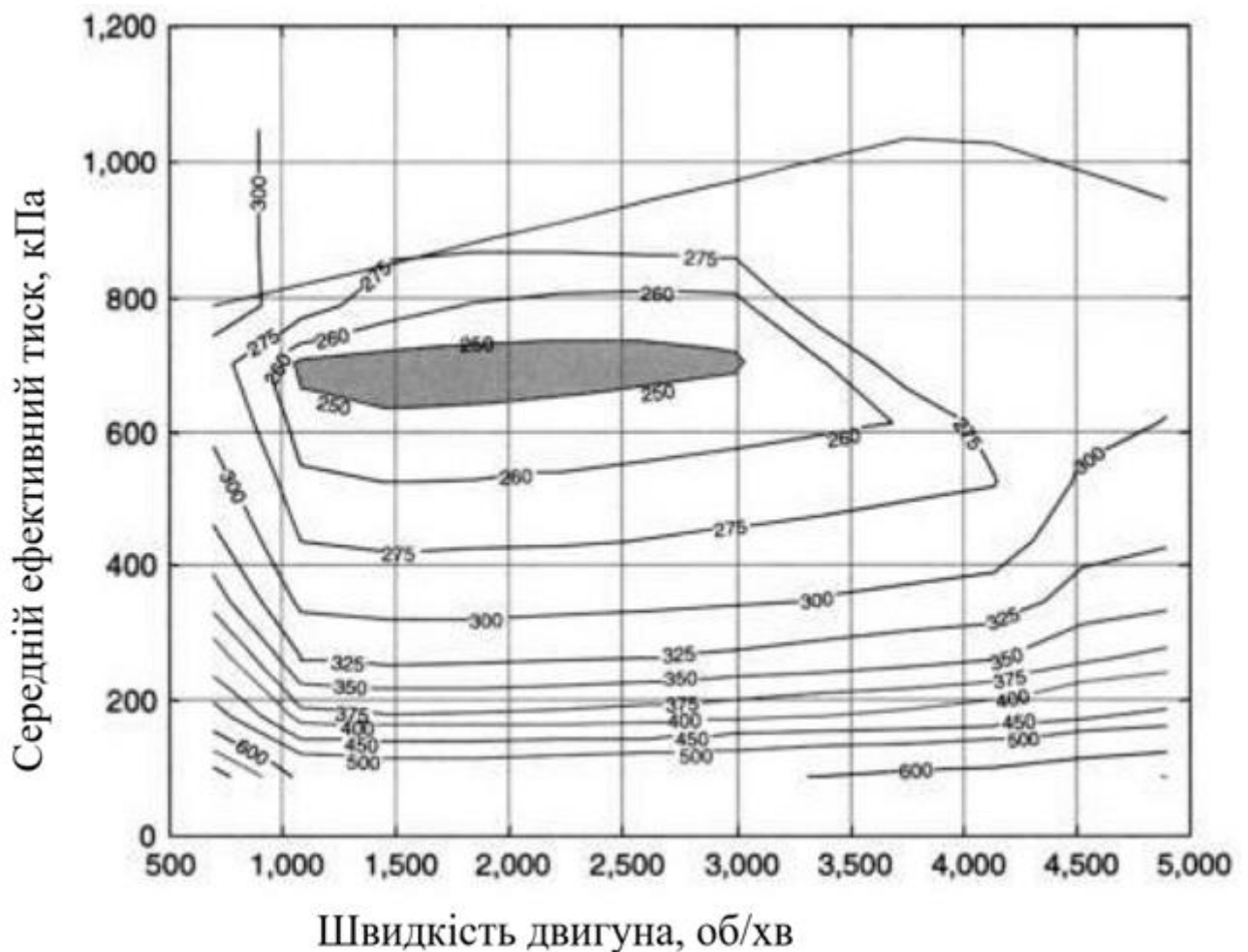


Рис. 1.12 - Типова карта характеристик двигуна з іскровим запалюванням [38]

Ретельне створення карти характеристик двигуна є процесом, який може вимагати значних фінансових і тимчасових витрат. У цьому контексті застосовуються випробування на динамометричному стенді. Характерною методикою є зміна одного із параметрів двигуна при фіксації іншого. Часто для цих цілей фіксують момент, що крутить, і покроково збільшують обороти двигуна від мінімальних до максимальних значень. Процес дозволяє зібрати серію даних для кожного заданого рівня моменту, що крутить. Однак, щоб детально характеризувати роботу двигуна, потрібно виконати велику кількість таких випробувальних циклів [39].

Оптимізація робочого об'єму, асоційованого з мапінгом двигуна, досяжна через використання динамометричного випробувального стенду [40], але це може спричинити суттєві енергетичні втрати в трансмісії в процесі тестування.

1.5.5 Вплив конструктивних та експлуатаційних факторів на обсяг емісії

Ефективність двигунів внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням обмежена різними факторами, починаючи від тертя та закінчуючи втратами на охолодження. Ефективність таких двигунів вимірюється через відношення величини стиснення паливно-повітряної суміші в циліндрах до її займання, що визначається як ступінь стиснення. При аналізі бензинових та дизельних двигунів виділяються ключові аспекти їх продуктивності. Для початку продуктивність адаптується за допомогою регулювання співвідношення повітря/паливо при різному навантаженні, що пов'язано зі значними втратами ефективності. Далі, здатність бензинового двигуна справлятися зі ступенем стиснення обмежується тенденцією палива до детонації. Щоб мінімізувати шкідливі викиди, співвідношення повітря до палива (A/F) підтримується близьким до ідеального стехіометричного значення. Проте підвищення цього співвідношення може сприяти збільшенню ефективності [41].

1.5.6 Бензинові двигуни

Після детального вивчення бензинових двигунів було складено перелік з розгорнутим описом ключових аспектів, що впливають на емісію [42]:

- іскра та момент запалення;
- обороти мотора та покладена потужність;
- співвідношення повітря/паливо;
- фаза газорозподілу;
- система рециркуляції відпрацьованих газів (EGR);
- охолодна рідина, або антифриз, відіграє ключову роль у підтримці оптимальної роботи двигуна автомобіля, запобігаючи його перегріву.

1.5.7 Момент запалювання

Момент формування іскри в камері згоряння є критичним для таймінгу запуску процесу згоряння. Передчасне займання призводить до надмірного передавального ефекту роботи від газів до поршня. Затриманий початок згоряння зменшує максимальний тиск в циліндрі, послаблюючи ефективність перетворення енергії газів, що розширюються [43].

Оптимальний кут випередження запалення для досягнення максимального моменту, що крутить (MBT) характеризується як точка запалення, при якій двигун виробляє найбільший крутний момент при стабільній швидкості. Ця настройка також збільшує гальмівну потужність та ефективно знижує витрати палива під час гальмування. Очевидно, MBT залежить від оборотів двигуна. Зі збільшенням швидкості необхідне раннє запалювання для збереження ідеальних умов згоряння. Крім того, випередження запалення змінюється в залежності від навантаження на двигун і тиску у впускному тракті, підвищуючись при зменшенні навантаження та падіння тиску, що допомагає підтримувати високі показники потужності [44].

У дослідженні ретельно вивчено вплив затримки займання на 80 градусів по відношенню до верхньої мертвої точки (BMT), а також ефект попереднього кута запалення на 30 градусів. Встановлено, що час спрацювання запалювання безпосередньо впливає на рівень тиску всередині циліндра, що, у свою чергу, визначає максимальні температури як згорілих, так і незгорілих газів. Затримка запалювання призводить до підвищення температури відпрацьованих газів, зменшення ефективності роботи двигуна та скорочення теплових втрат. Ці зміни можуть бути застосовані як спосіб керування рівнем емісії оксидів азоту (NO_x). Підвищення рівня окислення як усередині циліндра, і у впускному колекторі є прямим наслідком уповільнення процесу запалювання [45].

Виявлено [46], що відхилення моменту запалення до пізнішого часу призводить до зменшення емісії забруднюючих речовин через три секунди після включення двигуна. Процес прискорення моменту іскроутворення викликав раптове підвищення рівня емісій, за яким послідувало їхнє стабілізування. Крім того, спостерігається зниження виділення вуглеводнів у процесі затримки

запалювання, що не залежить від аеропаливного співвідношення. Пов'язано це з інтенсифікацією окислювальних процесів через підвищення температури.

1.5.8 Синхронізація клапанів

Налаштування ідеальних параметрів для дій клапанів у різних умовах роботи двигуна є завданням високої складності. Цей процес включає досягнення різноманітних, найчастіше конфліктуючих цілей, включаючи максимізацію крутного моменту і мінімізацію питомої витрати палива на одиницю потужності при гальмуванні (BSFC), а також забезпечення стабільного холостого ходу та ефективного контролю над рівнем викидів. У двигунах, оснащених механізмом зміни фаз газорозподілу, фазування розподільного валу адаптується до змін оборотів двигуна і навантаження, викликані положенням дросельної заслінки [47].

При зниженні частоти обертання двигуна відбувається затримка моменту відкриття клапана впуску. Це сприяє підвищенню якості роботи двигуна на неодружених оборотах, роблячи його більш рівним. У системах із двома впускними клапанами можливо деактивувати один з них, що покращує стабільність процесу згоряння та прискорює його. На помірних оборотах відкриття впускного клапана відбувається помітно раніше, що сприяє підвищенню моменту, що крутить. Також раннє відкриття клапана сприяє рециркуляції вихлопних газів за рахунок продовження періоду їх перекриття, що допомагає зменшити споживання палива і знизити емісію оксидів азоту [48].

Рис. 1.13 та 1.14 демонструють, як різні етапи циклу газорозподілу впливають на емісії BSFC та NO при встановленій швидкості.

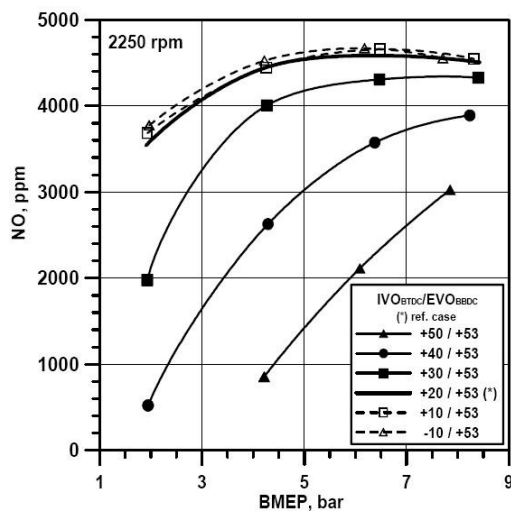


Рис. 1.13 - Часткове навантаження NO Викиди при постійній швидкості [49]

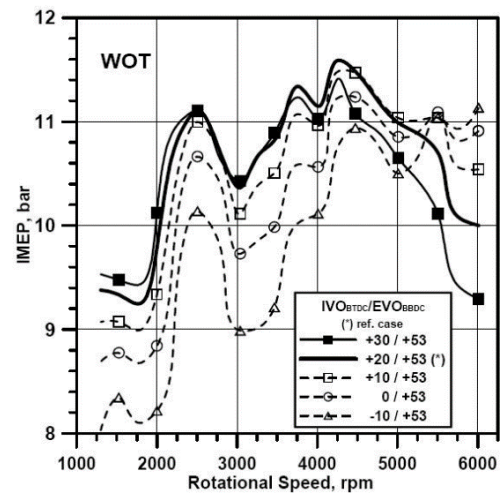


Рис. 1.14 - Вплив фазування впускного кулачка на середній ефективний тиск на впуску (IMEP) [50]

На основі даних, що представлені на рис. 1.13, очевидно, що коригування часу відкриття впускних клапанів (IVO) істотно впливає на рівень викидів оксидів азоту (NO). Аналізуючи та зіставляючи прискорене відкриття IVO на 10° та його уповільнення на 50° виходячи з даних, викладених на рис. 1.14 стає очевидним, що викиди NO значно зростають, збільшуючись приблизно в 5 разів при прискоренні відкриття IVO. Це підвищення пов'язане із затримкою у відкритті IVO, що веде до накладання періодів відкриття впускного та випускного клапанів, активуючи цим процес рециркуляції вихлопних газів (EGR). Рециркуляція вихлопних газів ефективно знижує пікові температури у циліндрах, що, у свою чергу, веде до зменшення утворення оксидів азоту. Було також виявлено, що при оптимізації часу відкриття впускного клапана і роботі двигуна при середніх навантаженнях досягається зниження викидів вуглеводнів завдяки більш ефективному спалюванню вихлопних газів, що залишилися в циліндрі [51].

1.6 Законодавство про викиди та випробування

20 березня 1970 року стало знаковою датою для екологічної політики Європи, коли вперше було запроваджено норми, що регулюють викиди забруднюючих речовин автомобілями, на основі директиви 70/220/ЕЕС. Цей

документ включав детальні стандарти, методики випробувань і межі викидів, спрямовані на боротьбу зі збільшенням забруднення атмосфери від автотранспорту [52].

У аналогічний період Сполучені Штати Америки також прийняли схожі регуляторні акти. У перших нормативних документах вміст забруднюючих речовин було зазначено у відсотковому співвідношенні чи частинах на мільйон (ppm) [53]. На етапі рівень концентрацій вимірюють як:

- автомобілі легкового класу: викиди CO_2 на кілометр $[\text{г/км}]$ або милю $[\text{г/миля}]$;
- комерційні автомобілі: викиди чадного газу на потужність, що генерується $[\text{г/кВт}\cdot\text{год}]$ або $[\text{г/к.с.}\cdot\text{год.}]$.

Пасажирські транспортні засоби піддаються тестуванню на динамометричному стенді, тоді як для вантажних автомобілів тестування викидів здійснюється з використанням спеціально встановленого на випробувальний стенд двигуна. Методи проведення таких випробувань можуть змінюватись у різних державах.

1.6.1 Їздовий цикл

Водійський цикл є послідовністю даних про швидкість транспортного засобу в часі, що моделює звичайну поведінку водіїв на дорогах. Ці цикли широко застосовуються в дослідженнях впливу автомобільних викидів на навколишнє середовище, у розрахунках споживання палива та оцінках ефектів від автомобільного трафіку. Незважаючи на широке використання, в Ірландії ще не розроблений спеціалізований водійський цикл, що повною мірою відображає особливості місцевого руху. Для аналізу екологічного сліду ірландські вчені зверталися до Європейського водійського циклу (ECE) та до Нового європейського водійського циклу (NEDC), однак ці моделі можуть бути неточними, оскільки стилі водіння значно відрізняються між регіонами. Світовий досвід, включаючи дослідження, проведені в Китаї, підтверджує, що існують помітні відмінності між поведінкою водіїв у реальних умовах та представленими

у стандартних циклах, що зумовлено унікальними соціокультурними, економічними та географічними характеристиками кожної країни [54].

На максимальних швидкостях роботи двигуна функція затримки відкриття впускного клапана сприяє ефективному досягненню максимальної потужності.

На рис. 1.15 докладно демонструються аргументи, наведені у аналізі. Штрихові лінії на діаграмі символізують затриманий момент відкриття впускних клапанів (IVO), тоді як суцільні лінії позначають передчасне IVO, що відбувається до досягнення мертвої верхньої точки (BMT). З даних випливає, що відстрочений IVO сприяє збільшенню індикаторного моменту ефективного тиску (IMEP), особливо при високих обертах двигуна і максимально відкритому положенні дросельної заслінки [55].

1.6.2 Міський цикл та позаміський цикл

Для проведення випробувань двигун встановлюється на динамометричне шасі, обладнане технологією емуляції різних умов експлуатації, включаючи навантаження та інерцію. Це дозволяє імітувати реальні умови роботи двигуна. Для забезпечення точності результатів тестування вживаються заходи щодо мінімізації вібрацій динамометра, що критично, щоб уникнути спотворення даних.

Загальна тривалість випробування становить 1180 секунд і поділяється на два етапи: перший етап включає повторення чотирьох урбаністичних циклів їзди, а другий етап симулює один заміський цикл їзди.

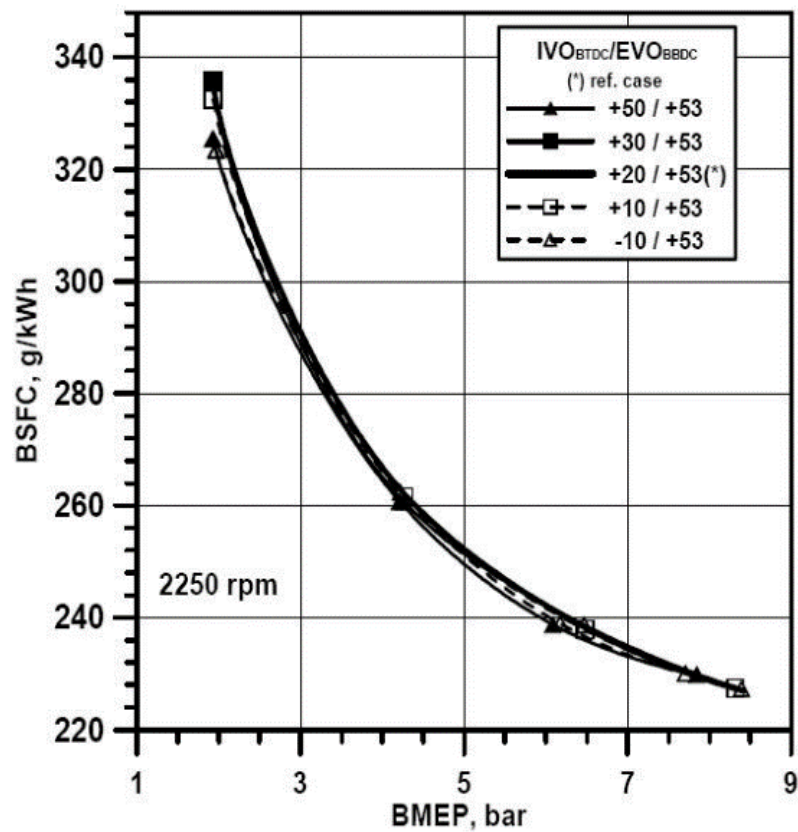


Рис. 1.15 - Питома витрата палива з частковим навантаженням при постійній швидкості [11]

У таблиці 1.1 вказується робочий цикл випробувань для імітації міського режиму їзди динамометричному стенді, де тривалість одного такого циклу досягає 195 секунд. Однак у таблиці 1.2 показаний робочий цикл на динамометричному стенді шасі заміського циклу їзди. Видно, що загальний час одного позаміського циклу становить 400 с [56].

Таблиця 1.1

Розбивка по фазах міського циклу їзди

Фаза	Час (с)	% від загального
На холостому ходу	60	30,5
Холостий хід, автомобіль у русі, зчеплення увімкнено	9	4,6
Перемикання передач	8	4,1
Прискорення	36	18,5
Стабільна швидкість	57	29,2
Уповільнення	25	12,8
Загальний	195	100

Таблиця 1.2

Розподіл по фазах циклу їзди за містом

Фаза	Час (с)	% від загального
На холостому ходу	20	5
Холостий хід, автомобіль у русі, зчеплення увімкнено	20	5
Перемикання передач	6	1,5
Прискорення	103	25,8
Стабільна швидкість	209	52,2
Уповільнення	42	10,5
Загальний	400	100

Цей протокол тестування автомобіля розроблено для імітації типового урбаністичного автопробігу, що відображає експлуатаційні умови на міських трасах. У процесі випробувань фіксується знижена швидкість руху, зменшене робоче навантаження на мотор та знижений рівень температури відпрацьованих газів. Оновлений Новий Європейський Цикл Водіння (NEDC) демонструє, як повноцінний міський, так і заміський маршрути згідно з рис. 1.16 [57].

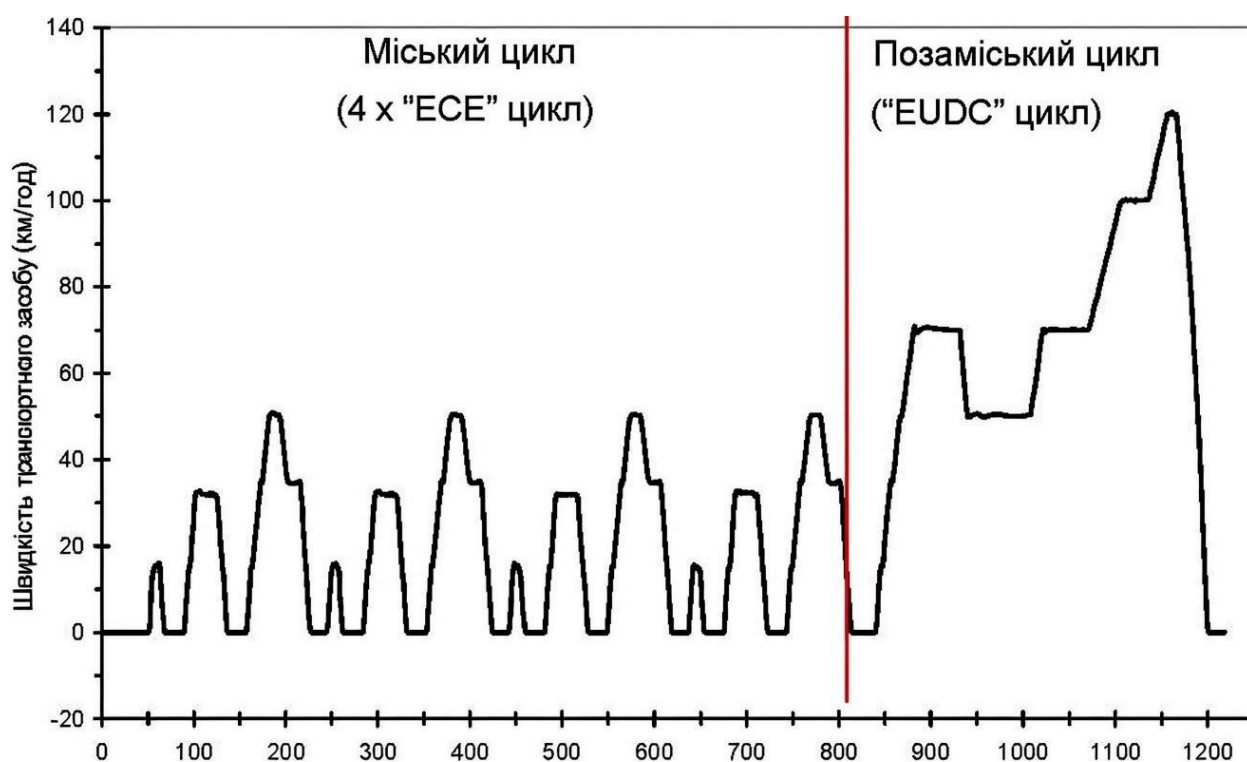


Рис. 1.16 - Реалізація їздового циклу NEDC

1. Аналіз середнього рівня викидів в атмосферу після запуску двигуна у холодному стані
2. Викиди CO на холостому ході
3. Викиди картерних газів
4. Експеримент з аналізу випарних викидів
5. Тестування надійності систем очищення від забруднень
6. Вимірювання рівня середніх низьких температур навколишнього повітря та аналіз емісії вуглеводню в атмосферу після запуску двигуна на холодну.
7. Тест OBD

Бензинові двигуни піддаються комплексу перевірок, на відміну дизельних агрегатів, які проходять лише тести 1, 5 і 7 за відповідних умов [58].

1.6.3 Емісійні ліміти. Легкові автомобілі та малотоннажний транспорт (до 2500 кг)

Транспортні засоби на автомобільному паливі значно погіршують атмосферне повітря через емісію шкідливих вихлопів. Це суттєво впливає на екологічний добробут, веде до погіршення стану навколишнього середовища та сприяє розвитку захворювань серцево-судинної системи та респіраторних проблем. Для мінімізації негативного впливу транспорту на якість повітря актуальним є впровадження та дотримання суворих нормативів викидів для нових машин [59]. 1993 року Європейський Союз вперше прийняв нормативи щодо рівня вихлопних газів для автомобілів та легких вантажівок, відомі як норми «Євро». Дані регулювання були розроблені з метою мінімізації викидів від автотранспорту та підтримання чистоти атмосферного повітря. З моменту їх першого впровадження, сфера застосування стандартів Євро розширювалася за допомогою введення нових, суворіших версій. У січні 2005 року обов'язково було реалізовано стандарт Євро-4 на території всього Європейського континенту. На сьогоднішній день норматив Євро-5 було офіційно прийнято у 2009 році, Євро-6 – 2014 рік, а запровадження нормативу Євро-7 заплановано на 2026 рік(табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Вміст токсичних речовин у вихлопі легкових авто, г\км

Стандарт	Дата	CO	THC	NMHC	NO _x	HC+NO _x	PM
Дизельні двигуни							
Євро-1	Липень 1992	2,72 (3,16)	-	-	-	0,97(1,13)	0,14 (0,18)
Євро-2	Січень 1996	1,0	-	-	-	0,7	0,08
Євро-3	Січень 2000	0,64	-	-	0,50	0,56	0,05
Євро-4	Січень 2005	0,50	-	-	0,25	0,30	0,025
Євро-5	Вересень 2009	0,500	-	-	0,180	0,230	0,005
Євро-6	Вересень 2014	0,500	-	-	0,080	0,170	0,005
Бензинові двигуни							
Євро-1	Липень 1992	2,72 (3,16)	-	-	-	0,97 (1,13)	-
Євро-2	Січень 1996	2,2	-	-	-	0,5	-
Євро-3	Січень 2000	1,3	0,20	-	0,15	-	-
Євро-4	Січень 2005	1,0	0,10	-	0,08	-	-
Євро-5	Вересень 2009	1,00	0,100	0,068	0,060	-	0,005
Євро-6	Вересень 2014	1,00	0,100	0,068	0,060	-	0,005

Початковим завданням Єврокомісії було реалізувати стандарт Євро-5 до середини 2008 року. Однак цей процес був затриманий, щоб забезпечити автовиробникам необхідний період для випробувань та випуску адаптованих моделей.

Норми Євро-5 призначені для більш суворого контролю за емісією чадного газу, оксидів азоту, вуглеводнів та частинок сажі. Вони створені з метою усунення прогалин у регулюванні, які дозволяли позашляховикам та автомобілям з повним приводом обходити обмеження, встановлені стандартами Євро-4. Крім того, Євро-5 ставить своїм завданням суттєво знизити різницю в рівні забруднень, вироблених бензиновими та дизельними двигунами, особливо щодо оксидів азоту та твердих частинок [61].

Із запровадженням норм Євро-3 стало обов'язковим оснащення всіх автотранспортних засобів системою бортової діагностики (ОБД), яка лікує

моніторинг емісії забруднюючих речовин. За законом, оператор або власник автомобіля повинен бути сповіщений про кожне зниження ефективності системи зменшення викидів, здатне викликати перевищення встановлених лімітів забруднень [62].

Для ідентифікації баз даних США відмінності від європейських, використовується термін EOBD (European On-Board Diagnostics). Критерії визначаються з урахуванням випробувань New European Driving Cycle (NEDC).

Висновки до розділу.

Виконано аналіз науково-технічних джерел, у яких розглядаються склад і механізми утворення токсичних компонентів відпрацьованих газів автомобільних двигунів. Огляд літератури дозволив визначити основні чинники, що впливають на формування викидів у різних режимах роботи двигуна.

РОЗДІЛ 2. Методології оцінки емісій(викидів)

2.1. Методики підрахунку емісій(викидів) та інформаційні масиви

Можна класифікувати методики визначення показників викидів забруднюючих речовин та споживання палива на два види:

- модель середньої швидкості;
- модель миттєвих викидів.

2.1.1 Модель середньої швидкості

У оцінці емісій, що у результаті дорожнього руху, часто застосовується метод, заснований на аналізі середньої швидкості. Цей метод розглядає агреговану інформацію про емісії, пов'язані з різноманітними стилями водіння. Параметри, такі як середня швидкість, категорія, розмір та рік випуску автомобіля, вносяться до рівняння для обчислення функції емісії, яка залежить від швидкості пересування. Однак цей метод не враховує той факт, що різні варіанти водіння (тобто стилів і динаміки їзди) при однаковій середній швидкості можуть призводити до показників емісії і витрати палива. Таким чином, застосування цього підходу обмежується лише загальними регіональними та національними оцінками [63].

В рамках проекту MODEM, спрямованого на подолання обмежень, характерних для моделей, що базуються на вимірі середньої швидкості, було розроблено комплекс із 14 реалістичних профілів їзди, заснованих на детальному аналізі вуличного руху. Ці профілі були застосовані для збору даних про викиди від різноманітних автомобілів, які тестувалися на динамометричному стенді з імітацією шасі. В результаті дослідження були створені деталізовані діаграми, що демонструють залежність обсягів викидів забруднювачів на зразок оксидів азоту (NO_x), вуглецю (CO), вуглеводнів (HC), діоксиду вуглецю (CO_2) та споживання палива від змін швидкісного режиму протягом кожного з їзових циклів [64].

2.1.2 Модель миттєвих викидів

Використання моделей миттєвих викидів призначене подолання обмежень, властивих моделі середньої швидкості. Ця підхід дозволяє проводити безперервне заміряння рівнів викидів у процесі проведення тестувань на динамометричному устаткуванні, а також фіксувати отримані дані з певною періодичністю (найчастіше раз на секунду). Для кожного миттєвого поєднання вимірюваних швидкості та прискорення розраховується середнє значення викидів, що дозволяє потім сформувати функцію викидів як двовимірну таблицю швидкості та добутку на прискорення. Однак застосування цього методу, як і раніше, стикається з труднощами при аналізі перехідних викидів в умовах різких прискорень, оскільки його ефективність обмежується результатами, отриманими виключно під час випробувань на динамометричному стенді [65].

2.2 Аналіз та порівняння методик оцінки емісій автотранспорту

Нормативні випробування представлені на рис. 2.1, охоплюють проведення попередніх сертифікаційних процедур для транспортних засобів, вимагаючи від виробника підтвердження відповідності одиниць, що випускаються, встановленим нормам щодо емісії газів. Цей процес відомий, як випробування на схвалення типу здійснюється за допомогою спеціалізованого обладнання для вимірювання викидів, розміщеного на динамометричному стенді [66].

Альтернативний метод - експлуатаційна діагностика та обслуговування. Даний метод включає проведення тесту на холостому ході, що виконується без застосування зовнішнього навантаження до двигуна. Процедура включає використання газоаналізатора, датчик якого встановлюють у випускній системі для визначення рівня емісії забруднюючих речовин, що виділяються автомобілем [67].

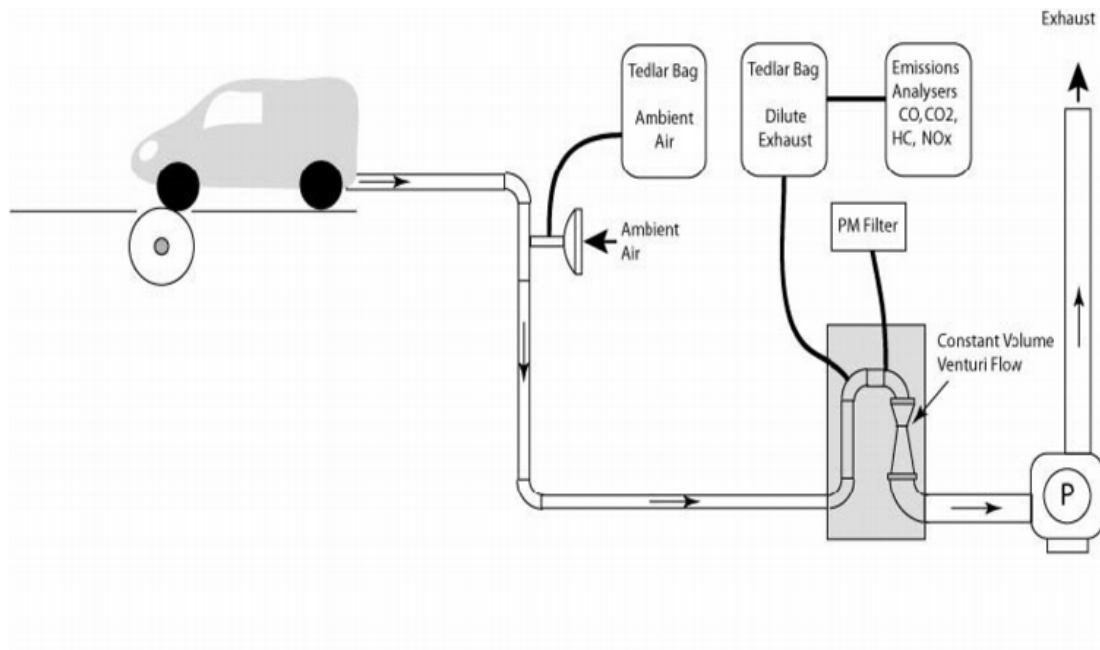


Рис. 2.1 - Устаткування для випробувань на викиди на динамометричному стенді [16]

У певних випадках, коли потрібно більш точне тестування двигуна, до нього можуть бути застосовані додаткові навантаження для достовірності результатів. Однак, це може спричинити збільшення витрат. Сучасні системи onboard diagnostics (OBD), вбудовані в автомобілі забезпечують ефективне виявлення несправностей компонентів транспортного засобу.

У контексті нагляду за викидами на транспортних артеріях виділяють дві категорії випробувань на викиди [68]:

1. Апаратура контролю атмосфери призначена визначення рівня забруднення повітря шляхом вимірювання концентрацій шкідливих викидів [68]. Для отримання зразків повітряного середовища і, у певних випадках, викидів твердих частинок або вуглецевмісних сполук, застосовується специфічний насос. Зібрані вибірки підлягають подальшому лабораторному аналізу [69]. Цей метод оцінки рекомендований переважно на дослідження колективного впливу автомобільного парку, на відміну аналізу викидів окремих одиниць транспорту [70]. Як приклад застосування пристрої встановлюються в тунелях для збору даних про концентрації CO, CO₂, NO_x і вуглеводнів (HC), що дозволяє оцінити загальний рівень забруднення від автотранспорту [71].

2. Застосування дистанційного зондування на автомобільних дорогах включає встановлення спеціалізованих пристроїв (рис. 2.2) поблизу дорожнього полотна для детектування рівня викидів від автомобілів, що проїжджають. Ці високотехнологічні вимірювальні інструменти, створені науковцями, сприяють глибокому вивченню та аналізу ступеня забруднення, вираженого через викиди чадного газу (CO), оксидів азоту (NO), вуглеводнів (HC) та твердих частинок (PM). Такий підхід до моніторингу навколишнього середовища на дорогах показав свою високу ефективність у різних географічних умовах, забезпечуючи точне визначення обсягу забруднюючих речовин, що випускаються автотранспортом, та сприяв покращенню екологічних показників, включаючи зниження витрат палива за рахунок оптимізації показників викидів. Однак, незважаючи на досягнення в даній галузі, методика поки не дозволяє отримати повну інформацію про режими роботи автомобіля в момент вимірювання, наприклад, перемикання передач або рівня обертів двигуна.

Ефективність стандартних вимірювальних технік обмежена. Важливо зробити динамічне тестування шасі [72]. У процесі оцінки шасі можна застосовувати одночасні методи, аналізуючи як спонтанні, і структурні варіації, і навіть проводити інтегративні виміри ваги, що є ключем до отримання сертифіката [73].

Застосування симульованих драйв-циклів у тестуванні шасі на динамометричних стендах часто не відтворює актуальних умов експлуатації [74]. Цей метод покриває лише частину можливих сценаріїв пересування [75].

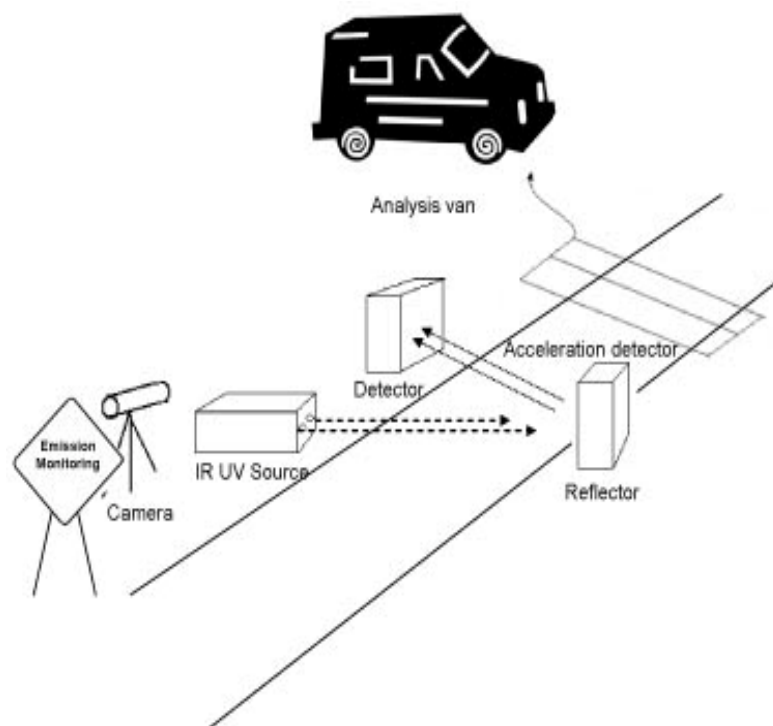


Рис. 2.2 - Обладнання для дистанційного виміру викидів транспортних засобів [73]

У зв'язку з цим фахівці провели великі наукові роботи з метою розробки автентичних моделей їздових циклів. Зіставлення цих циклів виявило варіативність у показниках викидів забруднюючих речовин. Застосування систем онбордового контролю викидів для зафіксування реального часу рівнів викидів значно спрощує процес збору інформації, що у свою чергу знижує витрати на проведення тестів та дозволяє більш точно аналізувати профілі руху та фактори викидів забруднюючих речовин.

Виявлено, що збіг фактичних та ймовірних емісій CO_2 і NO_x становить близько 5% [76], тоді як для вуглеводнів (НС) та оксиду вуглецю (СО) цей показник знаходиться в районі 10% [77]. Безліч наукових праць було присвячено використанню приладів для виміру викидів в атмосферу з метою визначення їх моментальних значень.

У попередніх обговореннях зазначалося, що аналіз викидів, проведений для конкретного транспортного засобу, потребує верифікації через застосування спеціалізованого вимірювального приладу, який монтується на об'єкті

дослідження [79]. Дослідження виявили, що однією з детермінант, які впливають на обсяг вихлопних газів, є манера керування транспортним засобом водієм [80]. Аналогічним чином, пробки зазнали аналізу як фактор, що безпосередньо впливає на інтенсивність викидів [81]. У таблиці 2.1 наведено зіставлення різних підходів до вимірювання рівня викидів від автотранспорту.

Таблиця 2.1

Аналіз та зіставлення підходів до оцінки емісій автомобілів

Тип виміру	Експлуатація автомобіля			Вимірювання викидів		Коментарі
	Відо мо	Відтвор ення водитьс я	Репрезент ативність	Одиниці виміру	Резолюція	
Тест випускної системи на холостому ходу	Так	Так	Погана	Концентрац ія	Пройдено/ Не пройдено	Повний цикл тестування виконано, але кількісні результати не збережено в архіві.
Бортова діагностика (OBD)	Так	Ні	Гарна	Щодо очікуваного	Пройдено/ Не пройдено	Зареєстровані кількісні дані
Навколишній	Ні	Ні	Гарна	Пропускна здатність каналу передачі даних	Низький	Складання середніх показників емісії для транспортної одиниці
Сателітне дистанційне зондування для вивчення транспортних мереж	Мож ливо	Ні	Гарна	Емісія на масу палива	Гарний	Інформація про конкретний транспортний засіб може бути документована, проте його оперативний статус залишається невизначеним.
Динамометр двигуна	Так	Так	Погана	Маса одиницю часу	Відмінний	Полегшені процеси тестування ефективності двигуна. Складнощі в імітації експлуатаційних умов.
Динамометр шасі	Так	Так	Помірна	Маса одиницю часу	Відмінний	Точні та великі аналізи, ефективне відтворення результатів, проте вартість випробувань висока.
Бортовий, використовува ний	Так	помірний	Гарна	Маса одиницю часу	Гарна	Ретельні та широкі представницькі виміри. Виникнення труднощів при реплікації умов експерименту.

2.3 Аналіз та зіставлення підходів до моделювання емісії автотранспорту

Для аналізу рівня викидів в атмосферу, пов'язаних із транспортом, розроблено різноманітні методи моделювання [81]. Складання національних реєстрів забруднюючих речовин на різних територіях (як, наприклад, на рівні країни або окремого штату) відіграє ключову роль у вимірі обсягів забруднень, управлінні якістю повітря і робить кроки до зменшення шкідливих викидів, які негативно впливають на здоров'я людей та стан екосистем.

Виконані наукові роботи зі створення техніки моделювання дозволили точно оцінити рівні викидів чадного газу (CO_2), оксиду вуглецю (CO), водню (HC), оксидів азоту (NO_x) та твердих частинок (PM) [80]. У ході даних досліджень були розглянуті додаткові аспекти, наприклад, викиди, що відбуваються внаслідок випаровування палива та виділення частинок зносу від гальмування [82]. У Європі та Північній Америці перевагу надають методологіям, заснованим на середній швидкості руху. Для цілей цієї дипломної роботи найбільше значення мають дані, отримані за допомогою COPERT (Комп'ютерна програма оцінки викидів транспортних засобів, з алгоритмом, викладеним на рис. 2.3).

Дослідницькі роботи, спрямовані на перевірку достовірності програми COPERT, а також на аналіз та зіставлення різних методик для оцінки викидів забруднюючих речовин, активно просуваються. Екстрьом та його колеги виявили відповідність у рівні викидів оксидів азоту (NO_x) між даними, отриманими за допомогою COPERT, та вимірюваннями, проведеними методом дорожнього зондування. Однак, щодо чадного газу (CO) та вуглеводнів (HC), результати, надані COPERT, показали завищення порівняно із вимірами.

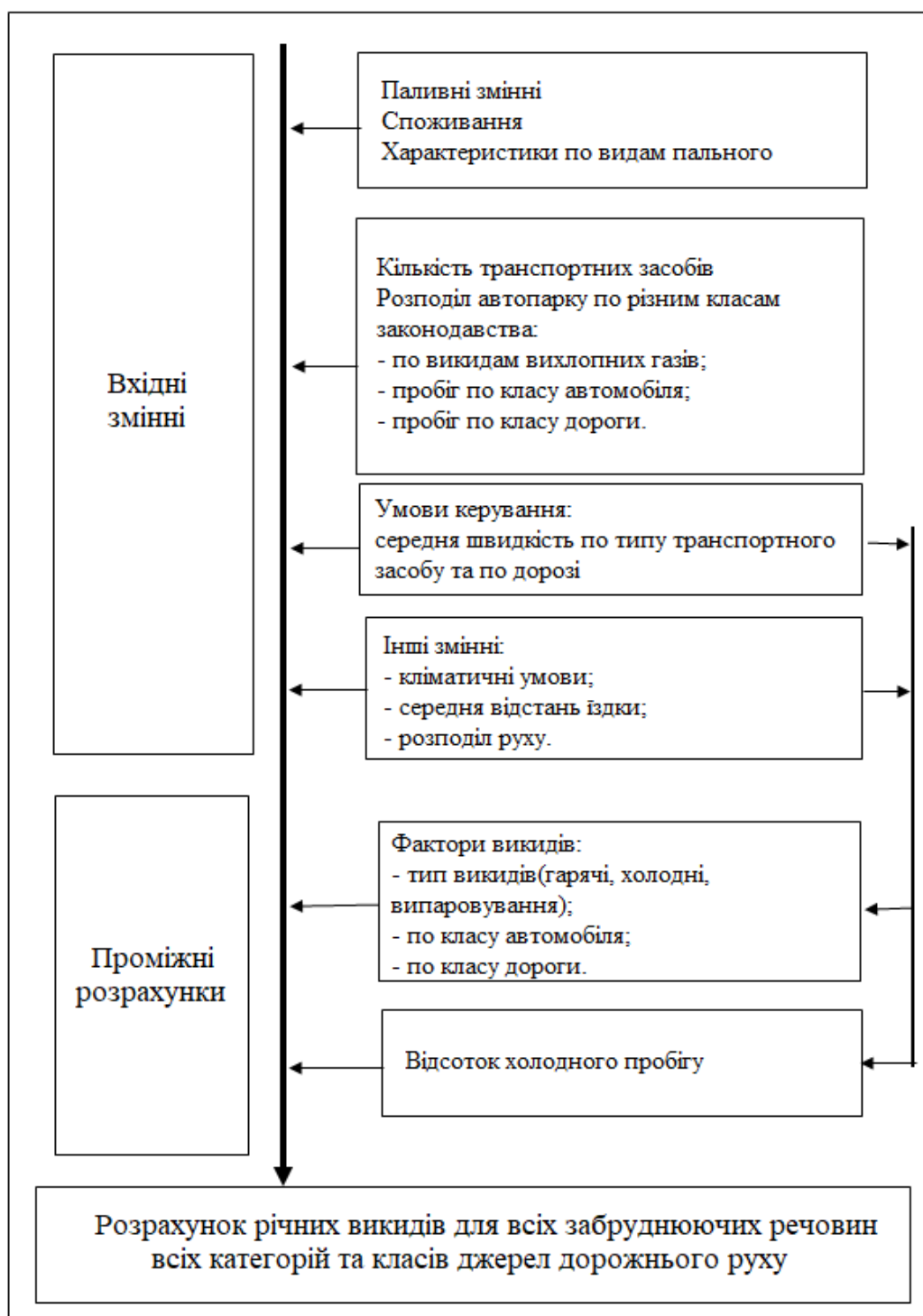


Рис. 2.3 - Базова методологія COPERT [71]

В контексті іншого дослідження, програма MOBILE6, орієнтована на оцінку забруднень, також зазнала порівняння з даними, отриманими безпосередньо з дорожніх датчиків, де були виявлені значні розбіжності. Сміт та його команда запропонували інноваційний метод моделювання дорожніх викидів через створення VERSIT+, який порівняно з COPERT продемонстрував підвищену

точність в оцінках викидів забруднюючих речовин.

Моделі середньої швидкості, що глобально застосовуються в транспортній галузі, стикаються з низкою проблем. Ці складності обумовлені інформацією про тестування транспортних засобів, особливостями експлуатації транспортного парку, викликами, пов'язаними із зміною швидкості, а також ідентифікацією локальних викидів забруднюючих речовин [83].

Тим не менш, спостерігаються значні кореляційні зв'язки між прогностичними даними, отриманими за допомогою програм моделювання, та реальними результатами, зафіксованими при безпосередніх вимірах.

Висновки до розділу.

Розглянуто чинні нормативні вимоги, щодо токсичності викидів автомобільного транспорту та основні методи їх оцінювання. Показано, що застосування їздових циклів є доцільним для оцінки емісій з урахуванням реальних умов експлуатації автомобіля.

РОЗДІЛ 3. Розробка програмної моделі для обробки експериментальних даних, щодо токсичності викидів

3.1 Модель реалізації LabVIEW

Так як вбудоване програмне забезпечення, що поставляється разом з пристроєм для зчитування даних з бази даних автомобіля, не передбачало функції збереження даних, виникла необхідність у розробці спеціалізованого програмного рішення для архівації цих відомостей у файлі зі зручним інтерфейсом користувача, сумісним з Microsoft Office Excel. Для цього було використано платформу LabVIEW версії Community Edition від компанії National Instruments, що пропонує широкі можливості для програмування та адаптації під різні завдання. Розроблена система збору даних про емісію була структурована на чотири окремих модулі в середовищі LabVIEW, що дозволило оптимізувати їхнє функціонування як окремо, так і в рамках взаємодії один з одним. Створені модулі включали: компонент для моніторингу миттєвих викидів, функціонал для аналізу завантаження при холодному старті автомобіля, інструмент для обробки та аналізу зібраних даних, а також модуль для здійснення послідовного обміну даними.

3.1.1 Функціонал реального часу для аналізу емісій

Щоб ефективно впровадити систему безперервної оцінки рівня викидів, необхідний був компонент, здатний аналізувати обороти двигуна та її навантаження як вихідні дані. Очікувалося, що на основі цих параметрів здійснюватиметься звернення до двовимірних таблиць викидів, представлених в електронному вигляді таблиці зі змінними, відокремленими один від одного комами (формат CSV), і завантаженням в оперативну пам'ять ПК.

Прийнято рішення застосувати ділянку програмного коду, яка була особливо розроблена експертом у середовищі LabVIEW. Ця ділянка програми виконувала завдання білінійної інтерполяції, обробляючи дві змінні для здійснення пошуку значень у двовимірній структурі даних, аналогічній картам

емісій. Щоб адаптувати фрагмент коду до заданих вимог, знадобилося створення додаткового модуля. Цей модуль повинен був забезпечити безпосереднє зіставлення індексів у масиві з вхідними даними. Досягти цієї мети вдалося через елементарне дослідження Excel. У документації, на рис. 3.1 представлено як обчислювалася функція для індексації на основі частоти обертання двигуна. Така сама процедура застосовувалася й у обчислення функції індексації, що з навантаженням двигуна.

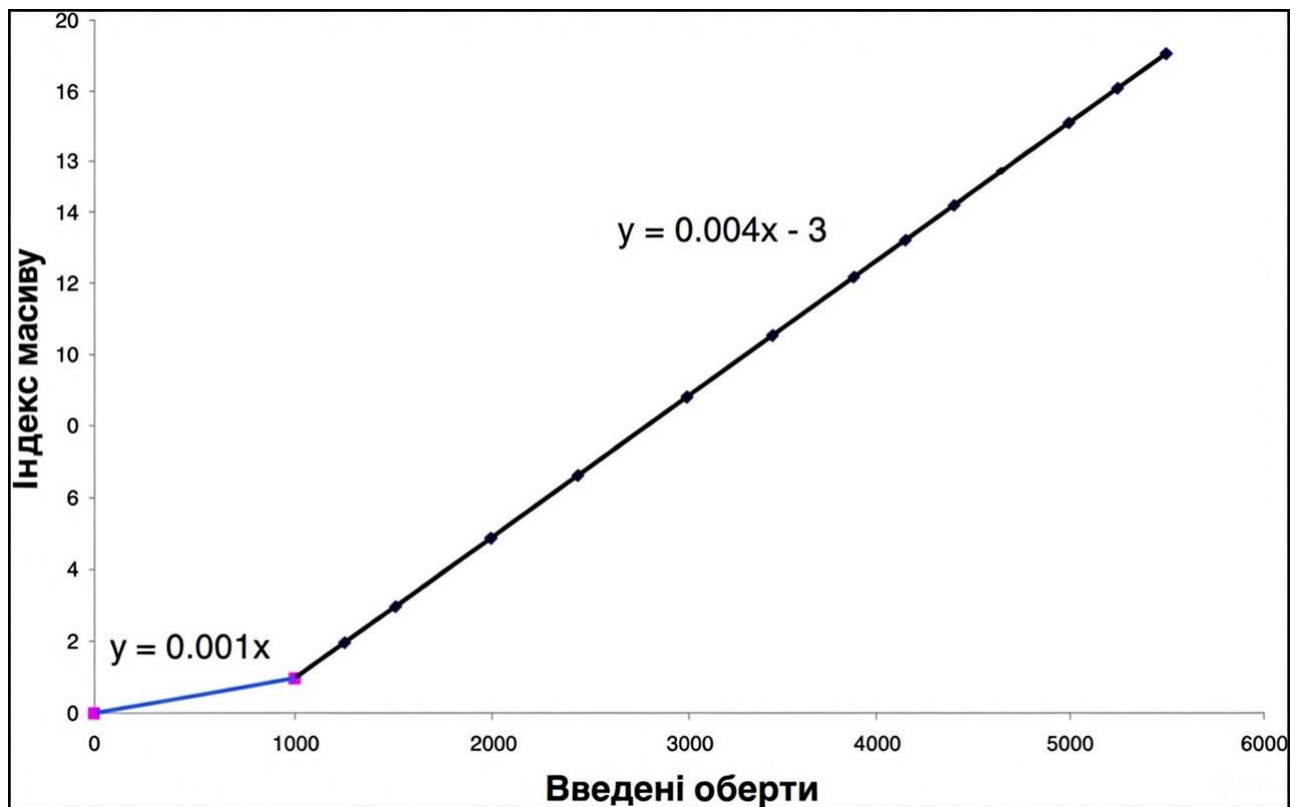
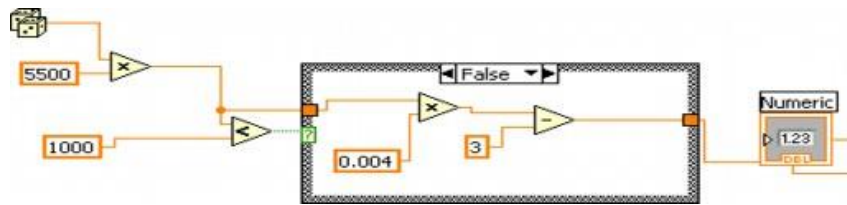
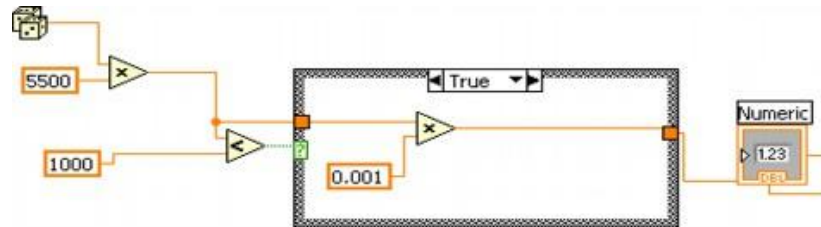


Рис. 3.1 - Рівняння масштабування індексації масиву даних

На графіку, зображеному на рис. 3.1 представлені формули, що демонструють методику масштабування вимірних значень частоти обертання двигуна перед використанням їх в операції білінійної інтерполяції. Візуальне уявлення алгоритму роботи модулів індексації у середовищі LabVIEW представлено у блок-схемі на рис. 3.2.



а)



б)

Рис. 3.2 - Ілюстрація показує, як виконується індексація даних масивів у LabVIEW, де: (а) застосовується для діапазону частот обертання від 1000 до 5500 об/хв; (б) використовується для обробки частот обертання до 1000 об/хв.

Застосування структур Case VI у LabVIEW дозволило коректно масштабувати заданий параметр відповідно до його значення.

Після підтвердження коректності функціонування білінійної інтерполяції за допомогою віртуальних інструментів (VI), вона була впроваджена в чотириразовому виконанні всередині конструкції циклу while для ефективного виявлення аномальних показників викидів і складання деталізованих карт споживання палива на основі миттєвих даних про викиди і витрат палива (рис. 3.3). Отримані миттєві дані про викиди та споживання палива далі транслювалися за допомогою зсувного регістру. Основне завдання зсувного регістру полягала в агрегації миттєвих даних на формування сумарної оцінки викидів, адаптованої до умов конкретної подорожі. У заключній фазі, для забезпечення візуалізації моделі викидів, був розроблений графічний інтерфейс, реалізований через набір керуючих елементів VI, що надаються середовищем розробки LabVIEW.

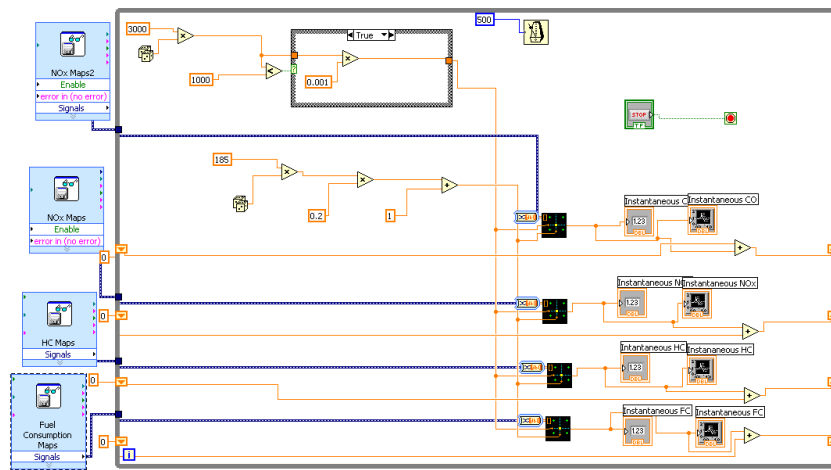


Рис. 3.3 - Схематичне зображення блоку аналізу викидів

Знімки екрана GUI та діаграма виконання алгоритму оцінки емісій представлені на рис. 3.4.

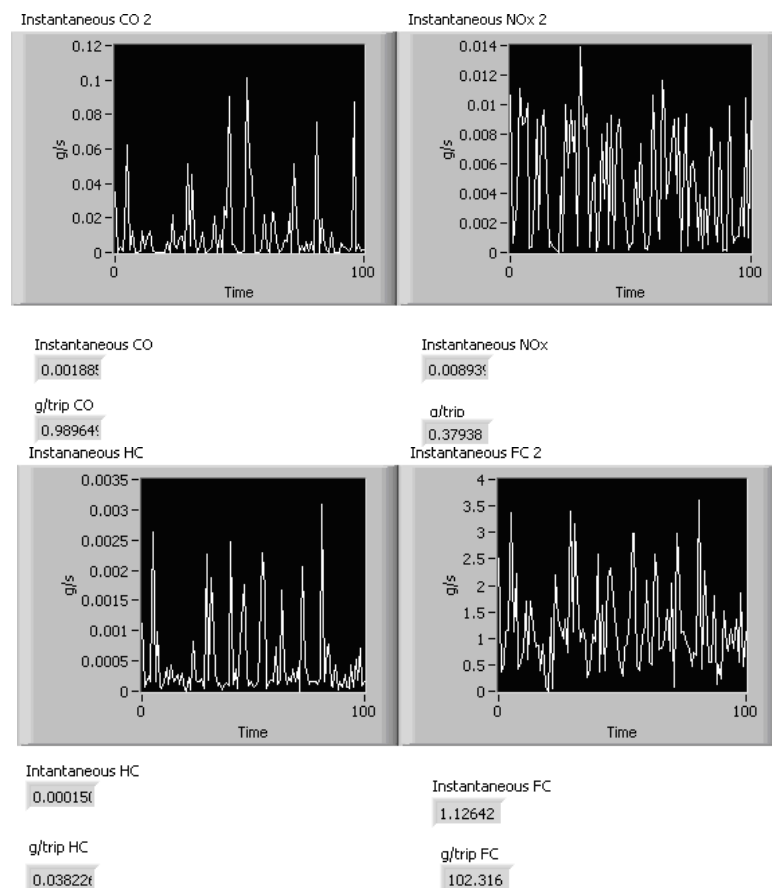


Рис. 3.4 - Візуальний інтерфейс користувача модуля аналізу викидів

3.1.2 Модуль для процедури холодного старту

Після того, як модель емісій холодного старту була успішно розроблена та інтегрована, виникла потреба у компоненті, що відображає рівень перевитрати палива та інтенсивність викидів в атмосферу під час холодного пуску двигуна. Для адекватної функціональності моделі необхідно встановити базову температуру. Відповідно до американського стандарту тестового їздового циклу FTP75, двигун вважається таким, що досяг робочої температури, коли температура його охолоджуючої рідини дорівнює 23°C. Саме цей показник був обраний в якості оптимальної еталонної температури для компонента, що розробляється, моніторингу умов холодного запуску.

Як і функціонал індексації масивів частот обертання двигуна, механізм холодного пуску було втілено через систему умов. Згідно з дизайном цієї системи, при високій температурі рідини, що охолоджує, специфічні дії не здійснювалися. У ситуації, коли значення температури виявлялося меншим за встановлений поріг, активувалася корекція величини з урахуванням заданих параметрів холодного пуску. Це призводило до збільшення обсягу виділених забруднюючих речовин під час холодного запуску, які згодом підсумовувалися поточним рівнем емісії, формуючи підсумковий показник забруднення протягом усього маршруту. Візуалізація алгоритму холодного запуску демонструється на рис. 3.5.

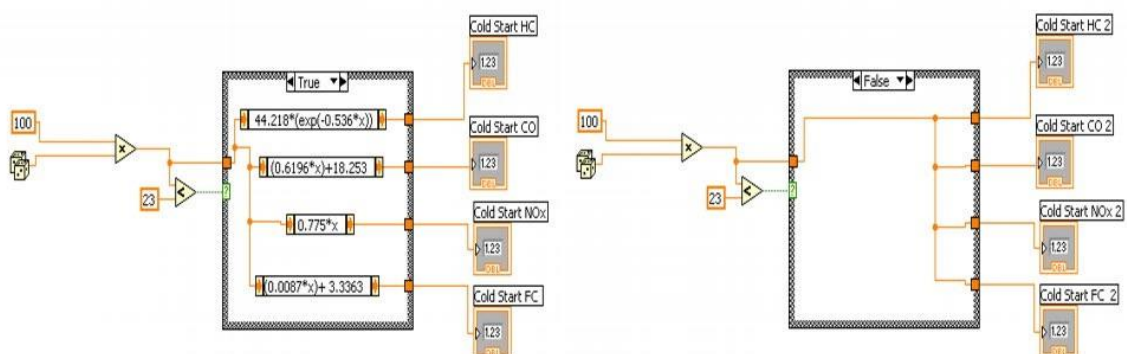


Рис. 3.5 - Схематичне виконання модуля для управління зайвими викидами під час холодного пуску

3.1.3 Дослідження та аналіз моментальної швидкості та прискорення транспортного засобу з метою визначення їздового профілю

Для моделювання ідеального циклу руху за допомогою спеціалізованого ПЗ був необхідний компонент, що здійснює детальний розбір динаміки швидкості та прискорення авто. Як головний параметр для нього виступала швидкість, що вимірюється через діагностичну систему в кілометрах на годину. Це число конвертувалося в метри за секунду шляхом розподілу на 3,6 для подальшого використання у розрахунках. Значення миттєвої швидкості піддавалися процесам диференціації та інтеграції для визначення швидкісних змін (м/с^2) та вимірювання загального пройденого шляху (в метрах). Аналітичні функції також включали оцінку пікових показників швидкості, прискорення і гальмування, що критично важливо для всебічного аналізу стилю управління. Візуальне уявлення алгоритму функціонування модуля швидкості демонструвалося на рис. 3.6.

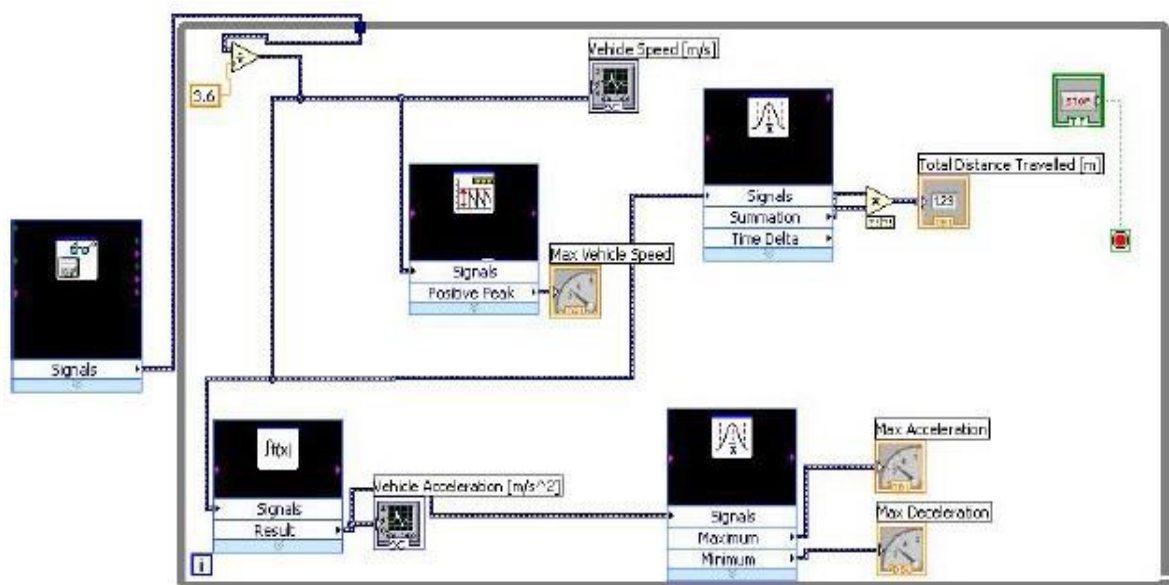


Рис. 3.6 - Схематичне виконання модуля для вимірювання швидкості

3.1.4 Модуль аналізу даних

Розробка модуля аналізу даних представила серйозні проблеми. Завданням модуля було перетворення шістнадцяткових кодів різних показників автомобіля на зрозумілі користувачеві одиниці виміру, такі як метри в секунду, оберти на

хвилину і т.д. На першому етапі модуль виконував аналіз OBD даних на відповідність до певних шаблонів (наприклад, код 41 0С вказував на запит даних про швидкість обертання двигуна). Для ідентифікації відповідності використовувався функціонал VI «шаблон відповідності», включений до програмного забезпечення LabVIEW. У разі знаходження відповідності VI або автоматично виводив на екран наступний бітовий токен в послідовності даних, або надавав дані, зміщені на значення, що задається розробником. Отримані результати відповідності VI потім перетворювалися на десятковий формат і адаптувалися під необхідні масштаби з відрахуванням коефіцієнтів, передбачених стандартами організації SAE [83].

Враховуючи, що зібрані дані представлені в послідовній формі, введення структур Case виявилось обов'язковим для забезпечення стабільності параметрів транспортних засобів, запобігаючи їх падінню до нульових значень у моменти тимчасового переривання аналітичних функцій (інтервали без отримання даних).

Розробка структур варіантів була здійснена з тим розрахунком, що позитивні значення передавалися безпосередньо в індикатор. У разі коли значення параметра досягало нуля, воно піддавалося обробці в циклі до знаходження значення, відмінного від нуля і перевищує спочатку задане значення. Блок-схема, що демонструє процес роботи модуля для синтаксичного аналізу даних, представлена на рис. 3.7.

3.2 Типи викидів та підходи до моделювання

Транспортні засоби виробляють три категорії викидів, включаючи один другорядний та два принципово важливі типи. Мінорним серед них виступають викиди, що виникають у процесі випаровування палива (EEVAP), які можуть формуватися в паливній системі автомобіля, включаючи бензобак, карбюраторну або інжекторну системи та паливопроводи.

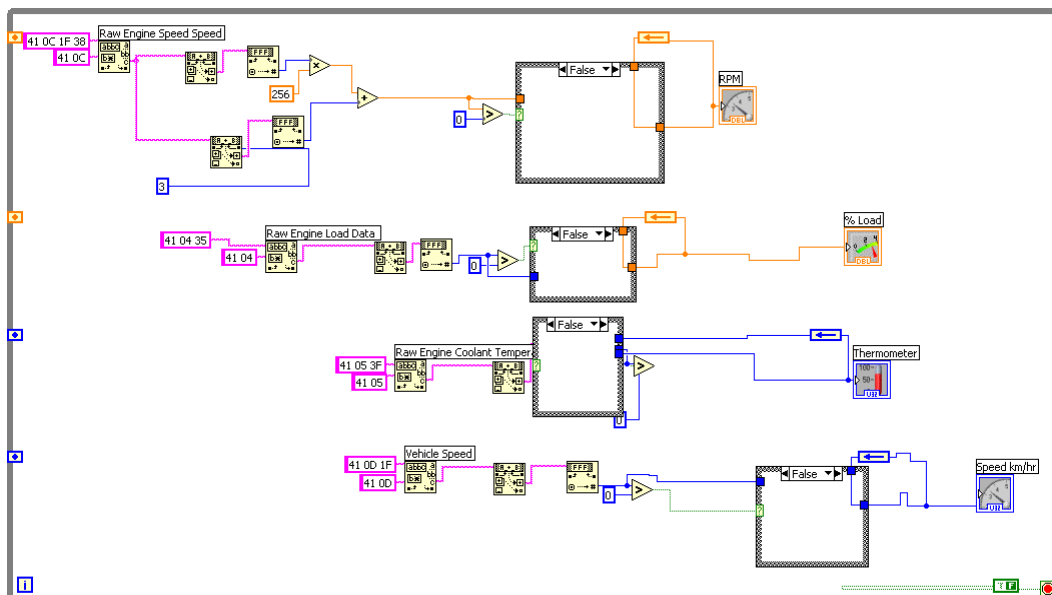


Рис. 3.7 - Схематичний опис процесу реалізації модуля для аналізу синтаксису

Ці викиди пов'язані з випаровуванням палива та добовими змінами температурних показників.

У дизельних двигунах викиди через випаровування відсутні, що з низьким тиском парів дизельного палива (1 мбар за нормальної температури навколишнього середовища). Проблематика випарних викидів (EEVAP) характерна лише для автомобілів на бензині. Додатково виділяють два значущі типи викидів: емісії при холодному запуску двигуна (ECOLD), що виникають у фазу його нестабільної теплової роботи, та викиди при перегріві двигуна (EHOT), характерні для періоду його стійкого гарячого функціонування.

В рамках проведеного дослідження застосовувався наступний числовий метод для аналізу зв'язку між передбачуваними емісіями та фактичними даними (3.1):

$$EF_{(i,m,n)} = \left(\frac{\alpha + \gamma \cdot \chi + \varepsilon \cdot \chi^2 + \zeta \cdot \chi^{-1}}{1 + \beta \cdot \chi + \delta \cdot \chi^2} \right) \cdot (1 - RF) \quad (3.1)$$

де $EF_{(i,m,n)}$ - передбачувана токсичність;

χ - коефіцієнт тепловиділення;

α - коефіцієнт надлишку повітря;

γ - коефіцієнт залишкових газів;
 ε - ступінь стиснення;
 ζ - коефіцієнт використання теплоти;
RF - витрата палива;
 β - коефіцієнт нестачі повітря.

Висновки до розділу.

Розроблено та описано структуру програмної моделі в середовищі LabVIEW для обробки експериментальних даних, щодо викидів забруднюючих речовин. Реалізовані функціональні модулі забезпечують реєстрацію, синхронізацію та підготовку даних для подальшого аналізу токсичності в різних режимах руху.

РОЗДІЛ 4. Аналіз висновків з експериментів та моделювання токсичних викидів у динаміці їздових випробувань

Параметри, такі як швидкісний режим, передача потужності та положення педалей газу, гальма та зчеплення, разом формують рішення водія. Тому це рішення виробляє результати, які використовуються для аналізу процесу руху транспортного засобу. У таблиці 4.1 демонструється, як різноманітні характеристики автомобіля впливають на викиди забруднюючих речовин та споживання палива (оксидів азоту).

Таблиця 4.1

Вплив факторів манери водіння на викиди та витрату палива

Схема водіння	Паливо	СО	НС	NO _x
Уповільнення	Немає ефекту	Немає ефекту	Немає ефекту	Немає ефекту
Швидке прискорення	Значний	Значний	Помірний	Значний
Стоп Фактор	Екстрім	Екстрім	Немає ефекту	Немає ефекту
Коефіцієнт коливання швидкості	Незначний	Незначний	Немає ефекту	Немає ефекту
Помірне прискорення	Незначний	Незначний	Немає ефекту	Немає ефекту
Екстремальне прискорення	Незначний	Незначний	Екстрім	Екстрім
Відстрочений перехід між другою та третьою передачами	Незначний	Незначний	Незначний	Помірний
Швидкість обертання двигуна перевищує 3500 обертів за хвилину.	Немає ефекту	Немає ефекту	Незначний	Незначний
Проблема зменшеної потужності двигуна	Немає ефекту	Немає ефекту	Немає ефекту	Немає ефекту

4.1 Аналіз результатів вимірів під час проведення експериментів

4.1.1 Тестування в режимі очікування

Протягом десяти хвилин двигун функціонував на рівних обертах. У цій діяльності відзначалося легке підвищення рівня викидів шкідливих речовин. Ці тимчасові стрибки в емісії були викликані різними аспектами, включаючи якість

палива, ефективність роботи каталітичного нейтралізатора, рівень техобслуговування двигуна, функціонування системи охолодження і так далі. Після завершення зазначеного тимчасового відрізка, оператору рекомендувалося збільшити обороти двигуна, підтримуючи в діапазоні від 1400 до 1600 оборотів за хвилину. На основі спостережень було встановлено, що зі зростанням оборотів двигуна відбувалося пропорційне збільшення викидів в атмосферу.

У динаміці викидів вуглекислих газів під час проведення десятихвилинного експериментального періоду було зафіксовано їхнє зростання. Аналіз даних показав, що з тривалістю експерименту концентрація вуглеводнів у викидах ескалювала. Крім того, була виявлена пряма залежність між зростанням рівня викидів вуглеводнів та підвищенням обертів двигуна.

Рівень емісії вуглеводнів чутливий до найменших коливань положення дросельної заслінки (лямбда), прямо пов'язаних з кількістю виділеного оксиду вуглецю при тому самому зміні лямбда. Концентрація монооксиду вуглецю варіюється у відповідь на коригування лямбду.

З підвищенням числа оборотів відбувається різке зростання обсягу чадного газу (CO), що виділяється, після чого він знижується, але залишається на рівні, що перевищує вихідні показники. Це демонструє, що при стабільно високій частоті обертів двигуна протягом значного часового проміжку загальна кількість викидів CO неухильно зростає. Зазвичай, при малій кількості оборотів, обсяг чадного газу, що генерується вище, ніж показники емісії вуглеводнів, як це представлено на рис. 4.1.

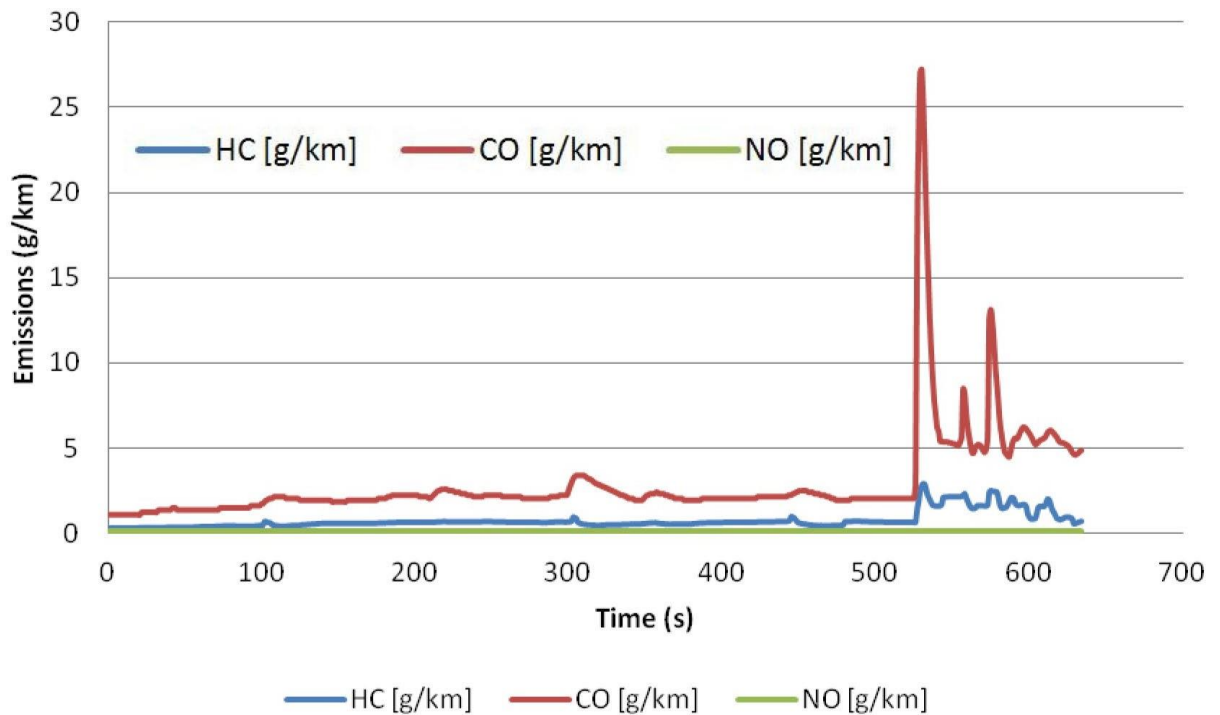


Рис. 4.1 - Аналіз порівняльних даних викидів під час випробувань на стоянці

У рис. 4.2 і 4.3 докладно демонструється структура викидів чадного газу та вуглеводнів, представляючи, як варіюються емісії відпрацьованих газів зі зростанням оборотів двигуна при проведенні тестування на холостому ході. Кожен графік візуалізує інтервали часу при стабільних та зростаючих оборотах, а також їх вплив на концентрацію забруднювачів в атмосфері: вуглеводні (НС), оксид вуглецю (СО) та оксиди азоту (NO_x). Порівняльний аналіз показників НС та СО виявив, що в період простою середній вміст СО досягав 2,92 г/км, тоді як рівень НС залишався значно нижчим - всього 0,73 г/км. Ця залежність особливо помітна на графіках, коли двигун функціонував із частотою обертання колінчастого валу 770 об/хв.

Обсяг згенерованих вуглеводнів досяг лише 0,96 г на кілометр, тоді як для чадного газу цей показник дорівнює 3,406 г/км. На додаток, показники вуглеводнів відрізняються більш вираженими та високими піками порівняно з вуглекислим газом, що, у свою чергу, обумовлено раніше згаданими характеристиками.

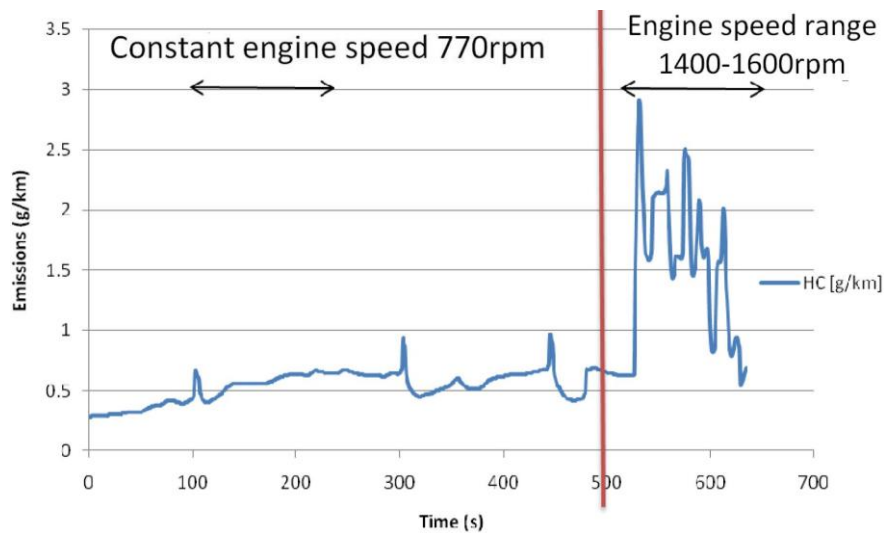


Рис. 4.2 - Викиди вуглецевмісних сполук у статичних умовах

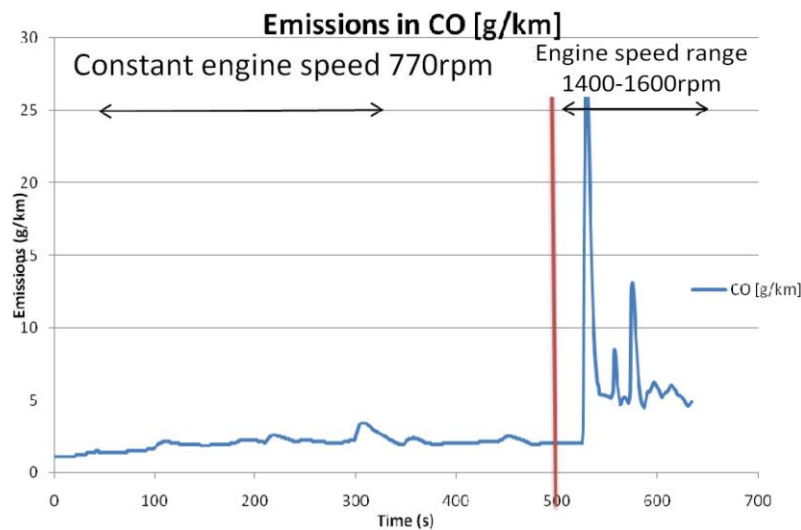


Рис. 4.3 - Викиди чадного газу у статичних умовах

Можна зробити висновок, що за підвищені рівні викидів оксиду вуглецю (CO) та вуглеводнів (HC) відповідає механічне пошкодження. Ключовий фактор підвищеного вмісту CO пов'язаний з надлишковим надходженням палива до двигуна, що перевищує його здатність до окислення. Паралельно зі зростанням рівнів CO відбувається збільшення концентрації HC, тоді як рівні діоксиду вуглецю (CO_2) та оксидів азоту (NO_x) знижуються. Рівні CO повинні залишатися незмінними при стабільній частоті обертання двигуна, як це показують результати проведеного аналізу. Якщо частота обертання двигуна збільшується, це може вказувати на наявність проблеми, такої як вакуумний витік або порушення

системи контролю подачі палива.

Механічно несправності є однією з основних причин підвищених рівнів емісії вуглеводнів. Добре відомо, що до процесу каталітичного очищення будь-який двигун генерує певну кількість вуглеводнів, зазвичай це коливається в межах 150-250 частин на мільйон. Суттєві фактори, що сприяють викидам вуглеводнів, включають неправильну подачу палива, механічні та електричні збої у роботі двигуна, а також несправності у системі каталітичного очищення. Зазначається, що за наявності постійних та високих рівнів викидів NO_x , особливо в режимі холостого ходу, можна стверджувати про відсутність механічних несправностей у системі, що підтверджується даними на рис. 4.4. Важливо також вказати на те, що обсяги викидів NO_x істотно нижчі порівняно з іншими видами емісії, що дозволяє зробити висновок про незначну роль NO_x у загальному обсязі викидів, вимірюваних під час статичних тестів, порівняно з викидами вуглеводнів (HC) та оксиду вуглецю (CO), що генеруються у тому ж випробуванні.

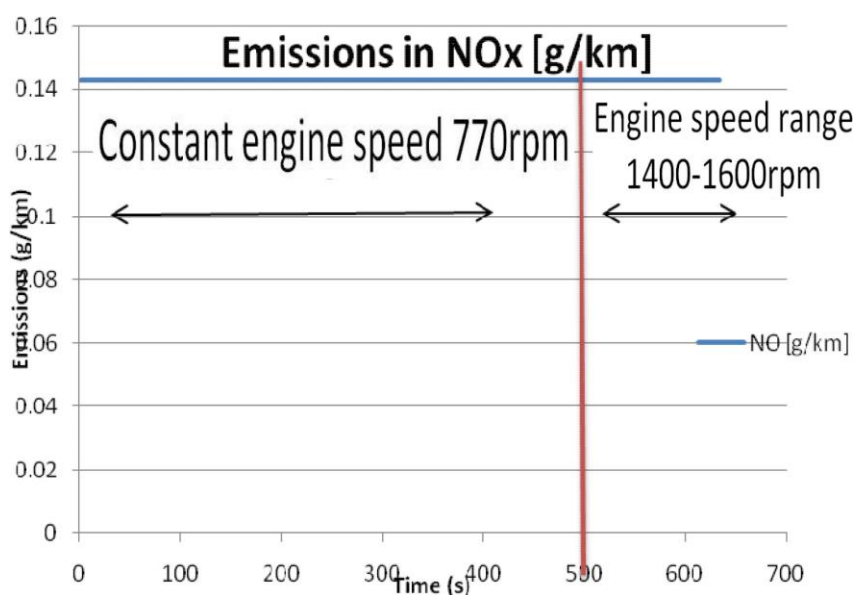


Рис. 4.4 - Викиди NO_x під час тестування на паркувальному місці

4.1.2 Короткий міський маршрут

В рамках дослідження, що аналізувало забруднюючі речовини, особлива увага приділялася концентраціям оксиду вуглецю (CO) та оксидів азоту (NO_x) на компактних міських маршрутах. Висновки наголосили на значущості

відмінностей у стилі водіння по градоутворюючих факторах, що впливають на частоту виникнення та обсяг транспортних викидів в умовах міста. Рис. 4.5 наочно демонструє диспропорцію між кількістю CO і NO_x, що виділяється, з явним переважанням першого. Несподіваним виявився обсяг чадного газу, що значно перевищує попередні очікування, при середніх показниках викидів NO_x в 0,22898 г/км і CO в 3,37 г/км за довжину шляху в 4,442 км. Підсумки дослідження показали, що порівняльний обсяг CO, що виділяється автомобілями на коротких міських дистанціях, майже в п'ятнадцять разів вище, ніж NO_x, з кумулятивним результатом 1,01715 г для оксидів азоту і 14,97135 г для оксиду вуглецю.

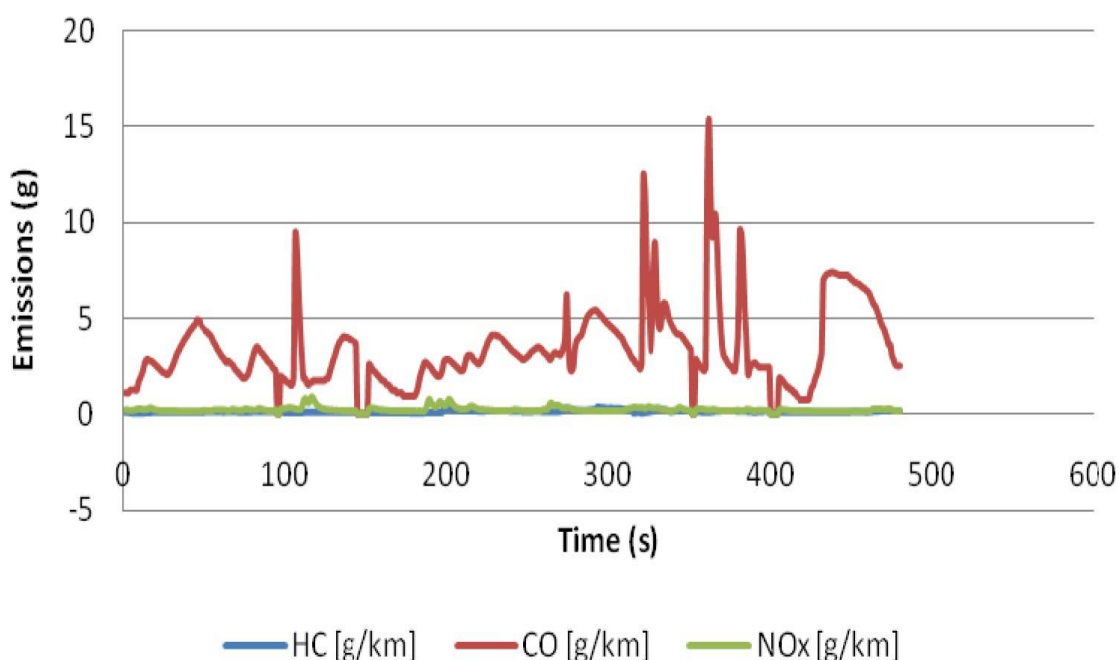


Рис. 4.5 - Реальні викиди під час короткого міського маршруту

Емісії, що генерувалися під час процесу гальмування, були мінімізовані. На етапі зупинки зафіксовано мінімальні значення емісій. Тим не менш, спостерігається значна відмінність у рівнях емісій за однакових умов експлуатації. Дані експериментів показують, що сталося дві зупинки: перша на 150 секунд, а друга - на 350-й. Після першої зупинки відбулося поступальне збільшення швидкості до четвертого ступеня трансмісії, при цьому кожен ступінь активувався не менше ніж на 20-30 секунд перед зміною. Цей режим дозволяє зробити висновок, що концентрація оксиду вуглецю (CO) зростає лінійно, тоді як

концентрація оксидів азоту (NO_x) збільшується стрибкоподібно на проміжних етапах. При високих передачах рівень CO значно вищий, ніж NO_x . У той самий час, під час роботи на низьких оборотах і знижених передачах, концентрація NO_x перевищує рівень CO. Рис. 4.6 демонструє взаємне співвідношення даних емісій, що виділяються за схожих умов.

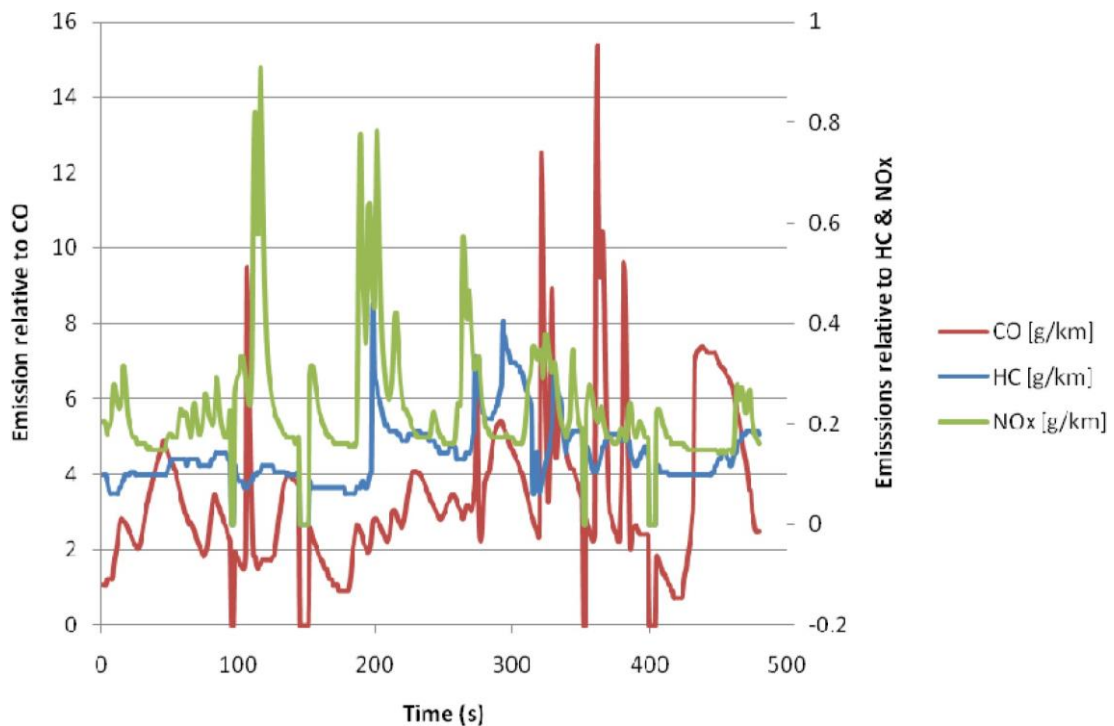


Рис. 4.6 - Порівняння рівнів викидів

З аналізу даних про викиди оксидів азоту (NO_x) і чадного газу (CO), зображених на діаграмах 4.7 і 4.8, очевидно, що методи керування автомобілем мають помітний вплив на рівень емісій. Зокрема, після зупинки на часовому інтервалі в 350 секунд спостерігається різке збільшення швидкості, що досягається через серію змін передач. При цьому, перехід від однієї передачі до іншої відбувався за стислі часові проміжки, що часом не перевищують 5 секунд.

На рис. 4.7 представлений аналіз впливу динаміки водіння на емісію забруднюючих речовин, що демонструється, що емісія оксидів азоту (NO_x) зростає під час прискорення транспортного засобу, досягаючи піку, проте з перемиканням на четверту швидкість, рівень викидів істотно знижується до мінімальних показників. На відміну від цього, чадний газ (CO) демонструє

зворотну тенденцію: при переході до вищих передач його концентрація у вихлопних газах помітно зростає.

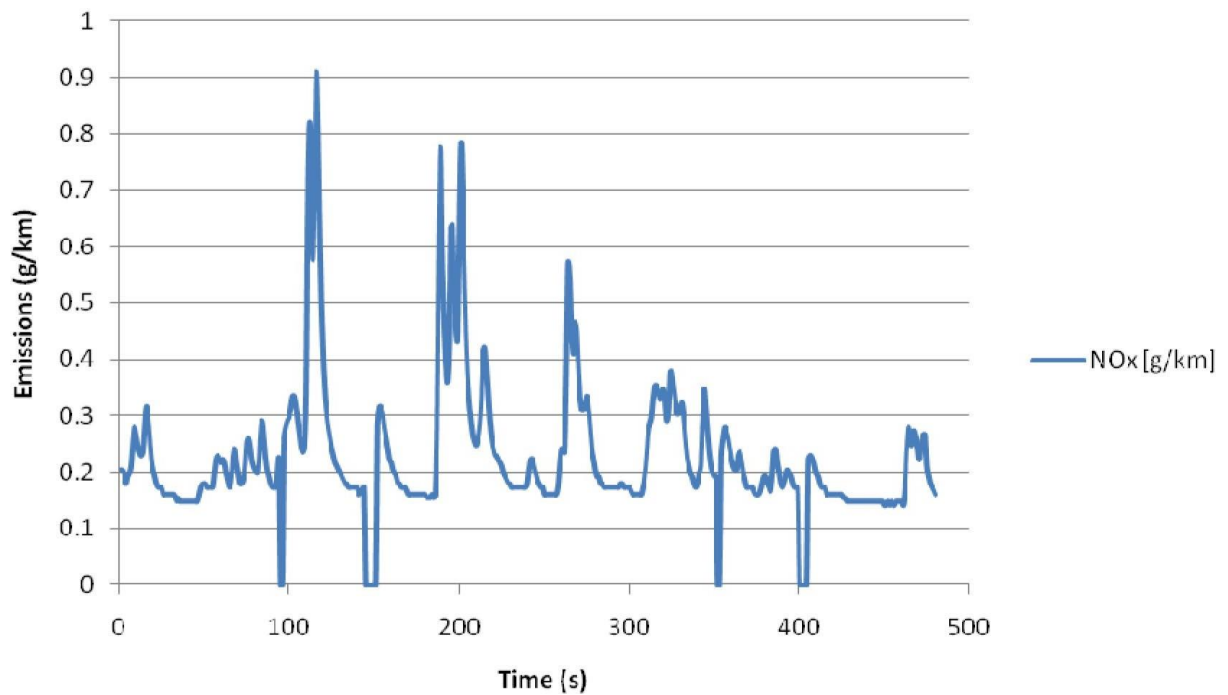


Рис. 4.7 - Розподіл викидів NO_x

У процесі керування транспортним засобом спостерігається стандартний порядок викидів протягом усіх фаз водіння. Відмінність між викидами полягає лише в їхньому загальному обсязі. Важливо відзначити, що існують незначні відхилення між двома викидами, що генеруються в той же часовий інтервал. Наприклад, через 400 секунд відбувається зміна: рівень одного виду викидів підвищується, а іншого зменшується. У цей час було виявлено, що зростання концентрації чадного газу (CO) супроводжується зниженням рівня оксидів азоту (NO_x).

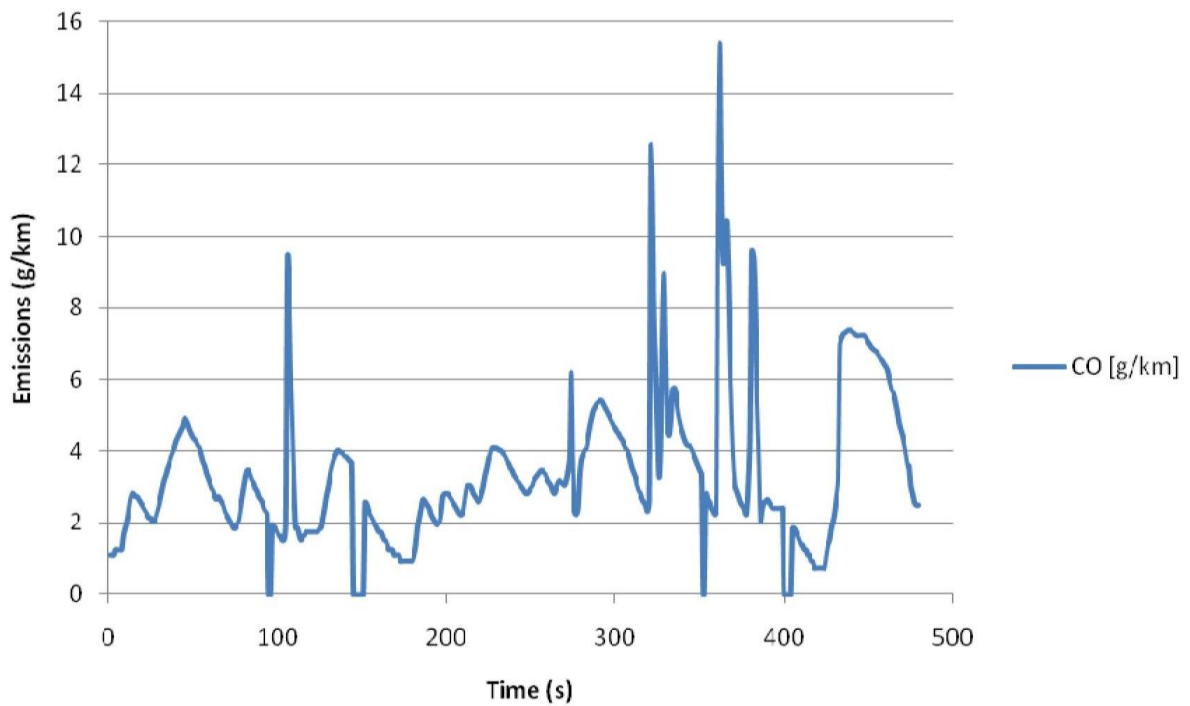


Рис. 4.8 - Розподіл викидів CO

Специфічні причини цього феномену до кінця не відомі, що викликає тривогу серед фахівців. Подібна динаміка може бути пов'язана з технічними помилками при керуванні, наприклад, з одночасним натисканням педалі зчеплення і газу. Такі дії можуть спровокувати підвищення оборотів двигуна, що, здавалося б, має призвести до сталості рівня NO_x та зростання CO. Проте реальність показує інше. Це наголошує на наявності незрозумілостей, щодо точних обсягів викидів, що вимагають подальшого детального дослідження.

З аналізу бачимо, що викиди показують очевидну закономірність. Під час зниження передачі (наприклад, перехід з 2-ї на 3-ю) та підвищення оборотів двигуна спостерігається зростання обсягу викидів. Аналогічно, при перемиканні на нижчу передачу та зменшення оборотів двигуна, обсяг викидів зменшується.

4.1.3 DCU-випробування на автомагістралі

Регуляції дорожнього трафіку часто варіюються між різними населеними пунктами, хоча є загальні елементи, типові кожного міста. Це наводить на думку необхідність систематизації умов дорожнього руху. Така систематизація може здійснюватися з урахуванням детального аналізу мікротрафіку, включаючи

розгляд середньої швидкості руху та відсотка зупинок у межах кожної окремої подорожі. Для наочності умови трафіку класифікуються на підставі часу, проведеного в пробках, та середньої швидкості руху, як демонструється у таблиці 5. Так, стан дорожнього руху ділиться на міські вулиці та шосейні траси:

Міські дорожні умови характеризуються транспортною інтенсивністю, де транспорт відчуває постійні затримки та зупинки. Це призводить до коливань середньої швидкості пересування від 10 до 35 кілометрів на годину, що відображає діапазон від низьких до помірних швидкостей пересування.

Автострада: безперервний трафік із мінімальною швидкістю понад 40 км/год.

Використовуючи дані граничні значення, можна показувати класифікацію станів дорожнього трафіку, як це відображено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Класифікація умов дорожнього руху

Класифікація	Середня швидкість (км/год)	Час простою (%)
Міський	10 - 35	<80
Автомагістраль	>40	<10

Випробування охоплювало чотири різновиди траєкторних випробувань, що проходили унікальними шляхами. На рис. 4.9 зображено траєкторії руху для кожного з маршрутів. Величина швидкості поділена на чотири дистинктивні інтервали, заснованих на класифікаціях, описаних у таблиці 4.1. Важливо підкреслити, що перший та другий цикли не відповідають стандартним класифікаціям міського руху.

У зазначених зонах характеризуються збільшеними швидкостями пересування та незначною кількістю зупинок, однак їх не коректно відносити до категорії автострад, хоча вони можуть служити як доповнення до автострад або їх продовження. Ці дорожні напрямки оптимально підходять для міжміських перевезень завдяки підвищеним швидкісним режимам у порівнянні з тими, що характерні для міської інфраструктури.

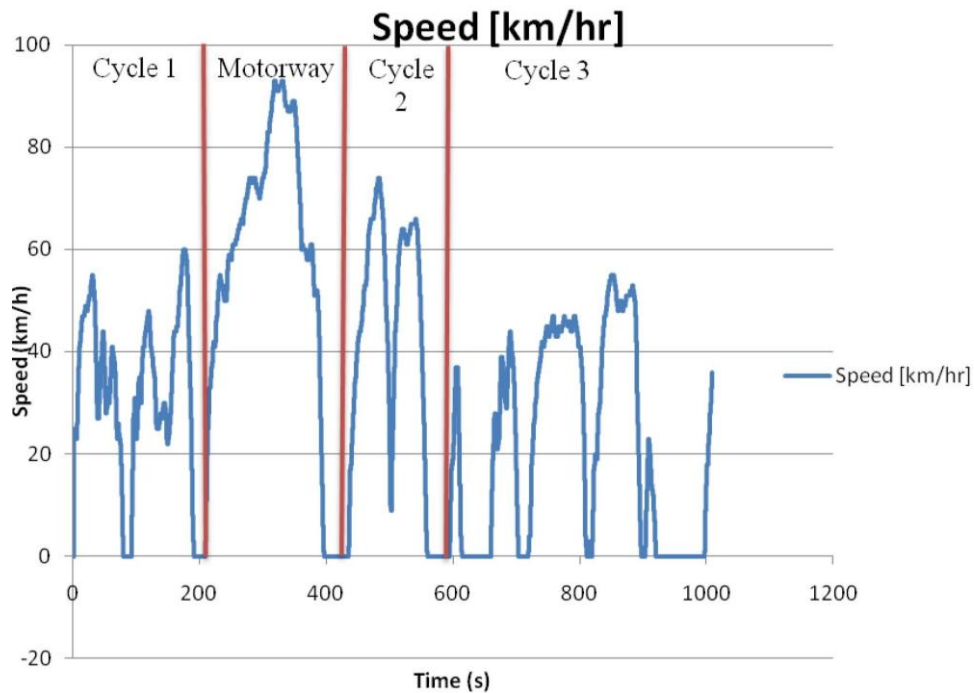


Рис. 4.9 - Зміна швидкості під час стандартизованого випробування на різних трасах міського руху

Аналіз рис. 4.9 демонструє, що основний обсяг емісій забруднюючих речовин відбувається під час пересування автомобілів швидкісними трасами в рамках даного циклу. У порівнянні емісії на інших типах доріг показали значно менші обсяги викидів на однакову кількість кілометрів. Проте глибший аналіз цих даних призвів до несподіваних результатів. Загалом, викиди монооксиду вуглецю (CO) і оксидів азоту (NO_x) на дистанції приблизно 6 км, були виміряні в кількості 1,572 г і 0,175 г відповідно, з усередненими показниками викидів рівними 0,2022 г для CO і 0,0384 г для NO_x .

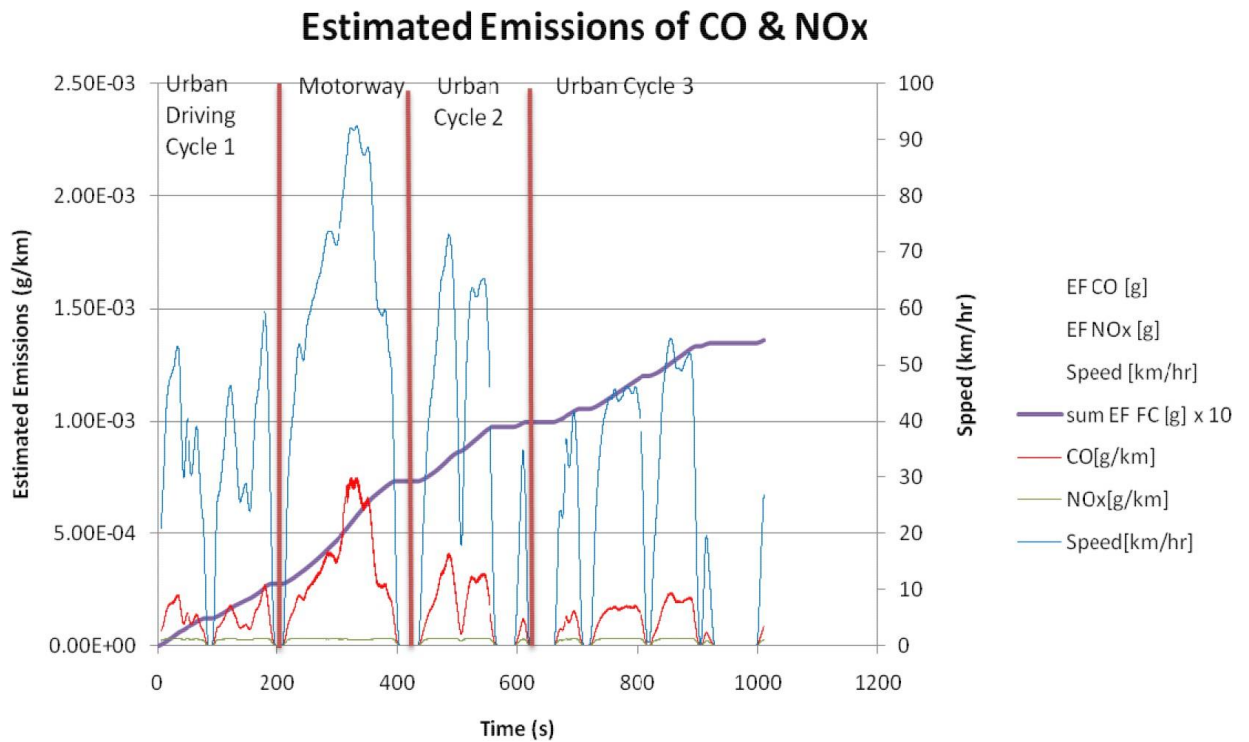


Рис. 4.10 - Діаграма передбачуваних викидів відповідно до зміни швидкості

На рис. 4.10 представлено порівняння зон автострад та міських територій з метою аналізу теоретичних викидів забруднюючих речовин. Автостради демонструють середні показники викидів чадного газу та оксидів азоту на рівні 0,000347 та 0,0000265 грама відповідно. У цьому контексті є застосовним і рівняння для оцінки емісії гарячих газів, що сприяє точності розрахунків CO і NO_x. Порівнюючи з даними міським маршрутом, можна помітити, що концентрація чадного газу там досягає 0,00085 грама, тоді як оксиди азоту - 0,0000184 грама. Основний висновок полягає в тому, що рух на автострадах, де зазвичай підтримується висока швидкість, теоретично сприяє зниженню обсягу викидів в атмосферу в порівнянні з аналогічним міським маршрутом. Це підкріплює гіпотезу про те, що рівномірний рух менш шкідливий для екології. Відмінна риса міських доріг - множинні зупинки та старти, що веде до підвищеного споживання палива і, як наслідок, до зростання рівня емісії забруднювачів у порівнянні з автострадами.

4.2 Порівняння результатів

4.2.1 Тестування вулично-дорожньої мережі та швидкісних трас

У цьому експерименті аналізувалися довгострокові патерни пересування міськими маршрутами і швидкісним трасам [84]. Рис. 4.11 та 4.12 демонструють траєкторії руху, виявлені в ході обох видів транспортних переміщень.

Проїзд через центральні міські райони в рамках циклу міського руху UDC характеризувався частими зупинками, швидкість транспортного засобу піднімалася до 74 км/год. У той час як рух швидкісною дорогою, що описується циклом субурбанних поїздок EUDC, відрізнявся мінімальною кількістю зупинок, при цьому розганяючись до 100 км/год неодноразово.

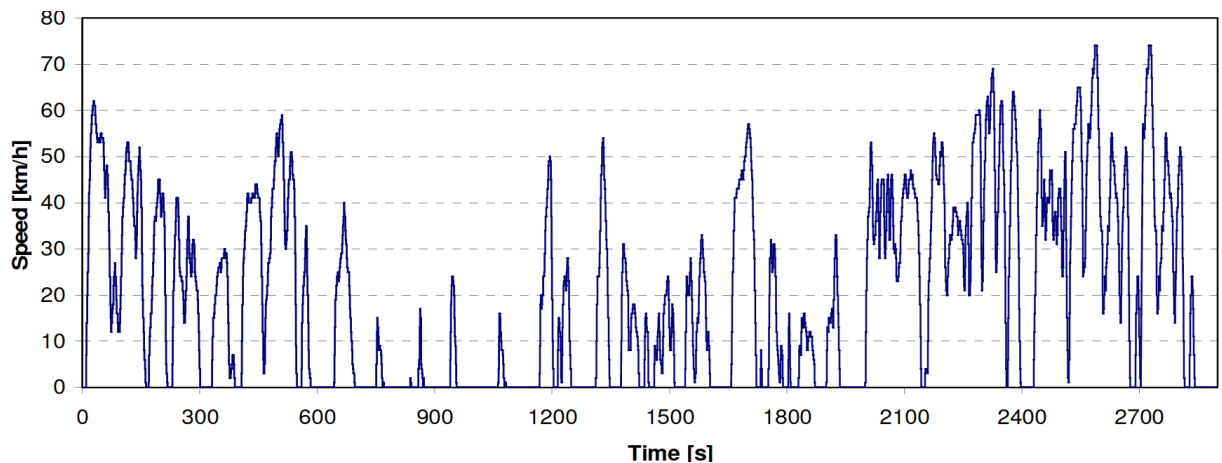


Рис. 4.11 - Міський цикл руху

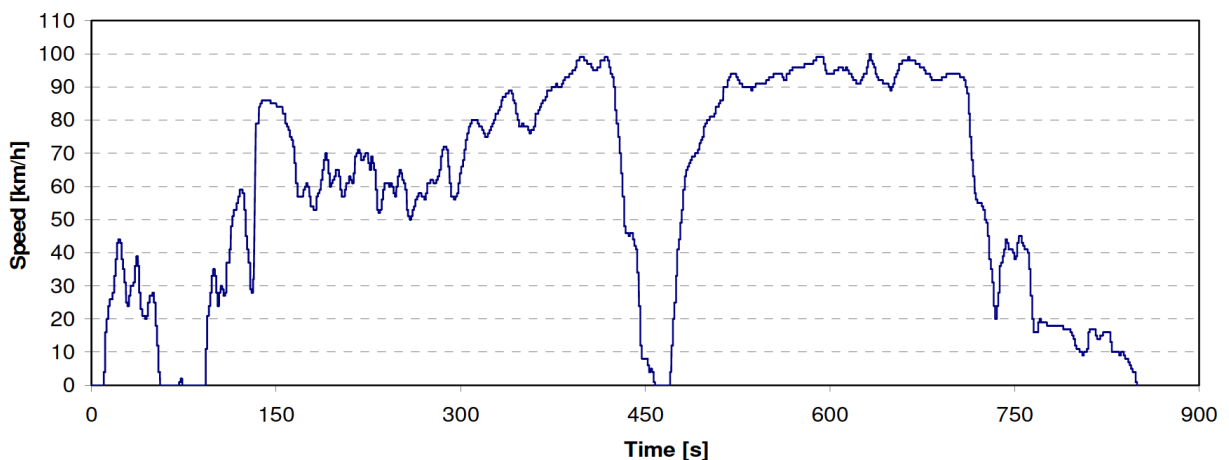


Рис. 4.12 - Цикл руху за межами міста

Після оптимізації траєкторій руху двох маршрутів, викиди чадного газу та

оксидів азоту, а також сумарне споживання палива (FC) кількісно визначаються у грамах на кілометр. Дані показники обчислюються згідно з формулою (3.1), застосовуючи специфічні коефіцієнти даної моделі автомобіля.

Дані коефіцієнти викидів розроблені, спираючись на параметри, встановлені у рамках методології COPERT. Ці параметри є загальноприйнятими показниками в Європі для визначення екологічних характеристик автомобіля, враховуючи його модель, рік випуску, об'єм двигуна, а також відповідність законодавчим екологічним нормам.

На рис. 4.13 та 4.14 демонструються емісії вуглецю (CO) та оксидів азоту (NO_x) з урахуванням сумарного споживання палива (FC) у грамах на кілометр для кожного з режимів руху.

Виявлено, що рівні викидів оксидів азоту (NO_x) та вуглеводнів (FC) виявилися нижчими під час випробувань у рамках європейського додаткового уніфікованого їздового циклу (EUDC), порівняно з викидами у міському циклі (UDC). У той же час концентрація оксиду вуглецю (CO) перевищувала значення, зафіксовані в EUDC, порівняно з UDC. Порівняння UDC та EUDC за CO, NO_x та FC наведено в табл. 4.2.

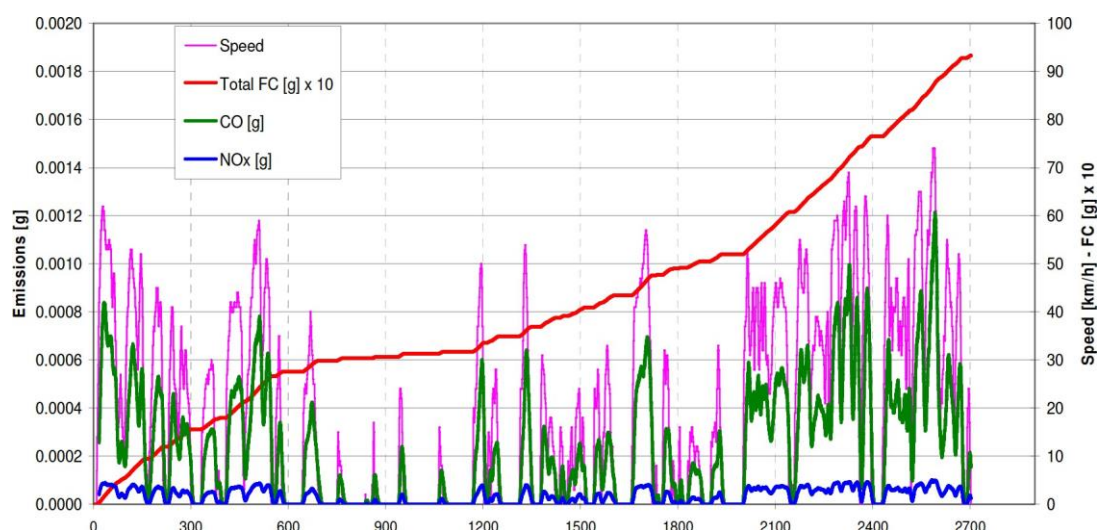


Рис. 4.13 - Викиди при міському циклі руху

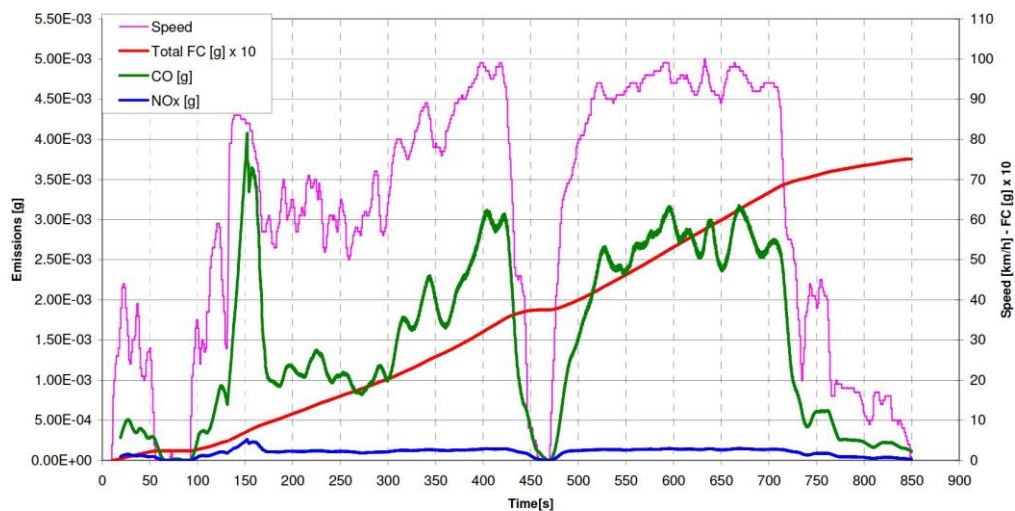


Рис. 4.14 - Додаткові викиди при замському циклі руху

Таблиця 4.2

Порівняння UDC та EUDC за CO, NO_x та FC

Показники	Міський цикл їзди Пройдена відстань = 14,678 км Середня швидкість = 19,547 км/год. Час = 2703,3 с.			Замський цикл їзди Пройдена відстань = 14,073 км. Середня швидкість = 59,614 км/год. Час = 849,9 с.		
	CO	NO _x	витрата палива	CO	NO _x	витрата палива
Середні викиди за секунду [г/с]	0,003	0,0004	0,345	0,014	0,0010	0,884
Середні викиди на одиницю відстані [г/км]	0,544	0,076	63,59	0,837	0,059	53,38
Загальні викиди [г/поїздки]	7,990	1,112	933,3	11,776	0,826	751,2

4.2.2 Визначення коефіцієнтів викидів

Концентрації CO та NO_x були обчислені окремо відповідно до кожного часового інтервалу, застосовуючи формулу (1.11), після чого їх значення агрегувалися для визначення середнього емісійного фактора (EF) згідно з рівнянням (4.1).

$$EF_{cp} = \sum \frac{EF(n)}{N} \quad (4.1)$$

де EF_{cp} - середній емісійний фактор;

$EF(n)$ - емісія n-го токсичного компонента.

Для отримання даних, що верифікуються, знадобилося виконати 18 випробувань, метою яких було розробити типовий їздовий профіль для міста Житомир. Це дозволило б точно оцінити емісії шкідливих речовин від автомобілів на основі місцевого циклу їзди на відміну від стандартного європейського циклу їзди (EDC) (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Середній час випробувального маршруту

Час	8:00 - 10:00 год	16:00 - 18:00 год	21:00 - 22:00 год
Маршрут 1 [min] середнє	33,9	20,77	10,68
Маршрут 1 [min] середнє	13,65	33,45	12,92

На рис. 4.15 та 4.16 представлені результати розрахунків емісійних коефіцієнтів, виконані на основі даних про режим руху у місті Житомирі. Для цих розрахунків використовувалися спеціалізовані рівняння (3.1) та формула (4.1), що застосовуються у програмному забезпеченні COPERT5, та адаптовані під специфіку кожного типу забруднюючих речовин. Дослідження передбачало аналіз лише викидів, що відбуваються при вже прогрітому двигуні, тобто через 15 хвилин після його запуску, що дозволило виключити вплив про холодних викидів на підсумкові показники.

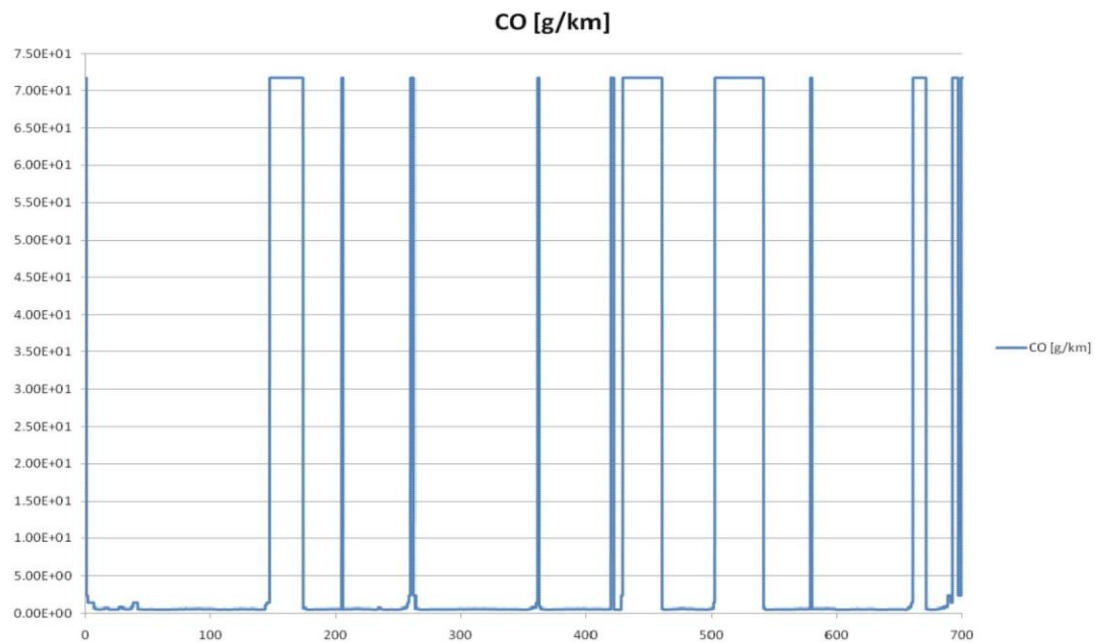


Рис. 4.15 - Викиди монооксиду вуглецю, розраховані на основі аналізу даних циклу руху у місті Житомирі

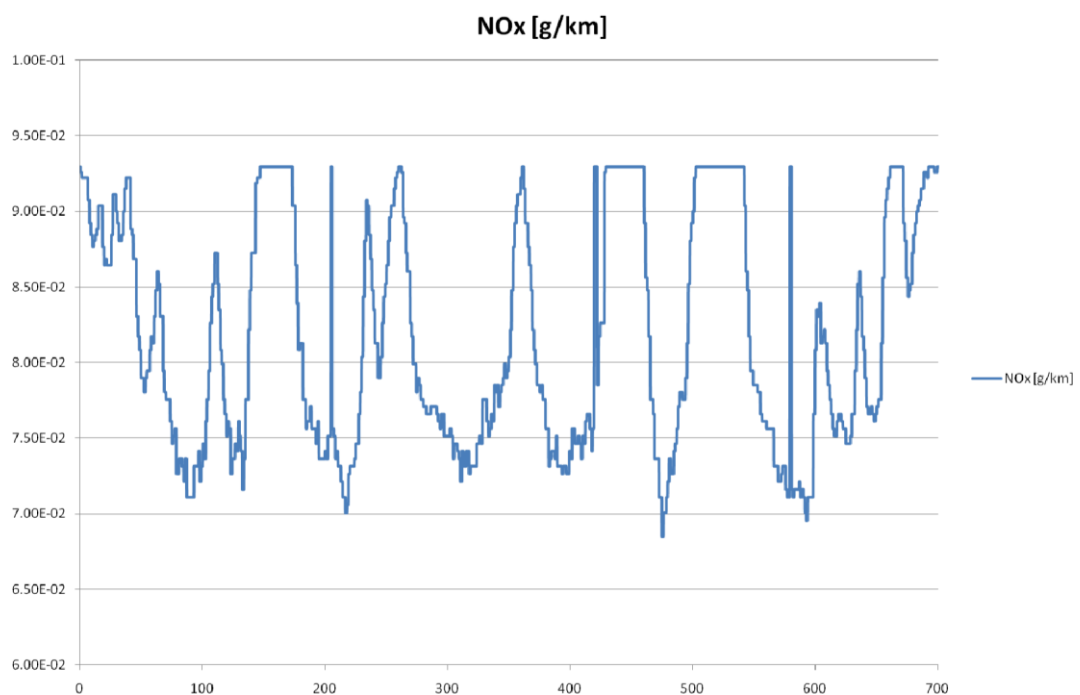


Рис. 4.16 - Викиди оксидів азоту (NO_x), розраховані на основі аналізу даних циклу руху у місті Житомирі

В автомобілі встановлено аналізатор газів з індивідуальним компактним дисплеєм, завданням якого є моніторинг і фіксація показань, автоматично записуючи їх у документ формату Excel кожну секунду. Цей прилад здатний

зберігати записи протягом максимального часу 20 хвилин. За досягнення цього часового порогу відбувається автоматичне перезавантаження для початку реєстрації нового циклу даних. У зв'язку з обмеженням часу, для достовірності результатів, рекомендувалося виконання короткочасного тест-драйву, що не перевищує 20 хвилин.

Аналітичний прилад для вимірювання газів визначає рівні викидів використовуючи дві методики: у перерахунку на об'ємні відсотки та частини на мільйон, або концентрацію в грамах на милі. На рис. 4.17 та 4.18 представлені дані про емісії, перераховані у грами на кожен пройдений кілометр.

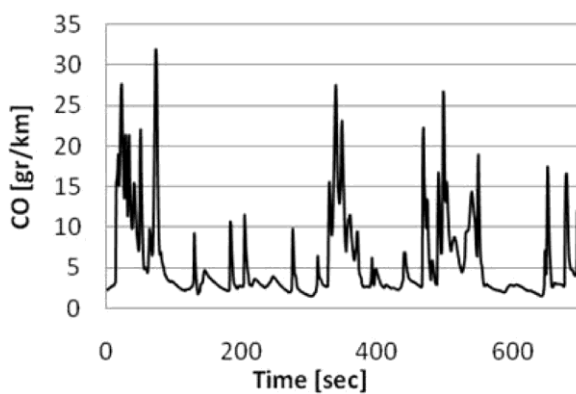


Рис. 4.17 - Емісії чадного газу, зафіксовані газоаналізатором

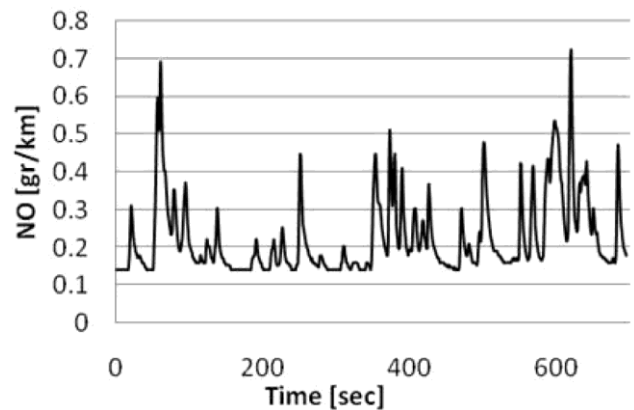


Рис. 4.18 - Емісії оксидів азоту (NO_x) із газоаналізатора

Для визначення загального показника викидів чадного газу (CO) та оксидів азоту (NO) з використанням методу розрахунків було обчислено середню швидкість руху автомобіля в кілометрах на годину та застосовано в рамках рівняння (1.10), що дозволило оцінити середні показники викидів у грамах на кілометр для кожного з газів, що вивчаються. Отримані значення були помножені на загальну подолану відстань за час поїздки в кілометрах. На відміну від розрахункового метод вимірювання передбачає пряме множення фіксованих величин викидів для кожного газу на загальну довжину маршруту.

Таблиця 4.4 демонструє аналітичне зіставлення двох різних методологій. Результати, виявлені в рамках проведеного експерименту, виявили значні

розбіжності між теоретично передбаченими показниками викидів чадного газу (CO) та оксидів азоту (NO) згідно з COPERT 5 та їх реальними рівнями. З'ясувалося, що теоретична прогнозована концентрація CO була перевищена, тоді як показник NO виявився недооціненим.

Таблиця 4.4

Аналіз зіставлення фактичних та теоретичних обсягів емісій

Токсичний елемент	Виміряні викиди	Розрахункові викиди
NO _x [гр/км]	1,136	0,420
CO [гр/км]	28,66	66,48

Для аналізу відмінностей в емісії оксиду вуглецю та оксидів азоту були розроблені діаграми, що відображають два показники емісії в кореляції зі швидкістю автомобілів [85]. Рис. 4.19 і 4.20 демонструють варіації коефіцієнтів викидів зі збільшенням швидкості авто від стаціонарного становища до 100 км/год.

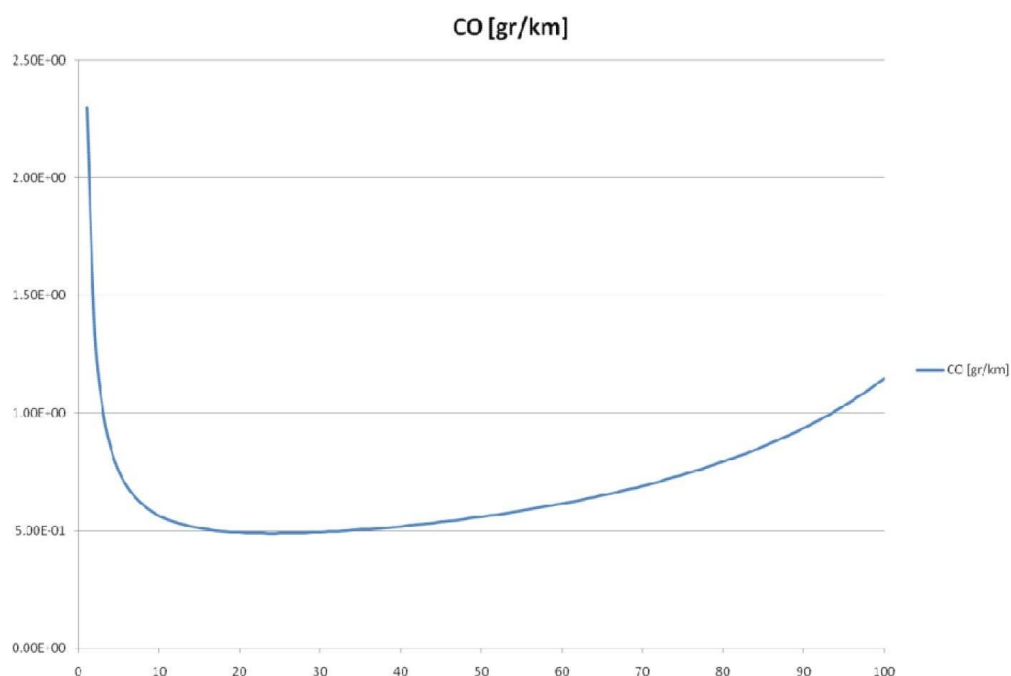


Рис. 4.19 - Кореляція між викидами чадного газу (CO) та швидкістю руху за протоколом COPERT

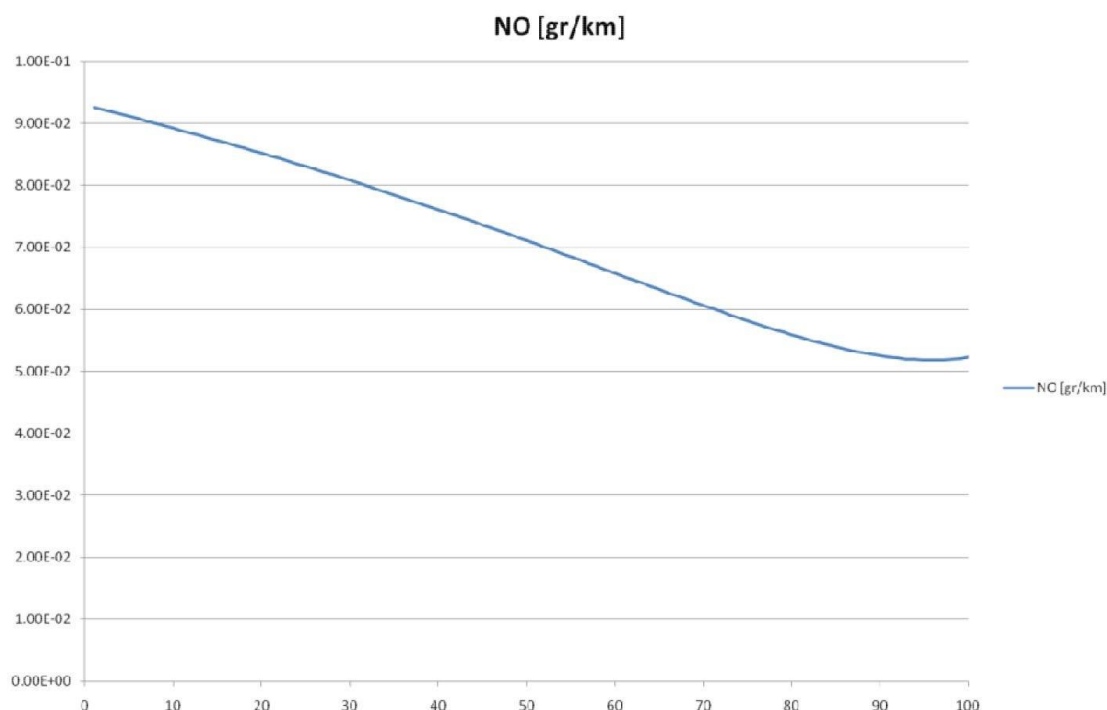


Рис. 4.20 - Кореляція між викидами оксидів азоту (NO_x) та швидкістю руху за системою оцінки COPERT

Виявлено, що чадний газ (CO) виділяється у значних обсягах під час зупинки автомобіля (при стані холостого ходу), що становило до 17% загальної тривалості тестування. Це зумовило помітну різницю у фактичному рівні емісій. У тих викидів оксидів азоту (NO_x), їх коливання були різні залежно від рівня швидкості, включаючи періоди нерухомості авто.

У таблиці 4.5 демонструються граничні значення швидкостей авто, у яких змінюється концентрація чадного газу та оксидів азоту. Зазначимо, що виключення періодів холостого ходу із загального часу призведе до зниження оцінок емісії чадного газу.

Таблиця 4.5

Критичні швидкості автомобіля для змін CO та NO_x

Швидкість руху [км/год]	0	1	25	96	100
CO [гр/км]	71,7	2,3	0,49	-	1,15
NO_x [гр/км]	0,0929	0,0926	-	0,0518	0,0523

4.3 Підбиття підсумків дослідження

4.3.1 Визначення початкового циклу водіння

Три ідеальні маршрути були відібрані для пікових часів, згідно з рис. 4.21. На рис. 4.22 представлено три оптимальні варіанти маршрутів для вечірніх поїздок. Було проведено достатній обсяг випробувань у тому, щоб підсумковий цикл руху міг відбивати типові умови пересування містом.

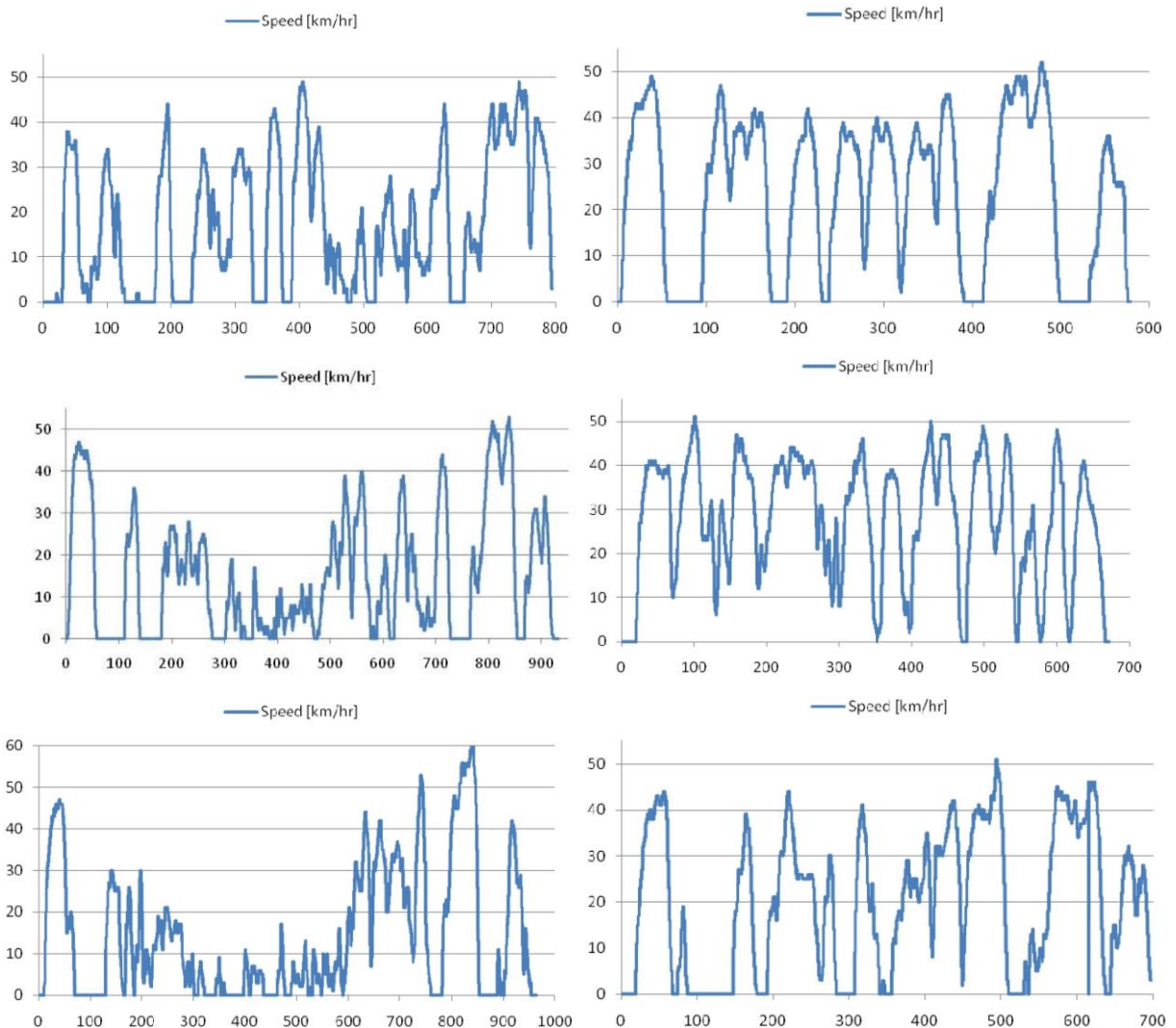


Рис. 4.21 - Три оптимальні поїздки в годину пік [час в залежності від швидкості].

Рис. 4.22 - Три оптимальні поїздки у вечірній час [час в залежності від швидкості].

Виявлено, що пікова швидкість сягає 55 км/год, при цьому кількість зупинок обмежується 15 протягом одного маршруту. Вибір маршруту обумовлений двома основними факторами: поточною завантаженістю трафіку та

відстанню до центральної частини міста, як згадується в джерелі [79].

4.1.3 Аналіз споживання палива під час руху

Рис. 4.23 та 4.24 демонструють профілі руху транспортних засобів, зафіксовані в умовах пікового навантаження та за часів зниженого трафіку. У періоди пікової активності спостерігалася значна кількість змін швидкості, викликаних частими стартами та зупинками, внаслідок чого середня швидкість становила 28,72 кілометри на годину. У контрасті з цим, вечірні поїздки показали вищу середню швидкість - 32,22 км/год, що свідчить про меншу кількість затримок та вільніший потік трафіку. Однак наявність світлофорів і загальна щільність дорожнього руху вносили деяку ступінь нерівномірності руху транспортних засобів в обох випадках дослідження.

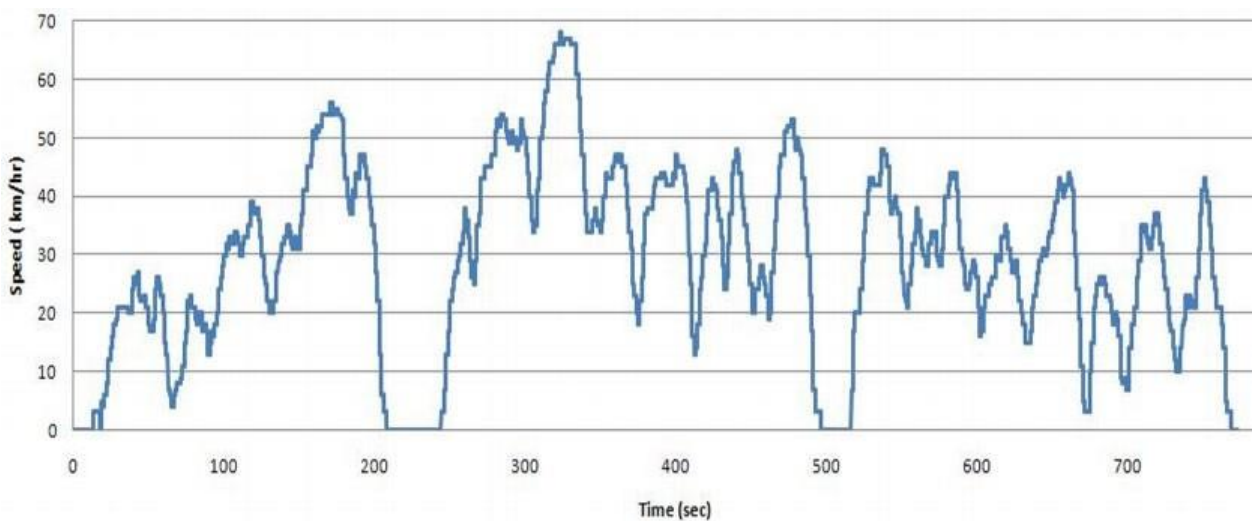


Рис. 4.23 - Цикл руху в період підвищеної завантаженості доріг

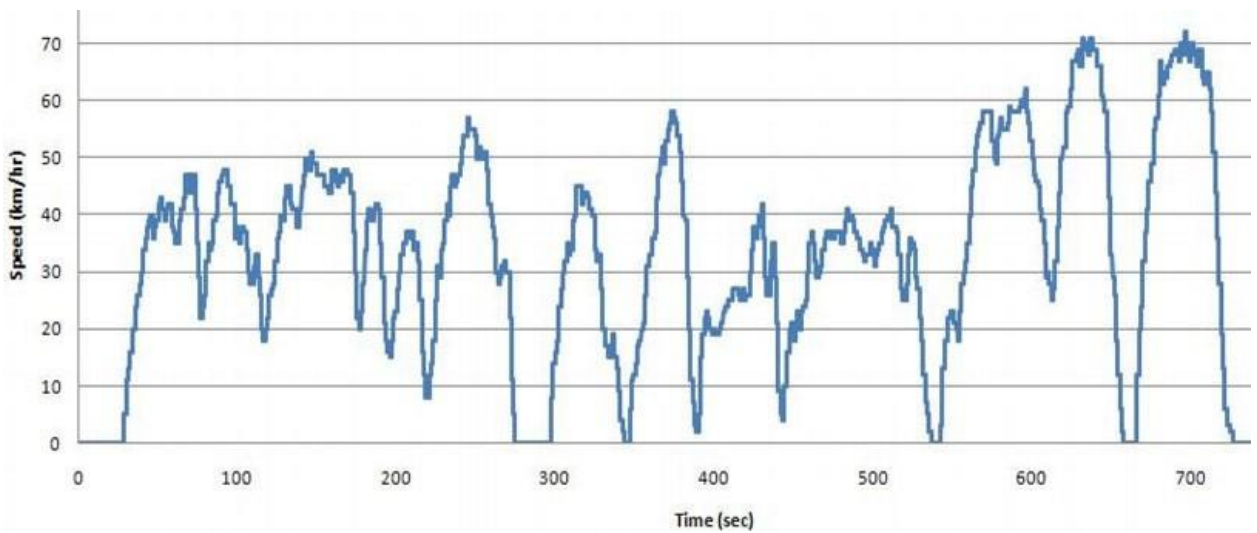


Рис. 4.24 - Керування автомобілем в умовах вечірньої їзди

На ілюстрації рис. 4.25 представлений процес руху транспортного засобу по місту Житомиру в умовах інтенсивного трафіку, включаючи дані про викиди чадного газу (CO) та оксидів азоту (NO_x) у грамах на секунду, а також споживання палива (FC) у грамах. Дані були визначені на основі формули (1.3), зважаючи на специфічні коефіцієнти для даного легкового автомобіля. Ці коефіцієнти визначаються з урахуванням характеристик емісії при нагріванні за методикою COPERT, яка є стандартизованим підходом Європейського Союзу для класифікації автомобілів за маркою, роком випуску, обсягом двигуна та відповідністю законодавчим нормам з екологічної безпеки.

У таблиці 4.6 представлені усереднені показники викидів за поїздку, розраховані за формулою COPERT з середньої швидкості.

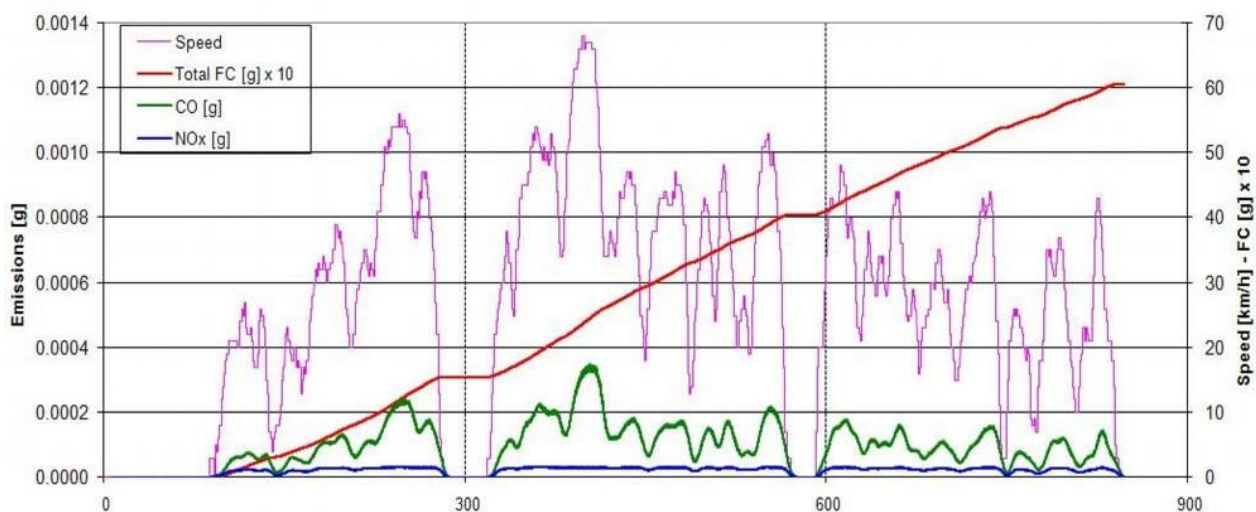


Рис. 4.26 - Три оптимальні поїздки у вечірній час [час залежно від швидкості]

Таблиця 4.6

Середня швидкість, викиди CO, NO_x та FC

Досліджуваний параметр	Швидкість [км/год]	CO [г/км]	NO _x [г/км]	FC [г/км]
Усереднений результат	28,27	0,1743	0,0499	104,6885

Таблиця 4.7 демонструє сукупні показники емісії на поїздку, розраховані шляхом підсумовування індивідуальних коефіцієнтів викидів, що вимірюються за кожну секунду.

Таблиця 4.7

Загальні викиди, отримані за подорож

Досліджуваний параметр	CO [г]	NO _x [г]	FC [г]	Час [с]	Дистанція [км]
Загальний викид	1.201	0.268	606.651	848.28	6.175

Висновки до розділу.

Виконано аналіз експериментальних даних, щодо токсичності викидів автомобільного двигуна в різних режимах руху. Отримані результати показали зміну рівнів шкідливих викидів залежно від характеру руху автомобіля та умов його експлуатації.

ВИСНОВКИ

1. У результаті аналізу науково-технічних джерел систематизовано відомості, щодо складу відпрацьованих газів автомобільних двигунів та механізмів утворення основних токсичних компонентів. Показано, що рівень викидів значною мірою визначається режимами роботи двигуна та умовами його експлуатації.

2. Розглянуто чинні екологічні нормативи та методи оцінювання токсичності викидів автомобільного транспорту. Обґрунтовано доцільність використання їздових циклів, як інструменту оцінки емісій з урахуванням реальних умов руху автомобіля.

3. Розроблено програмну модель у середовищі LabVIEW, яка забезпечує реєстрацію, синхронізацію та попередню обробку експериментальних даних, щодо емісій забруднюючих речовин. Структура моделі дозволяє використовувати її для подальшого аналізу токсичності в різних режимах руху.

4. На основі експериментальних даних виконано аналіз токсичності викидів автомобільного двигуна в різних режимах руху. Отримані результати показали зміну рівнів основних забруднюючих речовин залежно від характеру руху та умов експлуатації автомобіля.

5. Застосування комплексного підходу, який поєднує експериментальні вимірювання та моделювання їздового циклу, дозволяє підвищити точність оцінки емісій і визначити ефективні напрями зниження токсичності атмосферних двигунів. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем контролю викидів та підвищення екологічних показників сучасних автомобілів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abdel- Rahman, A.A., On the emissions from internal combustion engines: A review. *International Journal of Energy Research* volume 22 (1998), 483-513
2. Arteconi, A., et al., (2010), «Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe», *Appl. Energy*, Vol.87 (6), pp. 2005-2013.
3. Baltusis, P. 2004; On-board vehicle diagnostics. Convergence Transportation Electronics Association, Paper 2004-21-0009
4. Barone, Stefano. Statistics-Driven Development of OBD Systems; An Overview, *Quality and Reliability Engineering International*, 2006, vol 22, 615-628
5. Bishop, G.A. and Stedman, D.H. 1996; Measuring the emissions of passing cars. *Accounts of chemical research*, Volume 29, Number 10: pp 489-495.
6. Bishop, G.A., Stedman, D.H., De La Garza Castro, J., and Davalos, F.J. 1997; On-road remote sensing of vehicle emissions in Mexico; *Environmental Science and Technology* 31: pp 3505–3510.
7. Bradley, K.S., Brooks, K.B., Hubbard, L.K., Popp, P.J. and Stedman, D.H. 2000; Motor-vehicle fleet emissions by OP-FTIR. *Environmental Science and Technology* 34: pp 897-899.
8. Brian Vad Mathiesen, Henrik Lund, Kenneth Karlsson, 100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth, *Applied Energy*, In Press, Corrected Proof, Available online 31 March 2010, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.03.001.
 - a. Delorme, A. Rousseau, P. Sharer, S. Pagerit, and T. Wallner, “Evolution of hydrogen fueled vehicles compared to conventional vehicles from 2010 to 2045,” 2009.
9. Khandelwal, A. Karakurt, P. R. Sekaran, V. Sethi, and R. Singh, “Hydrogen powered aircraft : The future of air transport,” *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 60, pp. 45–59, 2013.
10. L. Salvi and K. A. Subramanian, “Experimental investigation on effects of compression ratio and exhaust gas recirculation on backfire, performance and emission characteristics in a hydrogen fuelled spark ignition engine,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 13, pp. 5842–5855, 2016.
11. White, R. R. Steeper, and A. E. Lutz, “The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, no. 10, pp. 1292–1305, 2006.
12. B. Lewis and G. Von Elbe, *Combustion, flames, and explosions of gases*. New York: Academic Press, 2d ed. ed., 1961.
13. Council directive of 20 March 1970 on the approximation of the laws of the Member States on measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles (2004), European Union.

14. K. Srivastava, A. K. Agarwal, A. Datta, and R. K. Maurya, *Advances in internal combustion engine research*. Singapore: Springer, 2017.
15. D. Kabat and J. Heffel, "Durability implications of neat hydrogen under sonic flow conditions on pulse-width modulated injectors," *International Journal of Hydrogen Energy - INT J HYDROGEN ENERG*, vol. 27, pp. 1093–1102, 2002.
16. D. R. Pearl, "O-ring seals in the design of hydraulic mechanisms," *SAE Technical Paper*, vol. 470247, p. 10, 1947.
17. Directive 98/69/EC of The European Parliament and of the council of 13 October 1998, Relating to measures to be taken against pollution by emission from motor vehicles and amending Council Directive 70/220/EEC
18. Peeters, "Literature Study: The Challenges of a Hydrogen Internal Combustion Engine ," Master's thesis, Delft University of Technology, 2021.
19. Zhao, T. N. Asmus, D. N. Assanis, J. E. Dec, J. A. Eng, and P. M. Najt, "Homogeneous charge compression ignition (hcci) engines," 2003.
20. Fuller, G., 2006; London Air Quality 2004; London Air Quality Network Report 12; Environmental Research Group, London, UK.
21. L. Yip, A. Srna, A. C. Y. Yuen, S. Kook, R. A. Taylor, G. H. Yeoh, P. R. Medwell, and Q. N. Chan, "A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 22, p. 4842, 2019.
22. Li and G. A. Karim, "Knock in spark ignition hydrogen engines," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 29, no. 8, pp. 859–865, 2004.
23. H. Osamura and N. Abe, *Development of New Iridium Alloy for Spark Plug Electrodes*, vol. 108. 1999.
24. Hao Cai, Shaodong Xie, "Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005", *Atmospheric Environment*, Volume 41, Issue 39, December 2007, Pages 8963-8979
25. Harrison, R.M., Tilling, R., Callen Romero, M.S., Harrad, S. and Jarvis, K. 2003; A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment. *Atmospheric Environment* 37 (17): pp 2391-2402.
26. Hausberger, S; Rodler, J; Sturm, P; and Rexeis, M. 2003. Emission factors for heavy duty vehicles and validation by tunnel measurements. *Atmospheric Environment* 37: pp5237-5245.
27. Haydar, F. and Padiaditi, K. 2010. Evaluation of the environmental impact assessment system in Syria. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(6), pp.363-370.
28. Heywood, John B., *Internal combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill International Editions -1988
29. Topinka, M. D. Gerty, J. Heywood, and J. Keck, "Knock behavior of a

lean- burn, h₂ and co enhanced, si gasoline engine concept,” SAE Technical Papers, 2004.

30. W. Heffel, “Nox emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500rpm using exhaust gas recirculation,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 8, pp. 901–908, 2003.

31. J. W. Heffel, “Nox emission reduction in a hydrogen fueled internal combustion engine at 3000 rpm using exhaust gas recirculation,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 11, pp. 1285–1292, 2003.

32. J. Wang, Z. Huang, Y. Fang, B. Liu, K. Zeng, H. Miao, and D. Jiang, “Combustion behaviors of a direct-injection engine operating on various fractions of natural gas–hydrogen blends,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 3555–3564, 2007.

33. Jimenez, J.L., Koplow, M.D., Nelson, D.D., Zahniser, M.S. and Schmidt, S.E. 1999; Characterisation of on-road vehicle NO emissions by a TILDAS sensor. *Journal of the Air and Waste Management Association* 49: pp463-470

34. Alvine, V. Shutthanandan, W. Bennett, C. Bonham, D. Skorski, S. Pitman, M. Dahl, and C. Henager, “High- pressure hydrogen materials compatibility of piezoelectric films,” *Applied Physics Letters*, vol. 97, pp. 221911– 221911, 2010.

35. K. Yamane, M. Nogami, Y. Umemura, M. Oikawa, Y. Sato, and Y. Goto, “Development of high pressure h₂ gas injectors, capable of injection at large injection rate and high response using a common-rail type actuating system for a 4-cylinder, 4.7-liter total displacement, spark ignition hydrogen engine,” SAE Technical Papers, 2011.

36. Das, “Fuel induction techniques for a hydrogen operated engine,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 15, pp. 833–842, 1990.

37. L. Hosking, “Literature Study: A Flying Test Bed for Sustainable Aviation: Alternative Fuel-powered Aircraft ,” Master’s thesis, Delft University of Technology, 2020.

38. L. M. Das, “Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 27, no. 5, pp. 479–487, 2002.

39. Lindfeldt, E.G., et al., (2010), «Strategies for a road transport system based on renewable resources – The case of an import-independent Sweden in 2025», *Appl.Energy*, Vol.87 (6), pp. 1836-1845.

40. Ludykar et al., Cold start emissions at + 22, -7 and -20 C ambient temperatures from a three-way catalyst (TWC) car: regulated and unregulated exhaust components, the *Science of the Total Environment* 235 (1999) 65-69

41. Ludykar et al., Cold start emissions at + 22, -7 and -20 C ambient temperatures from a three-way catalyst (TWC) car: regulated and unregulated exhaust components, the *Science of the Total Environment* 235 (1999) 65-69

42. R. Sadiq Al-Baghdadi, "Effect of compression ratio, equivalence ratio and engine speed on the performance and emission characteristics of a spark ignition engine using hydrogen as a fuel," *Renewable Energy*, vol. 29, no. 15, pp. 2245–2260, 2004.
43. M. Berckmuller and H. Rottengruber, "Potentials of a charged si-hydrogen engine," *Proceedings of the International Hydrogen Energy Forum*; 2004 May 25-28; Beijing, China, pp. 59–67, 2004.
44. M. Christensen and B. Johansson, "Influence of mixture quality on homogeneous charge compression ignition," *SAE transactions*, pp. 951–963, 1998.
45. M. Christensen, B. Johansson, and P. Einewall, "Homogeneous charge compression ignition (hcci) using isooctane, ethanol and natural gas-a comparison with spark ignition operation," *SAE transactions*, pp. 1104– 1114, 1997.
46. McGahan, Paul., PM, *Estimation of On-Road Vehicle Fuel Consumption and Emissions using Analysis of OBD Signals*, 4th Year Mechanical Engineering Project, BEng, 07/04/2006.
47. Moosmuller, H., Mazzoleni, C., Barber, P.W., Kuhns, H.D., Keislar, R.E. and Watson, J.G. 2003; *On-road measurement of automotive particulate emissions by ultraviolet lidar and transmissometer: Instrument. Environmental Science and Technology* 37: pp4971-4978.
48. Myung et al. *Experimental investigation of the effect of thin-wall substrates and spark timing on total hydrocarbon emissions during cold-start for super-ultra low-emission application*, *Journal of Automobile Engineering*, Vol 218, Part D (2004)
49. Ou, X., Yan, X., Zhang, X. and Liu, Z. 2012. *Life-cycle analysis on energy consumption and GHG emission intensities of alternative vehicle fuels in China*. *Applied Energy*, 90(1), pp.218-224.
50. G. Aleiferis and M. F. Rosati, "Controlled autoignition of hydrogen in a direct-injection optical engine," *Combustion and Flame*, vol. 159, no. 7, pp. 2500–2515, 2012.
51. Huyskens, S. Oost, P. J. Goemaere, K. Bertels, and M. Pecqueur, "The technical implementation of a retrofit hydrogen pfi system on a passenger car," *SAE Technical Papers*, 2011.
52. M. Najt and D. E. Foster, "Compression-ignited homogeneous charge combustion," *SAE Transactions*, pp. 964– 979, 1983.
53. P. Talebizadeh Sardari, M. Babaie, R. Brown, H. Rahimzadeh, Z. Ristovski, and M. Arai, "The role of non-thermal plasma technique in nox treatment: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 886–901, 2014.
54. Pang et al., *Review of engine cooling technologies for modern engines*. *Journal of automotive engineering*, Vol 218, Part D (2004)
55. Pierson et al. C, *Comparison of the SCAQS tunnel study with other on-*

road emissions data. *Journal of Air Waste Management Association* 40, 1495-1504

56. Pokharel, S.S., Bishop, G.A. and Stedman, D.H. 2002; An on-road motor vehicle emissions inventory for Denver: An efficient alternative to modeling. *Atmospheric Environment* 36: pp5177–5184.

57. H. Stanglmaier and C. E. Roberts, “Homogeneous charge compression ignition (hcci): Benefits, compromises, and future engine applications,” *SAE Transactions*, vol. 108, pp. 2138–2145, 1999.

58. Hari Ganesh, V. Subramanian, V. Balasubramanian, J. M. Mallikarjuna, A. Ramesh, and R. P. Sharma, “Hydrogen fueled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: An experimental study,” *Renewable Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1324–1333, 2008.

59. R. J. Natkin, A. R. Denlinger, M. Younkins, A. Z. Weimer, S. Hashemi, and A. T. Vaught, “Ford 6.8l hydrogen ic engine for the e-450 shuttle van,” *SAE Technical Papers*, 2007.

60. R.J. North “Assessment of real-world pollutant emissions from a light duty diesel vehicle”. PhD Thesis, University of London, 2006.

61. Rabl, A. and de Nazelle, A., (2012), «Benefits of shift from car to active transport», *Transp. Policy*, Vol.19 (1), pp. 121-131.

62. Verhelst and T. Wallner, “Hydrogen-fueled internal combustion engines,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, no. 6, pp. 490–527, 2009.

63. Verhelst S., Sierens, and S. Verstraeten, “A critical review of experimental research on hydrogen fueled si engines,” *SAE Technical Papers*, 2006.

64. Saerens, J. Vandersteen, T. Persoons, J. Swevers, M. Diehl, E. Van den Bulck, Minimization of the fuel consumption of a gasoline engine using dynamic optimization, *Applied Energy*, Volume 86, Issue 9, September 2009, Pages 1582- 1588, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.12.022.

65. Sharad, G. (2012), «Impacts of traffic-flows on vehicular-exhaust emissions at traffic junctions», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.17 (1), pp. 21-27.

66. Shi, J.P., Harrison, R.M., Evans, D.E., Alam, A., Barnes, C. and Carter, G. 2002; A method for measuring particle number emissions from vehicles driving on the road. *Environmental Technology*, Volume 23, Number 1: pp 1-14

67. Smit, R., et al., (2010), «Validation of road vehicle and traffic emission models - A review and meta-analysis», *Atmos. Environ.*, Vol.44 (25), pp. 2943-2953.

68. Stephens, R.D., Giles, M., McAlinden, K., Gorse, R.A., Hoffman, D. and James, R. 1997; An analysis of Michigan and California CO remote sensing measurements. *Journal of the Air and Waste Management Association* 47: pp 601-607.

69. Sturm et al. Determination of Traffic emissions – intercomparison of different calculation methods, *the science of the total environment*, 189/190 (1996) 187-

70. Su, J., et al., (2011), «Non-methane volatile organic compound emission inventories in Beijing during Olympic Games 2008», *Atmos. Environ.*, Vol.45 (39), pp. 7046-7052.
71. Ullman, “Investigation of the effects of fuel composition on heavy-duty diesel engine emissions,” SAE International, 1989.
72. Dhyani and K. A. Subramanian, “Fundamental characterization of backfire in a hydrogen fuelled spark ignition engine using cfd and experiments,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 60, pp. 32254–32270, 2019.
73. Frijters, “A Flying Test Bed for Sustainable Aviation - Hydrogen Propulsion” Master’s thesis, Delft University of Technology, 2020.
74. Pulkrabek, *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
75. W. Stockhausen, R. Natkin, D. Kabat, L. Reams, X. Tang, S. Hashemi, S. Szwabowski, and V. Zanardelli, “Ford p2000 hydrogen engine design and vehicle development program,” SAE Technical Papers, 2002.
76. Wang, H., et al., (2010), «Trends in vehicular emissions in China's mega cities from 1995 to 2005», *Environmental Pollution*, Vol.158 (2), pp. 394-400.
77. Wang, Q., H. Huo, K. He, Z. Yao and Q. Zhang, “Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13, 289-297, 2008.
78. Wenzel, T. 2003; Use of Remote Sensing measurements to evaluate vehicle emission monitoring programs: results from Phoenix, Arizona. *Environmental Science and Policy* Volume 6, Issue 2: pp 153-166.
79. Welch, D. Mumford, S. Munshi, J. Holbery, B. Boyer, M. Younkins, and H. Jung, *Challenges in Developing Hydrogen Direct Injection Technology for Internal Combustion Engines*. 2008.
80. Wenzel, T., Singer, B.C. and Slott, R., 2000; Some issues in the statistical analysis of vehicle emissions. *Journal of Transportation Statistics*, September 2000. pp 1-14.
81. Wielenmann et al., Regulated and unregulated diesel and cold start emissions at different temperatures, *Atmospheric Environment*, vol 39 (2005), 2433-2441)
82. Tang, D. M. Kabat, R. J. Natkin, W. F. Stockhausen, and J. Heffel, “Ford p2000 hydrogen engine dynamometer development,” SAE Technical Papers, 2002.
83. Saboohi, H. Farzaneh, Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption, *Applied Energy*, Volume 86, Issue 10, October 2009, Pages 1925-1932, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.12.017.)

84. Younglove, T., Scora G. and Barth M. 2005; Designing on-road vehicle test programs for the development of effective vehicle emission models. Transportation Research Record No. 1941, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2005, pp 51-59.

85. Huang, J. Wang, B. Liu, K. Zeng, J. Yu, and D. Jiang, “Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas–hydrogen blends under different ignition timings,” *Fuel*, vol. 86, no. 3, pp. 381–387, 2007.