

УТОЧНЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ АВТОМОБІЛЯ В ЇЗДОВОМУ ЦИКЛІ З
УРАХУВАННЯМ ПРОГРІВУ КАТАЛІТИЧНОГО НЕЙТРАЛІЗАТОРАSPECIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF VEHICLE MOTION IN THE
DRIVING CYCLE TAKING INTO ACCOUNT THE HEATING OF THE CATALYTIC
NEUTRALIZER

Добровольський Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, e-mail: dobrovolskiy@ukr.net, тел. +380632977210

<https://orcid.org/0000-0003-0048-1388>



Садовник Іван Дмитрович, аспірант кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, e-mail: toyota-kiev@ukr.net, тел. +38067-925-99-53

<https://orcid.org/0009-0009-4366-6236>

Анотація. Їздовий цикл - це сукупність регламентованих режимів руху автотранспортних засобів. Їздовий стандартизований цикл визначається середньостатистичним аналізом характеру руху автомобіля в конкретних умовах експлуатації. Їздові цикли створюються для оцінки ефективності роботи автомобіля в конкретних умовах експлуатації. Параметри і режими управління систем автомобіля вибирають за наслідками руху по їздовому циклу. Показники фаз циклів, тобто час, максимальна швидкість, середня швидкість, максимальне прискорення/уповільнення і середнє прискорення/уповільнення в різних циклах різні. Режим руху – визначається головним чином швидкістю і її зміною за елементами їздового циклу: розгону, усталеного руху, уповільнення, гальмування, зупинки, відновлення руху. Визначення енергетичних, економічних та екологічних показників автомобіля в режимах їздового циклу можливе за допомогою математичної моделі, яка описує ці режими. Відомо, що режими руху автомобіля в міському циклі мають неусталений характер. Під час зміни режимів роботи автомобіля відбувається постійна зміна витрат палива та викидів шкідливих речовин. Найбільше викидів шкідливих речовин надходить в навколишнє середовище під час прогріву двигуна, тому важливим є зменшення часу прогріву двигуна та пришвидшення прогріву каталітичного нейтралізатора. Стаття присвячена уточненню математичної моделі руху автомобіля в їздовому циклі з урахуванням прогріву каталітичного нейтралізатора.

Ключові слова. Двигун внутрішнього згорання, транспортний засіб, їздовий цикл, математична модель, викиди шкідливих речовин, паливна економічність, режими роботи, каталітичний нейтралізатор.

Вступ. Основними вимогами, що пред'являються до двигунів внутрішнього згорання в сучасних умовах, є вимоги до їх паливної економічності і токсичності відпрацьованих газів. Для оцінки двигунів транспортних засобів розроблені різні випробувальні стаціонарні їздові цикли, які відображають розподіли режимів роботи двигунів в реальних умовах їх експлуатації.

Викладення основного матеріалу. Оцінка токсичності відпрацьованих газів є важливою складовою охорони навколишнього середовища і здоров'я людини. Правила оцінки токсичності відпрацьованих газів і картерних газів, єдині для держав Європи, були введені Європейською Економічною комісією ООН у 1970 р. [1]. В Україні на сьогоднішній день діють значна кількість Правил ЄЕК ООН що встановлюють викиди шкідливих речовин з відпрацьованих газів.

Для проведення досліджень була уточнена математична модель для оцінювання показників двигуна та транспортного засобу обладнаного системою нейтралізації відпрацьованих газів. Ця математична модель використовується для оцінювання витрати палива та викидів шкідливих речовин автомобіля під час його руху в режимах їздового циклу згідно Правил ЄЕК ООН № 83-05 з використанням зазначеної нейтралізації відпрацьованих газів. Основні технічні параметри автомобіля Scoda Fabia, що використовуються в математичній моделі представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні технічні параметри автомобіля Scoda Fabia з двигуном VW BBY
Table 1 – The main technical parameters of the Skoda Fabia car with a VW BBY engine

Найменування параметра	Значення
Маса автомобіля з водієм, кг	1100
Максимальна швидкість, км/год	167
Вид палива	бензин
Число / розташування циліндрів двигуна	4 / рядне
Літраж двигуна, л	1,39
Діаметр циліндра / хід поршня, мм	76,5 / 75,6
Ступінь стискання	10,5
Потужність двигуна, кВт / частота обертання колінчастого вала, хв ⁻¹	55 / 5000
Крутний момент, Н·м / частота обертання колінчастого вала, хв ⁻¹	126 / 3800
Число впускних / випускних клапанів на циліндр	2 / 2
Система нейтралізації відпрацьованих газів	трикомпонентний каталітичний нейтралізатор
Напруга електричного генератора, В / сила струму, А	14 / 70
Передаточні числа коробки передач	3,455
	2,095
	1,387
	1,025
	0,813
Передаточне число головної передачі	3,882
Радіус кочення колеса, м	0,265

Їздовий цикл (рис. 1) використовується для визначення викидів ШПР і для оцінки паливної економічності легкових автомобілів та вантажних автомобілів малої вантажопідйомності. Це

відповідає об'єкту експериментальних і розрахункових досліджень – автомобілю Scoda Fabia, який відповідно до таблиці 1 відноситься до легкових транспортних засобів категорії M1. Цикл складається з чотирьох елементарних міських циклів протяжністю 4,052 км за час 780 с і максимальною швидкістю 50 км/год та магістрального циклу протяжністю 6,955 км за час 400 с і максимальною швидкістю 120 км/год.



Рисунок 1 – Їздовий цикл згідно Правил ЄЕК ООН № 83-05 [2]

Figure 1 – Driving cycle according to the UNECE Regulations No. 83-05 [2]

Для використання математичної моделі двигуна, обладнаного трикомпонентним нейтралізатором відпрацьованих газів в моделюванні руху автомобіля в циклі потрібно визначити необхідний крутний момент двигуна M_e і частоту обертання колінчастого вала n_d , які забезпечують відповідні швидкість V_a і прискорення j_a автомобіля.

Необхідний крутний момент двигуна визначається із залежності [2, 3], Н·м:

$$M_e = \frac{[M_a \cdot g \cdot \psi + M_a \cdot j_a \cdot (1,04 + 0,04 \cdot U_i^2) + C_x \cdot \rho_n \cdot F \cdot \frac{V_a^2}{2}] \cdot r_d}{U_i \cdot U_0 \cdot \eta_{mp}} \quad (1)$$

де M_a - маса автомобіля з водієм, кг;

g - прискорення вільного падіння, m/c^2 ;

ψ - коефіцієнт дорожнього опору;

j_a - прискорення автомобіля, m/c^2 ;

U_i - передаточне число i -тої передачі коробки передач;

U_0 - передаточне число головної передачі;

C_x - коефіцієнт аеродинамічного опору;

$\rho_n = 1,23$ - густина повітря при нормальному атмосферному тиску і температурі 15 °С, kg/m^3 ;

F - площа фронтального перерізу автомобіля, m^2 ;

V_a - швидкість автомобіля, m/c ;

r_d - динамічний радіус колеса, m ;

η_{mp} - к.к.д. трансмісії.

Частота обертання колінчастого вала, $x\delta^{-1}$:

$$n_{\partial} = \frac{30 \cdot U_i \cdot U_0 \cdot V_a}{\pi \cdot r_{\partial}} \quad (2)$$

З використанням формул (1) і (2) визначено необхідний крутний момент і частоту обертання колінчастого вала двигуна в режимах їздового циклу. Результати розрахунків необхідного крутного моменту і частоти обертання колінчастого вала двигуна та характеристики режимів їздового циклу для міської і магістральної частин наведено в табл. 2 і 3 відповідно.

Таблиця 2 – Характеристика елементарного міського їздового циклу [4]
Table 2 – Characteristics of the elementary urban driving cycle [4]

№ п/п	Назва режиму	Номер передачі коробки передач	V_a , км/год	j_a , м/с ²	M_e , Н·м	n_{∂} , $x\delta^{-1}$	t , с
1	Холостий хід	-	0	0	0	800	11
2	Прискорення	1	0 – 15	1,04	42,8 – 43	800 – 2014	4
3	Постійна швидкість	1	15	0	4,9	2014	8
4	Сповільнення	1	15 – 10	-0,69	-	2014 – 1343	2
5	Сповільнення з виключеним зчепленням	-	10 – 0	-0,92	0	800	3
6	Холостий хід	-	0	0	0	800	21
7	Прискорення	1	0 – 15	0,83	35,2 – 35,3	800 – 2014	5
8	Переключення передачі	-	15	0	0	800	2
9	Прискорення	2	15 – 32	0,94	53,5 – 54,4	1221 – 2606	5
10	Постійна швидкість	2	32	0	8,85	2606	24
11	Сповільнення	2	32 – 10	-0,75	-	2606 – 814	8
12	Сповільнення з виключеним зчепленням	-	10 – 0	-0,92	0	800	3
13	Холостий хід	-	0	0	0	800	21
14	Прискорення	1	0 – 15	0,83	35,2	800 – 2014	5
15	Переключення передачі	-	15	0	0	800	2
16	Прискорення	2	15 – 35	0,62	38,1 – 39,1	1221 – 2850	9
17	Переключення передачі	-	35	0	0	800	2
18	Прискорення	3	35 – 50	0,52	48,6 – 50,6	1887 – 2696	8
19	Постійна швидкість	3	50	0	15,6	2696	12
20	Сповільнення	3	50 – 35	-0,52	-	2696 – 1887	8
21	Постійна швидкість	3	35	0	13,7	1887	13
22	Переключення передачі	-	35	0	0	800	2
23	Сповільнення	2	35 – 10	-0,99	-	2850 – 814	7
24	Сповільнення з виключеним зчепленням	-	10 – 0	-0,92	0	800	3
25	Холостий хід	-	0	0	0	800	7

Алгоритм математичної моделі для дослідження паливної економічності та екологічних показників транспортного засобу під час руху в їздовому циклі розроблений на кафедрі двигунів та теплотехніки.

Даний алгоритм було розроблено на основі алгоритму моделювання руху транспортного засобу в їздовому циклі [5] шляхом врахування параметрів процесів, що відбуваються в каталітичному нейтралізаторі відпрацьованих газів.

Таблиця 3 – Характеристика магістрального їздового циклу [4]
Table 3 – Characteristics of the main driving cycle [4]

№ п/п	Назва режиму	Номер передачі коробки передач	V_a , км/год	j_a , м/с ²	M_e , Н·м	n_d , хв ⁻¹	t , с
1	Холостий хід	-	0	0	0	800	20
2	Прискорення	1	0 – 15	0,83	35,2 – 35,3	800 – 2014	5
3	Переключення передачі	-	15	0	0	800	2
4	Прискорення	2	15 – 35	0,62	38,1 – 39,1	1221 – 2850	9
5	Переключення передачі	-	35	0	0	800	2
6	Прискорення	3	35 – 50	0,52	48,6 – 50,6	1887 – 2696	8
7	Переключення передачі	-	50	0	0	800	2
8	Прискорення	4	50 – 70	0,43	59 – 63,9	1994 – 2792	13
9	Переключення передачі	-	70	0	0	800	2
10	Постійна швидкість	5	70	0	32,9	2212	48
11	Сповільнення	5, 4	70 – 50	-0,69	-	2212 – 1994	8
12	Постійна швидкість	4	50	0	21,1	1994	69
13	Прискорення	4	50 – 70	0,43	59 – 63,9	1994 – 2792	13
14	Переключення передачі	-	70	0	0	800	2
15	Постійна швидкість	5	70	0	32,9	2212	48
16	Прискорення	5	70 – 100	0,24	59,2 – 72,5	2212 – 3160	35
17	Постійна швидкість	5	100	0	46,2	3160	30
18	Прискорення	5	100 – 120	0,28	76,9 – 88,3	3160 – 3792	20
19	Постійна швидкість	5	120	0	57,7	3792	10
20	Сповільнення	5	120 – 80	-0,69	-	3792 – 2528	16
21	Сповільнення	5	80 – 50	-1,04	-	2528 – 1580	8
22	Сповільнення з виключеним зчепленням	-	50 – 0	1,39	0	800	10
23	Холостий хід	-	0	0	0	800	20

В математичну модель встановлюється режим руху ТЗ, який відповідає поточному моменту часу руху за умови $t_i \leq tr_j$ відповідно до послідовності і тривалості режимів руху в їздовому циклі (таблиці 2, 3): зупинка руху, прискорення, перемикавання передачі, постійна швидкість, сповільнення, сповільнення з виключеним зчепленням. Відповідно до цих режимів руху встановлюється один із

чотирьох можливих режимів роботи двигуна: холостий хід, розгін двигуна, усталений режим роботи, гальмування двигуна в режимі примусового холостого ходу.

У разі встановлення режиму холостого ходу двигуна, що відповідає режимам зупинки руху, перемикання передачі та сповільнення з виключеним зчепленням ТЗ, параметри режиму роботи двигуна є наступними:

- частота обертання колінчастого вала, хв.⁻¹:

$$n_{di}^{xx} = f(T_{vi}), \quad (3)$$

- ефективний крутний момент, Нм:

$$M_{ei} = 0. \quad (4)$$

У разі встановлення режиму розгону двигуна, що відповідає режиму прискорення ТЗ, параметри режиму роботи двигуна є наступними:

- частота обертання колінчастого вала, хв.⁻¹:

$$n_{di} = n_{di-1} + \frac{120}{n_{di-1}} \cdot \frac{n_{dpj}^{кінц} - n_{dpj}^{поч}}{\tau_{pj} - \tau_{pj-1}}, \quad (5)$$

де $\frac{120}{n_{di-1}}$ – розрахунковий проміжок часу, що відповідає тривалості одного робочого циклу двигуна при даній частоті обертання, с;

$\frac{n_{dpj}^{кінц} - n_{dpj}^{поч}}{\tau_{pj} - \tau_{pj-1}}$ – лінійна швидкість зміни частоти обертання колінчастого вала двигуна в режимі розгону, хв.⁻¹·с⁻¹;

- ефективний крутний момент, Нм:

$$M_{ei} = M_{ei-1} + \frac{120}{n_{di-1}} \cdot \frac{M_{epj}^{кінц} - M_{epj}^{поч}}{\tau_{pj} - \tau_{pj-1}}, \quad (6)$$

де $\frac{M_{epj}^{кінц} - M_{epj}^{поч}}{\tau_{pj} - \tau_{pj-1}}$ – лінійна швидкість зміни ефективного крутного моменту двигуна в режимі розгону, Н·м·с⁻¹.

У разі встановлення усталеного режиму роботи двигуна, що відповідає режиму руху ТЗ з постійною швидкістю, параметри режиму роботи двигуна є наступними:

- частота обертання колінчастого вала, хв.⁻¹:

$$n_{di} = n_{di-1}, \quad (7)$$

- ефективний крутний момент, Нм:

$$M_{ei} = M_{ei-1}. \quad (8)$$

У разі встановлення режиму гальмування двигуна в режимі примусового холостого ходу, що відповідає режиму сповільнення ТЗ, параметри режиму роботи двигуна є наступними:

- частота обертання колінчастого вала визначається за формулою (5) при підстановці в неї відповідних значень частоти обертання в режимі сповільнення;

- ефективний крутний момент двигуна приймається відповідно до формули (4).

Під час моделювання перехідних режимів роботи двигуна вважається, що при переході від режиму холостого ходу до режиму розгону двигуна буксування зчеплення відсутнє і двигун одразу сприймає повне навантаження з боку зовнішніх сил опору руху автомобіля; при переході від навантаженого режиму до режиму холостого ходу сповільнення двигуна до мінімальної частоти

обертання при даній температурі охолоджуючої рідини в режимі холостого ходу відбувається миттєво. Таке спрощення вбачається достатньо обґрунтованим з огляду на той факт, що практичне збільшення витрати палива в початковій стадії розгону із блокованим зчепленням порівняно із розгоном при буксуючому зчепленні компенсується зменшенням витрати палива в режимі холостого ходу при мінімальній частоті обертання порівняно із витратою в цьому режимі при сповільненні з більшою частотою обертання.

Для визначення екологічних показників ТЗ, здійснюється визначення годинної витрати повітря, $G_{нов,i} = G_{нал,i} \cdot \alpha_i \cdot l_0$, кг/год, а також визначається масова витрата ВГ, $G_{ВГi} = G_{нал,i} + G_{нов,i} + G_{ГННО,i}$, кг/год.

Для визначення ефективності нейтралізатора, яка залежить від його температури, у математичній моделі визначається температура ВГ, $T_{ВГi} = f(n_{di}, \eta_{vi})$, К., також визначається температура каталітичного блоку нейтралізатора $T_{Hi} = f(T_{Hi-1}, G_{ВГi}, n_{di}, T_{ВГi})$, К. На основі цього і проводиться визначення ефективності нейтралізації CO , C_mH_n , NO_x , %, а саме: $(E_{CO_i}, E_{C_mH_n}, E_{NO_x}) = f(\alpha_i, T_{Hi})$.

В залежності від ефективності нейтралізації здійснюється визначення концентрацій CO (%), C_mH_n (млн⁻¹), NO_x (млн⁻¹) після каталітичного нейтралізатора, а саме: $(CO_i^H, C_mH_n^H, NO_x^H) = (CO_i, C_mH_n, NO_x) \cdot (1 - (E_{CO_i}, E_{C_mH_n}, E_{NO_x}) / 100)$. На основі цих концентрацій проводиться визначення масових викидів CO , C_mH_n , NO_x та CO_2 (кг/год), а саме: $(G_{CO_i}, G_{C_mH_n}, G_{NO_x}, G_{CO_2}) = f(G_{нал,i}, G_{нов,i}, G_{ГННО,i}, CO_i^H, C_mH_n^H, NO_x^H, CO_2)$.

Висновок. На сьогодні у світі є різні нормативні їздові цикли, що розроблені на основі реального руху транспортних засобів. Ці їздові цикли використовуються для випробування автомобілів на паливну економічність і токсичність відпрацьованих газів.

Проведення експериментальних досліджень натурних зразків з їздовими циклами при дослідженні транспортних засобів з метою вибору найбільш раціональних параметрів є трудомісткою роботою і потребує великої кількості матеріальних затрат та часу роботи. Тому розробляються математичні моделі руху транспортного засобу за їздовими циклами за допомогою комп'ютерного моделювання. Такий підхід дозволяє оперативно оцінити паливну економічність транспортного засобу при зміні певних параметрів, виконати обґрунтування різних конструктивних параметрів, скоротивши час створення нової моделі, так і витрати на виконання експериментальних стендових і дорожніх випробувань.

Уточнена математична модель дозволяє провести оцінювання ефективності експлуатації транспортного засобу, оснащеного трикомпонентним каталітичним нейтралізатором відпрацьованих газів, на основі аналізу поточних і сумарних значень показників витрати палива і викидів шкідливих речовин транспортним засобом при його русі в їздовому циклі з урахуванням прогріву нейтралізатора.

Перелік посилань

1. Аналіз особливостей сучасних їздових циклів, що застосовуються для нормування токсичності відпрацьованих газів і оцінки паливної економічності автомобілів / М.Є. Якунін, О.Ю. Ребров, В.А. Насальський, Н.Б. Трофимова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХП», 2017. – № 14 (1236). – С. 98–103.
2. Матейчик В.П. Методи оцінювання та способи підвищення екологічної безпеки дорожніх транспортних засобів: монографія / В.П. Матейчик. – К.: НТУ, 2006. – 216 с.
3. Садовник І.І. поліпшення паливної економічності та екологічних показників автомобіля з бензиновим двигуном додаванням водневмісного газу з використанням рекуперативної петлової енергії: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Садовник Іван Іванович. – К., 2021. – 224 с.
4. Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки: навч. посібн. / М.Ф. Дмитриченко, В.П. Матейчик, О.К. Гришук, М.П. Цюман. – К.: НТУ, 2014. – 168 с.
5. Gritsuk, I., Volkov, V., Mateichyk, V., Gutarevych, Y. et al., "The Evaluation of Vehicle Fuel Consumption and Harmful Emission Using the Heating System in a Driving Cycle," SAE Int. J. Fuels Lubr. 10(1):236-248, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-26-0364>.

SPECIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF VEHICLE MOTION IN THE DRIVING CYCLE TAKING INTO ACCOUNT THE HEATING OF THE CATALYTIC NEUTRALIZER

Dobrovolskiy Oleksandr S., Ph.D., associate professor, National Transport University, professor of Department of Engines and Heating Engineering, e-mail: dobrovolskiy@ukr.net, tel.+380632977210, <https://orcid.org/0000-0003-0048-1388>

Sadovnyk Ivan D., graduate student of the Department of Engines and Heat Engineering, National Transport University, e-mail: toyota-kiev@ukr.net, tel. +38067-925-99-53, <https://orcid.org/0009-0009-4366-6236>

Abstract. The driving cycle is a set of regulated modes of movement of motor vehicles. The standardized driving cycle is determined by an average statistical analysis of the nature of the car's movement in specific operating conditions. Driving cycles are created to evaluate the efficiency of the car in specific operating conditions. Parameters and control modes of car systems are chosen according to the consequences of the driving cycle. Cycle phase indicators, i.e. time, maximum speed, average speed, maximum acceleration/deceleration and average acceleration/deceleration are different in different cycles. The mode of movement is determined mainly by the speed and its change according to the elements of the driving cycle: acceleration, steady motion, deceleration, braking, stopping, recovery of motion. Determining the energy, economic and environmental indicators of the car in the modes of the driving cycle is possible with the help of a mathematical model that describes these modes. It is known that the driving modes of the car in the urban cycle have an unstable character. During the change of the car's operating modes, there is a constant change in fuel consumption and emissions of harmful substances. Most emissions of harmful substances enter the environment during engine warm-up, therefore it is important to reduce the engine warm-up time and speed up the catalytic converter warm-up. The article is devoted to the refinement of the mathematical model of the car's movement in the driving cycle, taking into account the heating of the catalytic converter.

Keywords. Internal combustion engine, vehicle, driving cycle, mathematical model, emissions of harmful substances, fuel economy, operating modes, catalytic neutralization.

References

1. Analysis of the features of modern driving cycles used to regulate the toxicity of exhaust gases and assess the fuel efficiency of cars / M.E. Yakunin, O.Yu. Rebrov, V.A. Nasalskyi, N.B. Trofymova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Transport engineering. - Kh.: NTU "KhPI", 2017. - No. 14 (1236). – pp. 98–103.
2. Mateichyk V.P. Assessment methods and ways to improve the environmental safety of road vehicles: monograph / V.P. Mateychyk - K.: NTU, 2006. - 216 p.
3. Sadovnik I.I. improvement of fuel efficiency and environmental performance of a car with a gasoline engine by adding hydrogen-containing gas using regenerative loop energy: thesis. ... candidate technical Sciences: 05.22.20 / Sadovnik Ivan Ivanovich. - K., 2021. - 224 p.
4. Methods of system analysis of the properties of automotive equipment: training. manual / M.F. Dmytrychenko, V.P. Mateychyk, O.K. Hryshchuk, M.P. Tyuman. - K.: NTU, 2014. - 168 p.
5. Gritsuk, I., Volkov, V., Mateichyk, V., Gutarevych, Y. et al., "The Evaluation of Vehicle Fuel Consumption and Harmful Emission Using the Heating System in a Driving Cycle," SAE Int. J. Fuels Lubr. 10(1):236-248, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-26-0364>.

Дата надходження до редакції 17.03.2024.