

ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ «ДВИГУН – СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ СУМІШШЮ ДИЗЕЛЬНОГО ТА БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВ»

¹Вінницький національний технічний університет

²Вінницький національний аграрний університет

В статті наведені результати перевірки адекватності математичної моделі системи «Двигун–система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив», для цього було проведено експериментальне дослідження. Порівнюючи дані, отримані експериментальним та розрахунковим шляхами, перевірялась адекватність математичної моделі. Також, за допомогою критерію Фішера, перевірялась достовірність аналітичних залежностей, отриманих з результатів експериментальних досліджень шляхом апроксимації даних.

ВСТУП

На сьогоднішній день більшість наукових досліджень проводяться не на реальних об'єктах, а за допомогою математичних моделей, якими описують ці об'єкти, із заданою вірогідністю і точністю [1]. Експериментальне дослідження потребує значних матеріальних затрат та часу, тому воно проводиться переважно для отримання вихідних даних, які використовуються для визначення коефіцієнтів апроксимування виразів математичної моделі. Далі дослідження проводяться за допомогою математичної моделі.

Для проведення розрахункових досліджень впливу використання біодизельного палива на показники дизеля авторами [2–5] були створені математичні моделі. Але в них не передбачено можливості зміни відсоткового складу суміші дизельного та біодизельного палив в процесі роботи дизеля.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Математична модель системи «Двигун–система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив» [6] була розроблена для дослідження впливу на робочі процеси та показники дизеля зміни умов його експлуатації та відсоткового складу суміші палив, при цьому відсотковий склад суміші палив може бути постійним або змінюватись в процесі роботи дизеля. До математичної моделі входять диференціальні та алгебраїчні рівняння і нерівності, якими описані статичні характеристики дизеля. Частина алгебраїчних рівнянь отримано при апроксимації даних, отриманих експериментальним шляхом, достовірність яких потрібно перевірити. Перевірка відбувається за допомогою критерію Фішера.

При проведенні експериментальних досліджень роботи дизеля на дизельному і біодизельному паливах та їх сумішах були отримані навантажувальні характеристики та дані по димності відпрацьованих газів дизеля. Результати експериментальних досліджень апроксимовані аналітичними залежностями, які використовуються в математичній моделі системи «Двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив». Постійні коефіцієнти поліномів аналітичних залежностей визначалися на ЕОМ за допомогою програмного пакета Statistica 10 та набули такого виду:

– ефективний крутний момент M_e апроксимований залежністю, яка є функцією трьох аргументів: циклової подачі q_u , частоти обертання колінчастого вала n_∂ і вмісту біодизельного палива в суміші $n_{БП}$,

$$\begin{aligned}
 M_e = & (387,2063 - 0,9419 \cdot n_\partial + 4,15 \cdot 10^{-4} \cdot n_\partial^2) + (-292,03 + 0,49 \cdot n_\partial - 1,9186 \cdot 10^{-4} \cdot n_\partial^2) \cdot n_{БП} + \\
 & + (-6,9161 + 0,0298 \cdot n_\partial - 1,5744 \cdot 10^{-5} \cdot n_\partial^2) \cdot q_u + (300 - 0,56577 \cdot n_\partial + 2,3794 \cdot 10^{-4} \cdot n_\partial^2) \cdot n_{БП}^2 + \\
 & + (1,24 - 2,3345 \cdot 10^{-3} \cdot n_\partial + 6,5476 \cdot 10^{-7} \cdot n_\partial^2) \cdot n_{БП} \cdot q_u + (-0,0264 - 4,8803 \cdot 10^{-5} \cdot n_\partial + \\
 & + 5,9045 \cdot 10^{-8} \cdot n_\partial^2) \cdot q_u^2;
 \end{aligned} \tag{1}$$

– момент механічних втрат M_{mex} апроксимований залежністю, яка є функцією частоти обертання колінчастого вала n_{∂} ,

$$M_{mex} = 48,238 + 0,969 \cdot n_{\partial}; \quad (2)$$

– циклова подача палива $q_{ц}$ апроксимована залежністю, яка є функцією частоти обертання колінчастого вала n_{∂} та положення важеля подачі палива ψ_{nn} ,

$$q_{ц} = -16,8907 + 17,3741 \cdot \psi_{nn} + 0,0223 \cdot n_{\partial} + 87,1451 \cdot \psi_{nn}^2 - \\ - 0,009 \cdot \psi_{nn} \cdot n_{\partial} - 2,3816 \cdot 10^{-6} \cdot n_{\partial}^2; \quad (3)$$

– димність відпрацьованих газів C_c апроксимована залежністю, яка є функцією трьох аргументів: ефективної потужності дизеля N_e , частоти обертання колінчастого вала n_{∂} і вмісту біодизельного палива в суміші $n_{БП}$,

$$C_c = 0,0474 - 0,0016 \cdot N_e - 0,0009 \cdot n_{БП} + 0,0003 \cdot N_e^2 - \\ - 2,332 \cdot 10^{-6} \cdot N_e \cdot n_{БП} + 7,22 \cdot 10^{-6} \cdot n_{БП}^2. \quad (4)$$

Для перевірки достовірності результатів розрахункових досліджень необхідно перевірити адекватність аналітичних залежностей, які використовуються в математичній моделі, та адекватність самої математичної моделі.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Апроксимація – це наближений опис однією функцією заданого ряду даних. Тому виникає необхідність в перевірці адекватності аналітичних залежностей, якими були апроксимовані дані, отримані в результаті експериментальних досліджень. Перевірка адекватності аналітичних залежностей здійснювалась за допомогою критерію Фішера (F) [7]:

$$F_{роз} < F_{таб}, \quad (5)$$

де $F_{роз}$ – розрахункове значення критерію Фішера; $F_{таб}$ – табличне значення критерію Фішера [8].

Критерій Фішера розраховується за формулою

$$F_{роз} = \frac{S_{ад}^2}{S_o^2}, \quad (6)$$

де $S_{ад}$ – дисперсія адекватності; S_o – дисперсія відтворюваності.

Дисперсія адекватності являє собою відношення суми квадратів різниць між розрахованими за аналітичними залежностями і експериментально отриманими значеннями та числа ступенів вільності

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i\text{ роз}} - Y_{i\text{ експ}})^2}{f_{ад}}, \quad (7)$$

де N – число дослідів; $Y_{i\text{ роз}}$ – значення, що розраховані за аналітичними залежностями в i -му досліді; $Y_{i\text{ експ}}$ – значення, отримані з експериментального дослідження в i -му досліді; $f_{ад}$ – число ступенів вільності.

Для визначення числа ступенів вільності використовується формула

$$f_{ad} = N - k, \quad (8)$$

де k – число коефіцієнтів апроксимації.

Дисперсія відтворюваності

$$S_o^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y} - Y_i)^2}{n - 1}, \quad (9)$$

де \bar{Y} – середнє значення параметрів, отриманих з експериментального дослідження в одній з точок залежності; Y_i – значення параметрів, отриманих з експериментального дослідження в одній з точок залежності; n – число дослідів в одній з точок залежності.

В табл. 1 наведені результати перевірки адекватності аналітичних залежностей, за якими визначаються ефективний крутний момент, циклова подача та димність відпрацьованих газів дизеля при його роботі на дизельному, біодизельному паливах та їх сумішах.

Таблиця 1 – Результати перевірки адекватності аналітичних залежностей за критерієм Фішера

Параметр	S_{ad}^2	S_o^2	$F_{роз}$	$F_{таб}$
M_e	24,3	12,7	1,9	2,2
q_u	18,4	17,5	1,05	2,31
C_c	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	0,95	2,79

В результаті проведення розрахунків отримано значення F -критерію, які знаходяться в допустимих межах, що підтверджує адекватність аналітичних залежностей.

Для перевірки адекватності математичної моделі «Двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив» було проведено експериментальне дослідження розгону і сповільнення колінчастого вала дизеля при роботі на дизельному та біодизельному паливах. Порівнюючи дані, отримані експериментальним та розрахунковим шляхами, перевірялась адекватність математичної моделі. Експериментальне дослідження проводилось на дизелі СМД–15Э (рис. 1) [9].



Рисунок 1 – Установка для проведення експериментальних досліджень

На двигуні СМД–15Э № 250452 1992 року випуску, встановлено паливний насос високого тиску ЛСТНМ 410010 ВЕСМ8016001 № 5884461, секційний чотириплунжерний з відцентровим

всерезимним механічним регулятором частоти обертання, який обмежує частоту обертання колінчастого вала дизеля на рівні 1560 об/хв.

Основним завданням планування експериментальних досліджень є визначення необхідного об'єму вибірки, який значною мірою впливає на точність результатів при статистичному дослідженні.

Об'єм вибірки n визначається за формулою [8]

$$n = \frac{\gamma^2}{\Delta_a^2} z_{1-\alpha/2}^2, \quad (10)$$

де γ – коефіцієнт варіації; Δ_a – максимальна відносна помилка при оцінці середнього значення; $z_{1-\alpha/2}$ – квантиль рівня $P=1-\alpha/2$ нормованої нормально розподіленої випадкової величини; $P=1-\alpha/2$ – статистична надійність, що представляє собою ймовірність неперевищення фактичною помилкою, при оцінці середнього значення характеристики максимальних помилок Δ_a (за модулем).

Генеральний коефіцієнт варіації γ є невідомою величиною, тому при визначенні об'єму вибірки, його заміняють вибірковим коефіцієнтом варіації v . При середній точності дослідження максимальну відносну помилку Δ_a беремо рівною $0,5 \cdot v$. Тоді формула визначення об'єму вибірки зміниться на таку:

$$n = \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{0,25}. \quad (11)$$

Розрахуємо об'єм вибірки, який забезпечить ймовірність неперевищення фактичної помилки $P=0,95$, квантиль рівня $z_{1-\alpha/2}^2 = 1,645$ [10]:

$$n = \frac{1,654}{0,25} = 6,61 \approx 7.$$

Отже, при заданих умовах точності необхідно провести не менше семи експериментальних досліджень для кожного з показників.

Після проведення експериментальних досліджень за результатами багаторазових прямих вимірювань обчислювалося середнє арифметичне значення вимірюваної величини \bar{x}

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (12)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – результати окремих вимірювань.

Випадкова похибка оцінювалась за середньоквадратичним відхиленням результатів вимірювань S_x

$$S_x = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (13)$$

Коефіцієнт варіації середньої квадратичної похибки W_x визначається за формулою

$$W_x = \pm \frac{S_x}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (14)$$

Середньоарифметична похибка $S_{\bar{x}}$ показує, з якою точністю отримано середнє арифметичне значення вимірюваної величини і обчислювалась за формулою

$$S_{\bar{x}} = \pm \frac{S_x}{\sqrt{n}} \cdot t, \quad (15)$$

де t – коефіцієнт Стюдента, що враховує вплив числа вимірювань на точність одержуваного результату, який визначається з таблиць.

Коефіцієнт варіації середньоарифметичних похибок

$$W_{\bar{x}} = \pm \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (16)$$

При дослідженнях бралася довірча ймовірність 0,95.

Результати експериментальних досліджень розгону дизеля при роботі на дизельному паливі наведені в табл. 2, на біодизельному паливі – в табл. 3, сповільнення дизеля – в табл. 4. З наведених таблиць видно, що точність проведення експериментальних досліджень достатня для забезпечення достовірності отриманих результатів.

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень розгону дизеля при роботі на дизельному паливі

Параметр	Частота обертання колінчастого вала, об/хв							
	600	700	900	1100	1300	1500	1560 (max)	
	Час, с							
Номер дослід	1	0	1	1,85	2,48	3,03	3,63	3,8
	2	0	1,1	1,98	2,52	3,15	3,65	3,73
	3	0	1,1	1,92	2,48	2,98	3,54	3,81
	4	0	1,2	2,07	3,64	3,21	3,69	3,8
	5	0	1,3	2,1	2,67	3,2	3,67	3,78
	6	0	1,15	1,98	2,52	3,14	3,72	3,9
	7	0	1,1	1,92	2,48	3,06	3,62	3,77
\bar{x}	0	1,14	1,97	2,54	3,11	3,65	3,8	
S_x	–	± 0,087	± 0,081	± 0,074	± 0,081	± 0,054	± 0,048	
W_x	–	± 7,7 %	± 4,1 %	± 2,9 %	± 2,6 %	± 1,5 %	± 1,3 %	
$S_{\bar{x}}$	–	± 0,087	± 0,075	± 0,068	± 0,0753	± 0,0496	± 0,045	
$W_{\bar{x}}$	–	± 7,7 %	± 3,8 %	± 2,7 %	± 2,4 %	± 1,4 %	± 1,2 %	

Таблиця 3 – Результати експериментальних досліджень розгону дизеля при роботі на біодизельному паливі

Параметр	Частота обертання колінчастого вала, об/хв							
	600	700	900	1100	1300	1500	1560 (max)	
	Час, с							
Номер дослід	1	0	1,05	2,1	2,78	3,35	4	4,3
	2	0	1,05	2,05	2,75	3,25	3,95	4
	3	0	1	2,1	2,7	3,23	3,8	4,2
	4	0	1,05	2,15	2,83	3,35	3,9	4,3
	5	0	1,162	2,32	3,05	3,55	3,9	4,3
	6	0	1,14	1,95	2,65	3,25	3,6	4
	7	0	1,1	2,1	2,85	3,35	3,95	4,3
\bar{x}	0	1,08	2,11	2,80	3,33	3,87	4,2	
S_x	–	± 0,053	± 0,103	± 0,12	± 0,101	± 0,125	± 0,13	
W_x	–	± 4,9 %	± 4,9 %	± 4,3 %	± 3,1 %	± 3,2 %	± 3,1 %	
$S_{\bar{x}}$	–	± 0,049	± 0,096	± 0,111	± 0,094	± 0,115	± 0,121	
$W_{\bar{x}}$	–	± 4,6 %	± 4,5 %	± 4,0 %	± 2,8 %	± 3,0 %	± 2,9 %	

Таблиця 4 – Результати експериментальних досліджень при сповільненні дизеля

Параметр	Частота обертання колінчастого вала, об/хв							
	1560 (max)	1500	1300	1100	900	700	600	
Час, с								
Номер досліду	1	0	0,475	1,85	3,3	4,88	6,5	7,8
	2	0	0,45	2,05	3,4	4,88	6,25	7,5
	3	0	0,5	2	3,65	5,4	6,9	8
	4	0	0,4	2,1	3,57	5,33	7	8,76
	5	0	0,4	1,8	3,1	5,2	7	8,35
	6	0	0,46	1,81	3,4	5	6,8	8
	7	0	0,46	1,8	3,4	4,8	6,8	7,7
\bar{x}	0	0,44	1,81	3,3	5,07	7,07	8,2	
S_x	–	0,034	0,138	0,165	0,244	0,258	0,392	
W_x	–	± 7,7 %	± 7,3 %	± 4,9 %	± 4,8 %	± 3,8 %	± 4,9 %	
$S_{\bar{x}}$	–	± 0,032	± 0,128	± 0,153	± 0,226	± 0,238	± 0,363	
$W_{\bar{x}}$	–	± 4,9 %	± 4,8 %	± 4,5 %	± 4,5 %	± 3,5 %	± 4,5 %	

Завершенням математичної обробки результатів експериментального дослідження є перевірка адекватності математичної моделі системи «Двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив», яка проводиться шляхом порівняння розрахованих та експериментальних даних. За допомогою математичної моделі було розраховано час розгону колінчастого вала дизеля з частоти обертання, яка відповідає холостому ходу, до частоти, яку обмежує регулятор. У математичній моделі використовувалися наведені вище апроксимуючі рівняння. Результати розрахункового дослідження часу розгону та сповільнення колінчастого вала дизеля СМД–15Э, що працює на дизельному та біодизельному паливах, наведено в табл. 5–7. На рис. 3 наведені графіки розгону колінчастого вала дизеля при роботі на дизельному та біодизельному паливах, на рис. 4 – графік сповільнення колінчастого вала дизеля. Відхилення ε між даними розгону та сповільнення колінчастого вала дизеля, отриманих розрахунковим та експериментальним шляхами, наведені в табл. 5–7 і визначаються за формулами:

$$\varepsilon_{розДП} = \frac{t_{розДП_m} - t_{розДП_e}}{t_{розДП_m}} \cdot 100\%, \quad (17)$$

$$\varepsilon_{розБП} = \frac{t_{розБП_m} - t_{розБП_e}}{t_{розБП_m}} \cdot 100\%, \quad (18)$$

$$\varepsilon_{сн} = \frac{t_{сн_m} - t_{сн_e}}{t_{сн_m}} \cdot 100\%. \quad (19)$$

де $t_{розДП_m}$ і $t_{розДП_e}$ – час розгону дизеля на дизельному паливі теоретично розрахований та отриманий експериментальним шляхом, відповідно; $t_{розБП_m}$ і $t_{розБП_e}$ – час розгону дизеля на біодизельному паливі теоретично розрахований та отриманий експериментальним шляхом, відповідно; $t_{сн_m}$ і $t_{сн_e}$ – час сповільнення дизеля теоретично розрахований та отриманий експериментальним шляхом, відповідно.

Таблиця 5 – Результати розрахунку часу розгону дизеля СМД–15Э при роботі на дизельному паливі

Параметр	Частота обертання колінчастого вала, об/хв					
	700	900	1100	1300	1500	1560 (max)
Час отриманий експериментальним шляхом $t_{розДП_e}$, с	1,14	1,97	2,54	3,11	3,65	3,8
Час отриманий розрахунковим шляхом $t_{розДП_m}$, с	1,18	2,03	2,64	3,16	3,65	3,7
Відхилення ε , %	1,15	1,54	2,83	1,19	0,06	2,48
Середньоквадратичне відхиленням S_{ε} , %	0,93					

Таблиця 6 – Результати розрахунку часу розгону дизеля СМД–15Э при роботі на біодизельному паливі

Параметр	Частота обертання колінчастого вала, об/хв					
	700	900	1100	1300	1500	1560 (max)
Час отриманий експериментальним шляхом $t_{розБП\ e}$, с	1,08	2,11	2,80	3,34	3,87	4,2
Час отриманий розрахунковим шляхом $t_{розБП\ m}$, с	1,12	2,2	2,83	3,5	4,02	4,3
Відхилення ε , %	3,81	4,27	1,02	5,00	3,84	2,38
Середньоквадратичне відхиленням S_ε , %	1,31					

Таблиця 7 – Результати розрахунку часу сповільнення дизеля СМД–15Э

Параметр	Частота обертання колінчастого вала, об/хв					
	1500	1300	1100	900	700	600
Час отриманий експериментальним шляхом $t_{cn\ e}$, с	0,45	1,90	3,40	5,03	6,75	8,02
Час отриманий розрахунковим шляхом $t_{cn\ m}$, с	0,44	1,81	3,3	5,07	7,07	8,2
Відхилення ε , %	2,07	4,81	3,02	0,74	4,74	2,30
Середньоквадратичне відхиленням S_ε , %	1,46					

Середнє арифметичне значення відхилень між розрахунковими та експериментальними результатами

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n}, \quad (20)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ – відхилення між значеннями отриманими розрахунковим та експериментальним шляхами на різних частотах обертання колінчастого вала дизеля.

Середньоквадратичне відхиленням між розрахунковими та експериментальними результатами S_ε

$$S_\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (21)$$

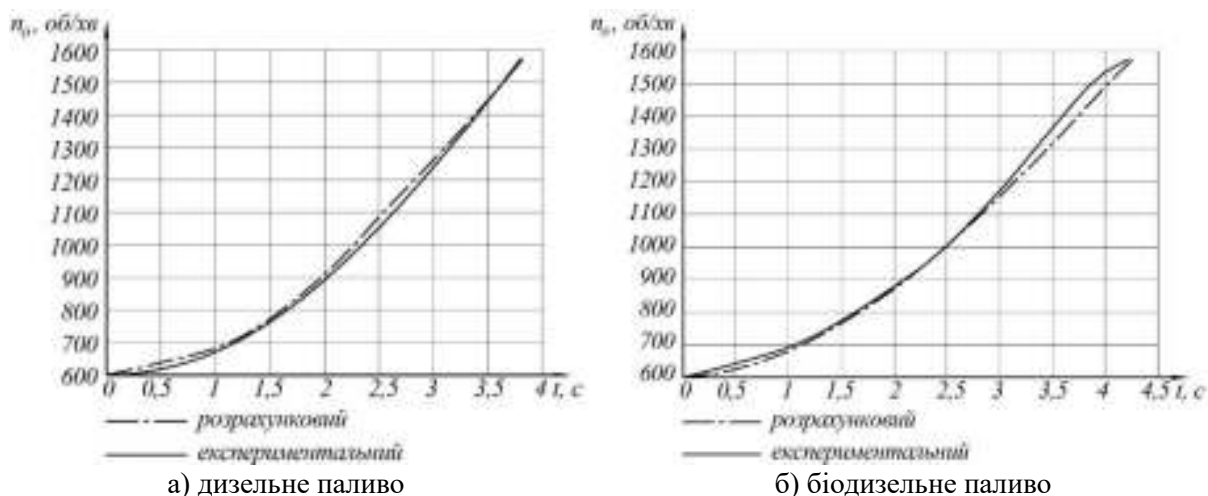


Рисунок 3 – Графік розгону колінчастого вала дизеля

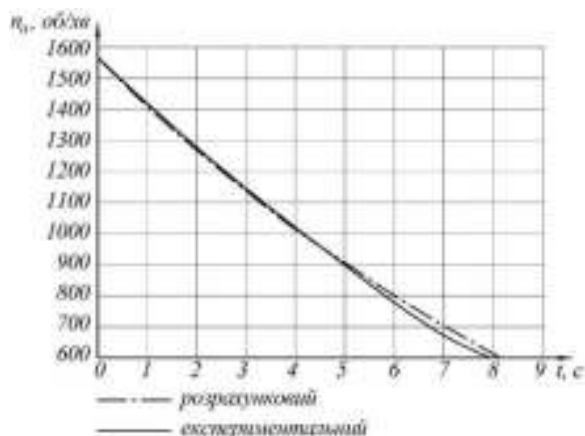


Рисунок 4 – Графік сповільнення колінчастого вала дизеля

Отже, відхилення між розрахунковими та отриманими експериментальним шляхом значеннями часу розгону колінчастого вала дизеля при роботі на дизельному паливі складає до 2,8 %, на біодизельному паливі до 5 %; відхилення часу сповільнення складає до 4,8 %. Середньоквадратичні відхилення: 0,93 %, 1,31 % та 1,46 % відповідно. Це підтверджує адекватність математичної моделі системи «Двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив».

ВИСНОВКИ

Використовуючи F -критерій Фішера, підтверджено адекватність аналітичних залежностей, які використовуються в математичній моделі. Також шляхом порівняння даних сповільнення та розгону колінчастого вала дизеля, отриманих експериментальним та розрахунковим шляхами, підтверджено адекватність математичної моделі системи «Двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив». Абсолютні значення відхилень не перевищують 5 %, а середньоквадратичне – 1,5 %. Отже така математична модель може використовуватись при проведенні розрахункових досліджень показників дизеля за різних умов експлуатації при використанні біодизельного палива та його суміші з дизельним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Барабашук В. И. Планирование эксперимента в технике / В. И. Барабашук, Б. П. Креденцер, В. И. Мирошниченко. – К. : Техніка, 1984. – 198 с.
2. Тарлаков Я.В. Эксплуатационные показатели дизельных электростанций лесного комплекса при работе на биотопливе: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Я. В. Тарлаков. – М, 2013. – 16 с.
3. Осетров О. О. Поліпшення техніко-економічних показників дизеля ЧН 12/14, що працює на біопаливах : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» / О. О. Осетров. – Харків, 2015. – 20 с.
4. Шльончак А. І. Покращення економічних та екологічних показників транспортних засобів з дизелем шляхом використання сумішевих палив : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.20 / І. А. Шльончак ; Нац. трансп. ун-т. – К., 2013. – 20 с.
5. Ковбасенко С. В. Результати розрахунків на математичній моделі руху автобуса під час роботи на традиційному нафтовому паливі та дизельному біопаливі / С. В. Ковбасенко, В. В. Сімоненко, С. Ю. Гутаревич // Науково-виробничий журнал. – 2015. – № 1–2 (243-244). – С. 3–5.
6. Поляков А. П. Математична модель системи «Двигун–система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив» / А. П. Поляков, О. О. Галушак // НАУКОВІ НОТАТКИ : міжвузівський збірник. – Луцьк, 2014. – №45. – С. 438–443.
7. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
8. Володарский Е. Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е. Т. Володарский, Б. Н. Малиновский, Ю. М. Туз. – К. : Вища школа, 1987. – 280 с.
9. Поляков А. П. Використання динамічного регулювання відсоткового складу суміші палив на дизелях транспортних засобів : монографія / А. П. Поляков, О. О. Галушак, Д. О. Галушак. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 92 с.

10. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник / М. Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.

REFERENCES

1. Barabashhuk V.Y., Kredencer B.P., My'roshny'chenko V.Y'. Plany'rovany'e ekspery'menta v texny'ke. - K.: Texnika, 1984. - 198 s.
2. Tarlakov Ya.V. Ekspluatatsy'onnye pokazately' dy'zel'ny'x elektrostancy'j lesnogo kompleksa pry' rabote na by'otoply've: avtoref. dy's. na zdobuttya nauk. stupenya kand. texn. nauk : specz. 05.21.01 «Texnologiya y' mashy'nylesozagotovok y' lesnogo xozyajstva» / Ya. V. Tarlakov. – M, 2013. – 16 s.
3. Osetrov O.O. Polipshennya texniko-ekonomichny'x pokazny'kiv dy'zelya ChN 12/14, shho pracyuye na biopaly'vax: avtoref. dy's. na zdobuttya nauk. stupenya kand. texn. nauk : specz. 05.05.03 «Dvy'guny' ta energety'chni ustanovky'» / O. O. Osetrov. – Xarkiv, 2015. – 20 s.
4. Shl'onchak A.I. Pokrashhennya ekonomichny'x ta ekologichny'x pokazny'kiv transportny'x zasobiv z dy'zelem shlyaxom vy'kory'stannya sumishevy'x paly'v: avtoref. dy's. kand. texn. nauk : 05.22.20 / I. A. Shl'onchak: Nacz. transp. un-t. – K., 2013. – 20 c.
5. Kovbasenko S.V. Rezul'taty' rozrakhunkiv na matematy'chnij modeli ruxu avtobusa pid chas roboty' na trady'cijnomu naftovomu paly'vi ta dy'zel'nomu biopaly'vi / S.V. Kovbasenko, V.V. Simonenko, S.Yu. Gutarevy'ch. – Naukovo-vy'robn'y'chy'j zhurnal # 1-2 (243-244) sichen' – kviten', 2015 r. – 3-5 s.
6. Polyakov A. P. Matematy'chna model' sy'stemy' «Dvy'gun – sy'stema zhy'vlennya sumishshyu dy'zel'nogo ta biody'zel'nogo paly'v» / A.P. Polyakov, O.O. Galushhak // Mizhvuzivs'ky'j zbirny'k "NAUKOVI NOTATKY" Lucz'k, 2014. Vy'pusk #45. - S. 438-443.
7. Adler Yu. P. Plany'rovany'e ekspery'menta pry' poy'ske opy'tal'ny'x uslovy'j / Yu. P. Adler, E. V. Markova, Yu. V. Granovsky'j. – M. : Nauka, 1976. – 279 s.
8. Volodarsky'j E. T. Plany'rovany'e y' organy'zacy'ya y'zmy'el'nogo ekspery'menta / E. T. Volodarsky'j, B. N. Mal'novsky'j, Yu. M. Tuz. – K. : Vy'shha shkola, 1987. – 280 s.
9. Polyakov, A. P. Vy'kory'stannya dy'namicnogo regulyvannya vidsotkovogo skladu sumishi paly'v na dy'zelyax transportny'x zasobiv : monografiya / A. P. Polyakov, O. O. Galushhak, D. O. Galushhak. – Vinny'cya : VNTU, 2015. – 92 s.
10. Stepnov M.N. Staty'sty'chesky'e metody obrabotky' rezul'tatov mexany'chesky'x y'spytany'j: Spravochny'k. / M.N. Stepnov. – M.: Mashy'nostroeny'e, 1985. – 232 s.

А. П. Поляков¹, О. О. Галушак², Д.О. Галушак¹

ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ «ДВИГУН – СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ СУМІШШЮ ДИЗЕЛЬНОГО ТА БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВ»

¹Вінницький національний технічний університет

²Вінницький національний аграрний університет

В статті наведені результати перевірки адекватності математичної моделі системи «Двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив», для цього було проведено експериментальне дослідження розгону і сповільнення колінчастого вала дизеля при роботі на дизельному та біодизельному паливах. Для дослідження розраховано об'єм вибірки, який забезпечить ймовірність неперевищення фактичної помилки $P = 0,95$.

За результатами експериментальних досліджень розгону дизеля при роботі на дизельному паливі підтверджено, що точність проведення експериментальних досліджень достатня для забезпечення достовірності отриманих результатів.

Завершенням математичної обробки результатів експериментального дослідження є перевірка адекватності математичної моделі системи «Двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив», яка проводилась шляхом порівняння розрахованих та експериментальних даних. За допомогою математичної моделі було розраховано час розгону колінчастого вала дизеля з частоти обертання, яка відповідає холостому ходу, до частоти, яку обмежує регулятор.

Використовуючи F-критерій Фішера, підтверджено адекватність аналітичних залежностей, які використовуються в математичній моделі. Також шляхом порівняння даних сповільнення та розгону

колінчастого вала дизеля, отриманих експериментальним та розрахунковим шляхами, підтверджено адекватність математичної моделі системи «Двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив».

Ключові слова: біодизельне паливо, дизельне паливо, суміш, адекватність математичної моделі, критерій Фішера.

Поляков Андрій Павлович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілів і транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: farv@inmt.vntu.edu.ua.

Галушчак Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри двигунів внутрішнього згорання та альтернативних паливних ресурсів, Вінницький національний аграрний університет, e-mail: Galushchak.gs@gmail.com

Галушчак Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобілів і транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: galuschak.d@gmail.com

A. Poliakov¹, O. Galushchak², D. Galushchak¹

CHECKING OF THE ADEQUACY MATHEMATICAL MODEL OF THE "ENGINE - SUPPLY SYSTEM OF MIXTURE DIESEL AND BIODIESEL"

¹Vinnitsia National Technical University

²Vinnitsia National Agrarian University

In this article we present the results verification of adequacy the mathematical model of the system "Engine - a mixture supply system of diesel and biodiesel fuels", for which an experimental study of acceleration and deceleration of the crankshaft of a diesel engine was performed with diesel and biodiesel fuels. For the study, the sample size is calculated, which ensures the probability of not exceeding the actual error $P = 0,95$.

According to the results of experimental studies of dispersal of diesel using diesel fuel, it was confirmed that the accuracy of conducting experimental research is sufficient to ensure the reliability of the results.

Completion of the mathematical processing of the results of experimental research is the verification of adequacy the mathematical model of the system "Engine - a mixture supply system of diesel and biodiesel fuels", which was conducted by comparing calculated and experimental data. Using a mathematical model, the time of acceleration of the crankshaft of the diesel engine from the minimal rotational speed to maximal one, was calculated.

Using Fisher's F criterion, the adequacy of the analytic dependencies used in the mathematical model is confirmed. Also, by comparing the data of deceleration and acceleration of the crankshaft of diesel, obtained by experiment and calculation, the adequacy of the mathematical model of the system "Engine - a mixture supply system of diesel and biodiesel fuels" has been confirmed.

Key words: biodiesel, diesel fuel, mixture, adequacy of mathematical models, Fisher criterion.

Poliakov Andrii, Dr. Sc. (Egn.), Professor, Professor of the Chair of Automobiles and Transport Management of Vinnitsia National Technical University, e-mail: farv@inmt.vntu.edu.ua

Galushchak Oleksandr, PhD, Senior Lecturer of the Chair of Internal Combustion Engine and Alternative Fuel Resources, Vinnitsia National Agrarian University, e-mail: Galushchak.gs@gmail.com

Galushchak Dmytro, PhD, Senior Lecturer of the Chair of Automobile and Transport Management, Vinnitsia National Technical University, e-mail: galuschak.d@gmail.com

**ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ
«ДВИГАТЕЛЬ – СИСТЕМА ПИТАНИЯ СМЕСЬЮ ДИЗЕЛЬНОГО И
БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА»**

¹Винницкий национальный технический университет

²Винницкий национальный аграрный университет

В данной статье приведены результаты проверки адекватности математической модели системы «Двигатель – система питания смесью дизельного и биодизельного топлива», для этого было проведено экспериментальное исследование разгона и замедления коленчатого вала дизеля при работе на дизельном и биодизельном топливе. Для исследования рассчитан объем выборки, который обеспечит вероятность неперевышения фактической ошибки $P = 0,95$.

По результатам экспериментальных исследований разгона дизеля при работе на дизельном топливе подтверждено, что точность проведения экспериментов достаточна для обеспечения достоверности полученных результатов.

Завершением математической обработки результатов экспериментального исследования является проверка адекватности математической модели системы «Двигатель – система питания смесью дизельного и биодизельного топлив», которая проводилась путем сравнения расчётных и экспериментальных данных. С помощью математической модели было рассчитано время разгона коленчатого вала дизеля с частоты вращения, соответствующей холостому ходу, до частоты, ограничивающей регулятором.

Используя F-критерий Фишера, подтверждена адекватность аналитических зависимостей, которые используются в математической модели. Также путем сравнения данных замедления и разгона коленчатого вала дизеля, полученных экспериментальным и расчетным путем, подтверждена адекватность математической модели системы «Двигатель – система питания смесью дизельного и биодизельного топлива».

Ключевые слова: биодизельное топливо, дизельное топливо, смесь, адекватность математической модели, критерий Фишера.

Поляков Андрей Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобилей и транспортного менеджмента, Винницкий национальный технический университет, e-mail: farv@inmt.vntu.edu.ua

Галушак Александр Александрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры двигателей внутреннего сгорания и альтернативных топливных ресурсов, Винницкий национальный аграрный университет, e-mail: Galushchak.gs@gmail.com

Галушак Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автомобилей и транспортного менеджмента, Винницкий национальный технический университет, e-mail: galuschak.d@gmail.com