

УДК 629.114.2

Петров Л.М., к.т.н, Борисенко Т.М.

ОДАУ м. Одеса

ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОЛІСНОГО РУШІЯ З ЕНЕРГОНАКОПИЧЕННЯМ

Наведено аналіз поліпшення якісних показників колісних рушіїв, складено математичну модель макетного зразку транспортного засобу з потенційним накопиченням енергії, приведено результати експериментальних досліджень.

Вступ

Фактори, які діють на колісний рушій з енергонакопиченням, можуть бути кількісними та якісними.

Функцію відгуку цих факторів можна представити у вигляді:

$$y = f(x_1, x_2, \dots).$$

Задача дослідження полягала у визначенні цієї функції та знаходженні числових значень її коефіцієнтів. Для цього нами був спланований і проведений експеримент.

У цьому експерименті математична модель подається, як поліном (інакше кажучи рівняння регресії). Це рівняння може бути лінійним, неповним квадратним, повним квадратним або більш високих степенів.

Багато експериментаторів [2] визначають параметр оптимізації в залежності від факторів: x_1, x_2, x_3, \dots , від їх квадратів і парних взаємодій. При цьому для одержання лінійного або не повного квадратного рівняння застосовують повний або дробовий факторний експеримент.

Аналіз існуючих конструкцій колісних рушіїв

У роботі [3] вперше запропоновано класифікацію колісних рушіїв, які використовують допоміжні засоби з метою поліпшення якісних показників кочення.

При експериментальному дослідженні моделі колісного рушія авторами запропоновано взяти до уваги, що обід колеса з гребінкою володіє особливою чутливістю до реалізації накопиченої потенціальної енергії пружного елемента з динамічною вагою. Завдяки такій взаємодії гребінки та динамічної ваги колісний рушій може не тільки зберігати надану йому енергію, а й значно підвищувати реалізацію своїх вихідних параметрів.

Мета досліджень

Метою дослідження являється створення математичної моделі та отримання рівняння регресії для колісного рушія з енергонакопиченням.

Методика дослідження

Для дослідження якісних показників колісних рушіїв транспортних засобів нами розроблено схему (рисунок 1) транспортного засобу з потенційним накопиченням енергії, яка включає поздовжню балку 1, що за допомогою вертикальних стійок 2, підшипникових вузлів 3 та осей 4 встановлена на колеса 5. До балки 1 під'єднана корзина 6, в якій на кронштейнах 7 через шарніри 8 встановлений диск-шаблон 9, в якому на внутрішній поверхні нанесені

імітаційні нерівності 10. Шарніри 8 встановлені в бігові доріжки 11 диска-шаблону 9 з можливістю вільного обертання. До поздовжньої балки 1 кронштейном 12 приєднаний пружний елемент 13, на вільному кінці якого з можливістю обертання закріплена динамічна вага 14. Одночасно до поздовжньої балки 1 кронштейном 15 приєднано привідний двигун 16, на валу 17 якого встановлено шків 18. На шків 18 та диск-шаблон 9 одягнуто ремень 19. На одному з коліс 5 встановлено привідний шків 20, який разом з диском-шаблоном 9 і ременем 21 утворюють кінематичний ланцюг.

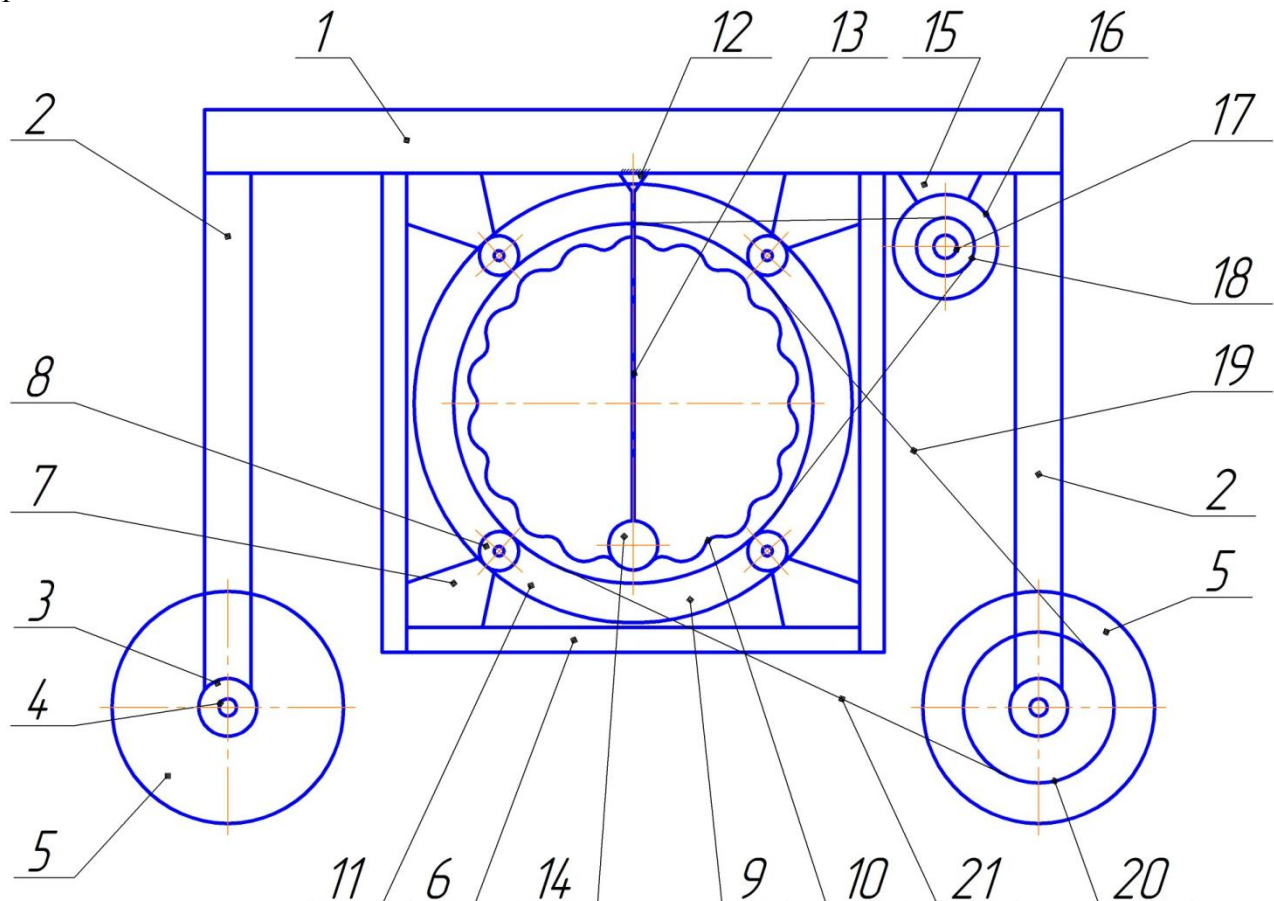


Рисунок 1 – Схема транспортного засобу з потенційним накопиченням енергії

При відпрацюванні методики дослідження нами до привідного двигуна 16 від електромережі підводився електрострум (на кресленні не показано). На валу 17 шків 18 починає обертатися й за допомогою ременя 19 починає обертатися диск-шаблон 9, при цьому він, обертаючись на шарнірах 8 за допомогою ременя 21 і привідного шківа 20, передає обертальний рух колесу 5. Одночасно з обертальним рухом колеса 5 починає рухатись поздовжня балка 1 з вертикальними стійками 2, а динамічна вага 14 завдяки пружному елементу 13 починає перекочуватись по імітаційним нерівностям 10. Завдяки відхиленню пружного елемента під дією імітаційних нерівностей 10 на динамічну вагу 14 імітується вплив шляхових нерівностей на ходову систему автомобіля, а також їх динамічний вплив на його трансмісію.

Основними параметрами, які досліджувались з метою підвищення якісних показників колісних рушіїв, нами введені такі параметри:

- кут відхилення важеля, $x_1 - \Theta$;
- довжина пружного елемента, $x_2 - L$.

Запропоновані параметри були використані при написанні математичної моделі [1] транспортного засобу з потенційним накопиченням.

Результати дослідження

Для проведення експериментальних досліджень був розроблений та побудований макет транспортного засобу з колісним рушієм довантажений динамічною вагою (рисунок 2).

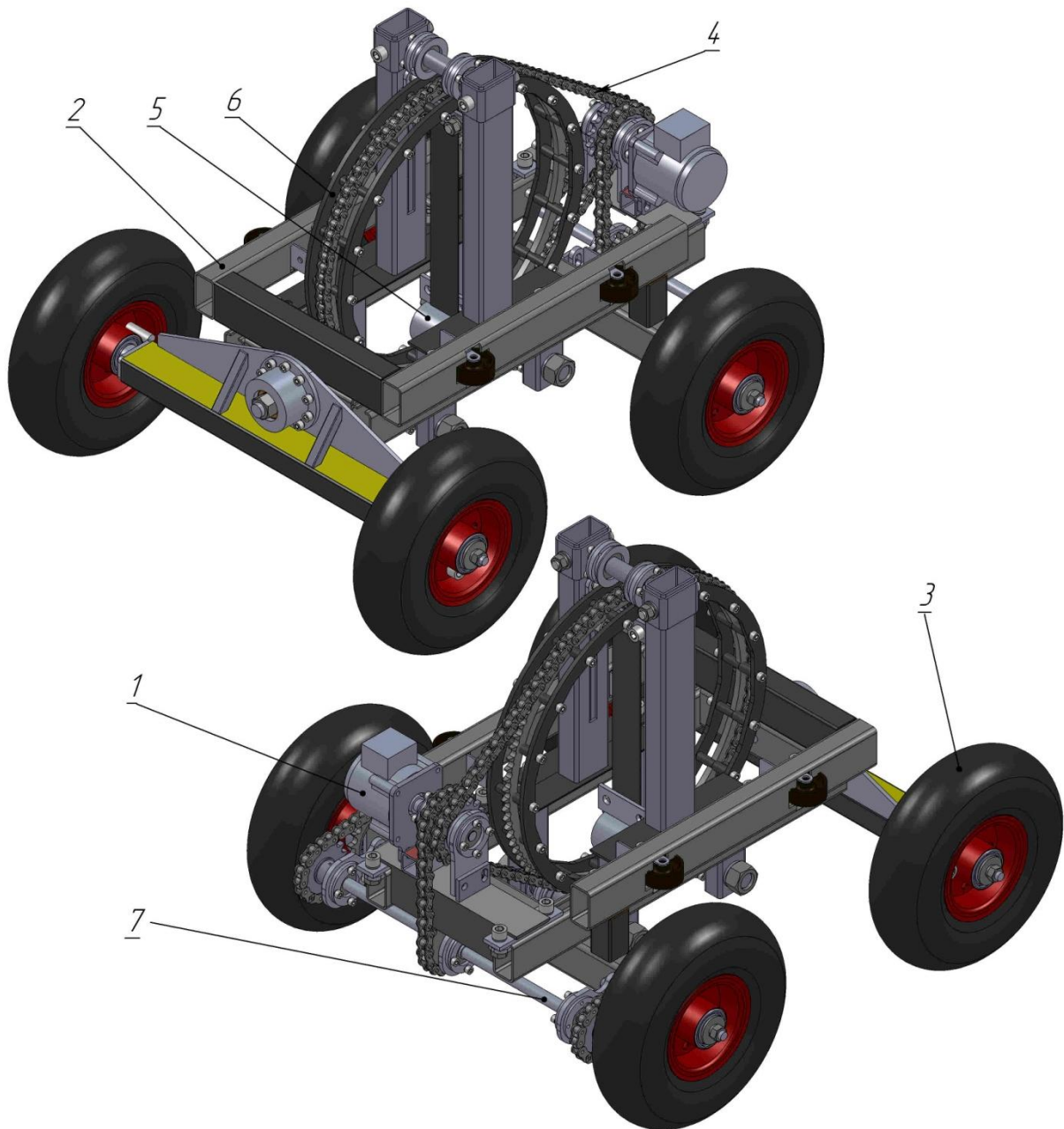


Рисунок 2 – Макет транспортного засобу з колісним рушієм, що довантажений динамічною вагою:
1 – електродвигун; 2 – рама; 3 – колесо; 4 – ланцюг; 5 – ваги динамічні; 6 – диск-шаблон з імітаційними нерівностями; 7 – привідна вісь коліс

Складаємо таблицю двофакторного дослідження з визначенням опору переміщення транспортного засобу.

Таблиця 1 – Варіанти двофакторного дослід з визначенням опору.

Довжина пружного елемента x_2 , м	Кут відхилення важеля x_1 , град
0,150	10
	20
	30
	40
0,175	10
	20
	30
	40
0,225	10
	20
	30
	40
0,300	10
	20
	30
	40

Планування й проведення ПФЕ склали з таких основних етапів: кодування факторів, складання плану матриці – матриці експериментів, рандомізація дослідів, реалізація плану експерименту, перевірка відтворюваності моделі, оцінка значущості коефіцієнтів регресії.

Згідно з таблицею 1 визначаємо опір переміщення транспортного засобу залежно від швидкості його руху x_1 і відхилення важеля x_2 . Відомо, що x_1 може приймати значення від 10 до 40 град, а x_2 від 0,15 м до 0,3 м. Опір переміщенню будемо визначати у формі неповного квадратного рівняння.

Спочатку нами закодовано параметричні фактори для переведення натуральних факторів у безрозмірні величини з метою побудови матриці експерименту. Зв'язок між кодovими й натуральними значеннями факторів встановлюється залежністю:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i_0}}{\Delta x_i}, \quad (1)$$

де x_i , X_i – відповідно кодове та натуральне значення i -го фактора;

X_{i_0} – натуральне значення i -го фактора на нульовому рівні.

Інтервали варіювання можуть бути прийняті за факторами:

$$x_1 \quad \Delta x = 10 \text{ град}$$

$$x_2 \quad \Delta x_2 = 0,15 \text{ м}$$

Складаємо таблицю результатів кодування факторів.

Таблиця 2 – Результати кодування факторів

Фактор	Натуральне позначення	Кодове позначення	Інтервал варіювання	Рівні варіювання					
				Верхні	Нижні	Нульові	Кодові		
							Верхні	Нижні	Нульові
Кут відхилення важеля	X1	x1	10	40	10	25	1	-1	0
Довжина пружного елемента	X2	x2	0,15	0,3	0,15	0,2125	1	-1	0

Складаємо план-матрицю експериментів (таблиця 3), для чотирьох дослідів $n = 2^2 = 4$

Таблиця 3 – План-матриця ПФЕ 2^2

Номер дослідів	Значення кодівих факторів		Взаємодія кодівих факторів
	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$
1	-1	-1	1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	1

Після цього проводимо рандомізацію дослідів з метою встановлення послідовності їх проведення. Це пояснюється тим, що у залежить не тільки від x_1 і x_2 , а й від інших факторів, які можуть бути невідомі досліднику. Проявлення невідомих факторів може по різному відзначитись на результаті. Щоб виключити цей вплив, встановлюємо випадковий порядок постановки дослідів у часі.

Користуючись одним зі способів, отримаємо таку послідовність проведення дослідів: 2, 3, 1, 4.

Приймемо, що проводитимемо досліді в трьох повторюваностях.

При повторюваності дослідів були прийняті наскрізні повторюванні послідовності:

перша -2, 3, 1, 4;

друга -2, 1, 3, 4;

третья -3, 2, 4, 1.

Отримані результати заносимо в таблицю 4.

Таблиця 4 – Умови проведення й результати дослідів

Точка плану і номер дослідів	x_1	x_2	x_1 x_2	Вихідний параметр, Н			Середнє арифметичне значення вихідного параметра
				Перша повторюваність	Друга повторюваність	Третя повторюваність	
1	-1	-1	1	55,5	50	54	53,17
2	1	-1	-1	58	52	56	55,33
3	-1	1	-1	75	73	71	73,00
4	1	1	1	85	84	82	83,67

Перевірка відтворюваності дослідів при однаковому числі повторюваностей для кожного дослідів проводиться за Критерієм Кохрена, таблиця значення якого $G(0,05; n; f_0)$, де 0,05 означає 5 % рівень значущості (він дорівнює: $1-\alpha$, де α – довірна ймовірність); n – число незалежних оцінок дисперсії (число дослідів); $f_0 = m_0 - 1$ – число ступенів вільності кожної оцінки; m_0 – число повторюваностей.

Перевірка відтворюваності проводиться за умови, що $G \leq \Theta(0,05; n; f_0)$,

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2}, \quad (2)$$

де S_i^2 – дисперсія, яка характеризує розсіювання результату в i -му досліді;

S_{\max}^2 – найбільша із дисперсій:

$$\bar{S}_i^2 = \frac{1}{m_0 - 1} \sum_{i=1}^m y_i - \bar{y}_i^2, \quad (3)$$

де i – номер повторюваності;

y_i – вихідний параметр при i_k повторюваності.

Дисперсія відтворюваності (помилка дослідів) визначається за формулою:

$$S_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m S_i^2. \quad (4)$$

Для транспортного засобу, що досліджується: $m_0 = 3$, $n = 4$.

Підставивши значення $S_{i_1}^2$, $S_{i_2}^2$, $S_{i_3}^2$, $S_{i_4}^2$ в критерій Кохрена, дістаємо табличне значення критерію Кохрена при $n = 4$, $f_i = m_0 - 1 = 0,77$.

Число 0,77 більше від 0,75, тому приходимо до висновку, що процес відтворюється.

У випадку невиконання умови відтворюваності проводимо перевірку точності вимірювань (точність показів приладів). Як можливий варіант зменшували інтервали варіювання факторів, збільшували число повторюваностей дослідів.

Оскільки цей процес відтворюваний, то розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії. Для неповного квадратного рівняння необхідно визначити коефіцієнти: b_0 , b_1 , b_2 , b_{12} за залежностями:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_u, \quad (5)$$

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_u \cdot x_i, \quad (6)$$

$$b_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_u \cdot x_i \cdot x_j, \quad (7)$$

де n – число точок плану ($n = 4$);

y_u – середнє арифметичне значення вихідного параметра в u -му досліді;

x_i – значення i -го кодового фактора в рядку матриці в u -му досліді;

x_j – значення j -го кодового фактора в рядку матриці в u -му досліді;

j – номер другого кодового фактора в членах рівнянь, що відображають

парну взаємодію.

В цих формулах i -й номер кодового фактора в лінійних членах рівнянь.

Для макетного засобу, який досліджується, $b_0=66,29\text{Н}$; $b_1=3,21\text{Н}$; $b_2=12,04\text{Н}$; $b_{12}=2,13\text{Н}$.

Рівняння регресії буде мати вигляд:

$$y = 66,3 + 3,2x_1 + 12,0x_2 + 2,1x_1 \cdot x_2 \quad (8)$$

Перевірку адекватності рівняння проводимо спочатку на лінійній частині

$$y = 66,3 + 3,2x_1 + 12,0x_2, \quad (9)$$

за допомогою критерію Фішера F .

Адекватність матиме місце, коли виконується нерівність

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F(0,05; f_{ad}; f_y). \quad (10)$$

де f_{ad} – число ступенів вільності і дисперсії адекватності;

$$f_{ad} = n - k - 1 = 4 - 2 - 1 = 1;$$

де k – число факторів, $k = 2$;

f_y – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності $f_y = n(m_0 - 1)$;

де m_0 – число повторюваностей;

$$f_y = 4(3 - 1) = 8.$$

Критерій Фішера при 5 % рівні значущості.

Дисперсія S_{ad}^2 обчислюється за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{n - k - 1} \sum_{u=1}^n (y - \bar{y})^2, \quad (11)$$

де y – розрахункове значення відгуку в i -му досліді лінійної частини формули.

Для дослідів:

№1 - $y^{(1)}$	51,04
№2 - $y^{(2)}$	57,46
№3 - $y^{(3)}$	75,13
№4 - $y^{(4)}$	81,54

Відповідне значення $y - \bar{y}_0$ для дослідів дорівнює:

№1	4,52
№2	4,52
№3	4,52
№4	4,52

Таким чином значення F критерію Фішера при дисперсії $S_{ad}^2 = 18,06$.

$$F = 3,04 < 53,2.$$

Таким чином, модель адекватна.

Після перевірки адекватності рівняння проводимо оцінку значущості коефіцієнтів регресії за допомогою критерію Стюдента. Коефіцієнт вважається значущим, якщо виконується нерівність:

$$|b_a| \geq \Delta b_a = \frac{t_{0,05; f_y} S_y}{\sqrt{n}}, \quad (12)$$

де b_a – коефіцієнт b_0, b_i і b_y ;
 Δb_a – довірча границя;
 $t_{(0,05; f_y)}$ – критерій Стьюдента при 5 % рівні значущості та числа ступенів вільності дисперсії відтворюваності f_y .

При 5 % рівні значущості ($\alpha=0,95; f_y=8$) з таблиць знаходимо $t = 2,3$.

Тоді $\Delta b_a=2,8$ Н.

Так, як $b_0=66,29$ Н; $b_1=3,21$ Н; $b_2=12,04$ Н; $b_{12}=2,13$ Н, тому всі одержані коефіцієнти значущі за винятком коефіцієнта взаємодії факторів $b_{12}=2,13$ Н, який менше за $\Delta b_a=2,8$ Н.

На основі викладеного приходимо до висновку, що рівняння

$$y = 66,3 + 3,2x_1 + 12,0x_2 + 2,1x_1 \cdot x_2$$

добре описує явище, при цьому останнім членом $2,1x_1 \cdot x_2$ можна нехтувати.

Графічно це рівняння є поверхнею відгуку ABCD (рисунок 3) у декартовій системі координат X_1OX_2 , на осях якої відкладається значення досліджуваних факторів x_1 і x_2 в кодовому вигляді.

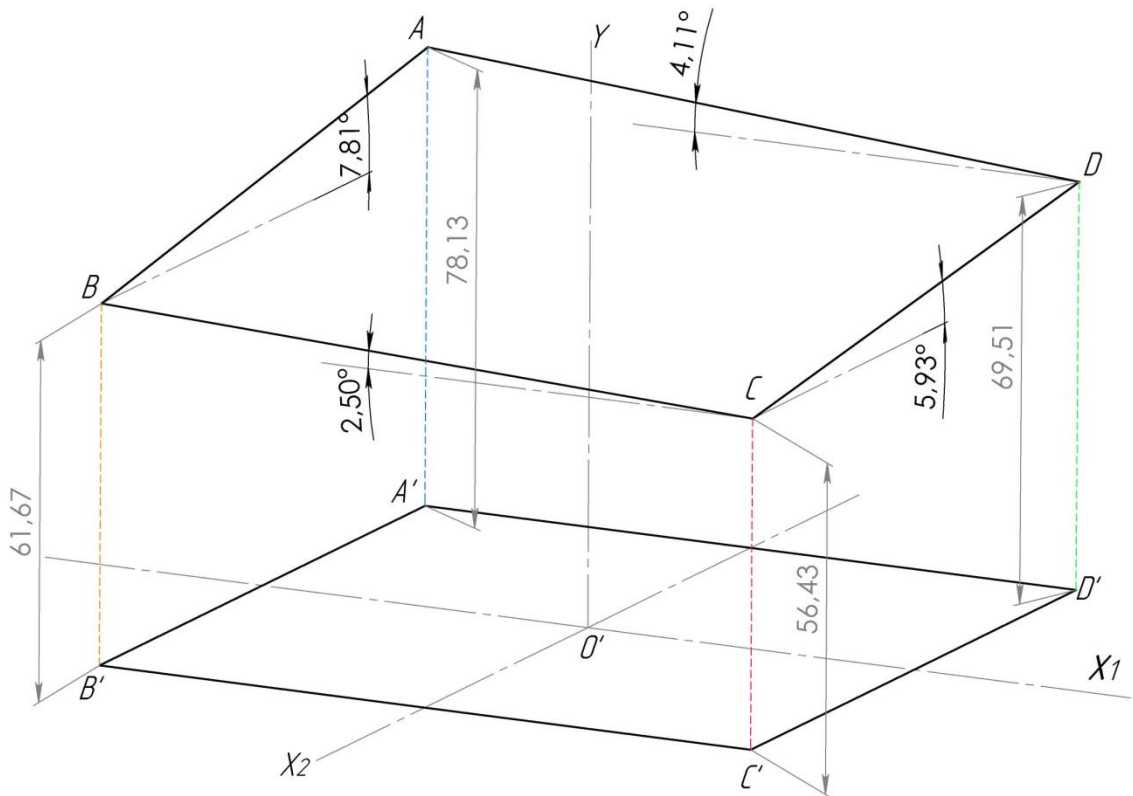


Рисунок 3 – Схема поверхні відгуку

Проекції точок цієї поверхні на площину X_1OX_2 позначені A', B', C', D' .

Перехід від рівняння регресії, у якому x_1 і x_2 – фактори в кодовому вигляді, до рівняння з факторами x_1 і x_2 в натуральному вигляді проводиться з урахуванням:

$$x_1 = \frac{x_1 - x_{10}}{\Delta x_1}; \quad x_2 = \frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2}. \quad (13)$$

При $x_{10} = 25$ град; $\Delta x_1 = 10$ град; $x_{20} = 0,21$ м; $\Delta x_2 = 0,15$ м.

$$x_1 = \frac{x_1 - 25}{10}; x_2 = \frac{x_2 - 0,21}{0,15}.$$

Тоді

$$y = 66,29 + 3,2(x_1 - 25)/10 + 12,04(x_2 - 0,21)/0,15 + 2,13[(x_1 - 25)/10] \cdot [(x_2 - 0,21)/0,15].$$

$$\text{Остаточню } y = 41,2 + 0,32x_1 + 80,28x_2 + [1,42x_1x_2 - 0,3x_1 - 35,4x_2 + 7,53].$$

Висновки

1. У результаті проведення двофакторного дослідження теоретичним шляхом було встановлено залежність опору переміщення макетного зразку від кута відхилення динамічної ваги та довжини пружного елемента.
2. Перевірка відтворюваності дослідження, яка проведена за критерієм Кохрена, показала, що відтворюваність дослідів відповідає 5 % рівню значущості.
3. Для макетного зразку розраховані коефіцієнти рівняння регресії, завдяки яким складено рівняння регресії.
4. На лінійній частині рівняння регресії провели перевірку адекватності рівняння регресії за критерієм Фішера при 5 % рівні значущості, при цьому число ступенів вільності дисперсії відтворюваності склало 8.
5. Графічне відображення рівняння регресії було накреслено у вигляді поверхні відгуку в декартовій системі координат, на осях якої відкладається значення досліджуваних факторів x_1 і x_2 у кодовому вигляді, при цьому встановлено, що нахил поверхні відгуку більше до осі x_2 , а тому вплив довжини пружного елемента значніше ніж кут відхилення.

Список літератури

1. Беляев В.М. Автомобили: испытания: учеб. пособие для вузов / В.М. Беляев, М.С. Высоцкий, Л.Х. Гилелес // под ред. А.И. Гришкевича, М.С. Высоцкого. – Мн.: Выш. шк., 1991. – 187 с.
2. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов. – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
3. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях // Тр. метролог. ин-та СССР. – Л.: Энергия, 1985. – Вып. 172 (232). – 71 с.
4. Петров Л.М. Основні напрямки удосконалення конструкції колісного рушія / Л.М. Петров, Т.М. Борисенко // Аграрний вісник Причорномор'я: зб. наук. праць. – Одеса, 2010. – № 55. – С.40–45.

Рецензент: к.т.н., доц. А.В. Хімченко, АДІ ДВНЗ «ДонНТУ».

Стаття надійшла до редакції 11.11.11
© Петров Л.М., Борисенко Т.М., 2011