

УДК 629.113

В.Г.Вербицький, А.Є.Бондаренко, А.В.Куплінов, Ю.М.Стрільник, М.М.Макійов
Донецька академія автомобільного транспорту**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ КУРСОВОЇ СТІЙКОСТІ РУХУ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО АВТОПОЇЗДА**

Описані результати експериментального дослідження курсової стійкості стаціонарних та перехідних режимів руху триланкового причіпного автопоїзда. Показані етапи й методи обробки результатів експерименту.

Ключові слова: *курсва стійкість, три ланковий причіпний автопоїзд*

Вступ

У попередній статті [1] були описані умови та етапи підготовки проведення експерименту, транспортні засоби, обладнання та прилади. Наступним кроком є опис проведення експерименту, представлення значень параметрів, що вимірювались, та методики їхньої обробки.

Мета статті

Метою роботи є визначення результатів вимірювання необхідних параметрів під час експериментального дослідження курсової стійкості руху триланкового автопоїзда.

Основний розділ

Під час проведення експерименту для підтвердження адекватності математичної моделі руху автопоїзда (АП) необхідно було отримати значення наступних показників:

1. θ - зведений кут повороту керованих коліс тягача, рад;
2. V - лінійну швидкість руху АП, м/с;
3. R - радіуси та траєкторії руху характерних точок АП, м;
4. φ - кути складання ланок АП, рад.

Зведений кут повороту керованих коліс тягача θ вимірювався за допомогою потенціометричного датчика, встановленого на сошку рульового механізму. Його тарування було проведено на стенді регулювання кутів установки керованих коліс (θ_{cm}). Залежність кута повороту керованих коліс тягача від кута повороту керма α наведено в табл. 1.

Отримані значення порівнювались також із розрахунковими даними (θ_p), отриманими на підставі технічної характеристики тягача (автомобіля ВАЗ 2107) [2] - загального передатного числа рульового механізму та рульового приводу.

Таблиця 1

Результати тарування датчика повороту керованих коліс

α	-540°	-360°	-180°	180°	360°	540°
θ_p	-27° 26' 2"	-18° 17' 30"	-9° 8' 45"	9° 8' 45"	18° 17' 30"	27° 26' 20"
θ_{cm}	-28° 10'	-18° 56'	-9° 34'	9° 16'	18° 14'	27° 40'
θ	-28° 0'	-18° 50'	-9° 30'	9° 20'	18° 30'	27° 50'

Лінійна швидкість руху АП вимірювалась за допомогою «п'ятого колеса» [1]. Отримані значення V перевірялись розрахунками лінійної швидкості V_p на підставі траєкторій, по яким рухався АП, та часу, який вимірювався двома секундомірами.

Радіуси та траєкторії руху характерних точок ланок АП (R_1 - середини передньої балки автомобіля-тягача; R_2 - середини заднього моста тягача; R_3 - середини вісі першого причепа та R_4 - середини вісі другого причепа) вимірювались за допомогою гідровідмітчиків [1] та рулетки (див. рис. 1).

Кути складання ланок АП φ_1 та φ_2 вимірювались за допомогою потенціометричних датчиків [1]. Значення вимірювальних приборів фіксувалися цифровою відеокамерою (див. рис. 2).



Рис. 1. Вимірювання радіусів концентричних окружностей руху ланок АП



Рис. 2. Зафіксовані відеокамерою значення вимірювальних приборів

У першу чергу, були здійснені випробування АП під час сталого руху по колам (див. рис. 3), радіус яких змінювався за рахунок зміни кута повороту керма α . Результати вимірювань наведені в табл. 2.



Рис. 3. Експериментальне дослідження руху АП по колу

Таблиця 2

Результати вимірювань на полігоні під час експерименту «Рух по колу»

№ експ.	$\alpha, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$V, \text{ км/год}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	$R_3, \text{ м}$	$R_4, \text{ м}$	$\varphi_1, ^\circ$	$\varphi_2, ^\circ$
1	*	$6^\circ 10'$	34	23,79	23,69	23,67	23,66	$-7^\circ 25'$	$-6^\circ 07'$
2	180	$9^\circ 20'$	25	15,38	15,21	15,16	15,13	$-11^\circ 18'$	$-9^\circ 39'$
3	360	$18^\circ 30'$	23	7,85	7,50	7,39	7,31	$-22^\circ 44'$	$-19^\circ 47'$
4	540	$27^\circ 50'$	20,5	5,32	4,79	4,61	4,47	$-35^\circ 13'$	$-31^\circ 40'$

На підставі отриманих радіусів R_i та геометричних параметрів АП (див. рис. 4) за допомогою персонального комп'ютера та програмного забезпечення «Компас - 3D» було виконане графічне відтворення схеми руху АП по колу (див. рис. 5) у наступному порядку:

1. Побудовані концентричні окружності з радіусами R_i .
2. На зовнішній окружності радіусу R_1 обрана довільна точка 1 розміщення центру першої осі АП.
3. Від цієї точки відкладена відстань, що дорівнюється базі тягача $l = 2424$ мм, до перехрестя з окружністю радіуса R_2 . Отримана точка 2 з'єднуються відрізком, який відображає положення горизонтальної повздовжньої осі тягача. Відрізок подовжується на відстань, що дорівнює відстані між центром другої осі тягача та місцем зчеплення з 1 причепом: $c-b = 1122$ мм. Таким чином, отримується положення т. B_1 .
4. Від т. B_1 радіусом, що дорівнює $d_1=1813$ мм, проводимо зарубку до перехрестя з окружністю радіуса R_3 та отримуємо т. 3, що відповідає положенню центра осі 1 причепа. З'єднав т. B_1 із т.

3 відрізком та збільшивши його довжину на відстань від центра осі 1 причепа до місця зчеплення 1 та 2 причепів (т. B_2) – $c_1 = 995$ мм, отримуємо положення позовдвжньої горизонтальної осі 1 причепа.

5. Від т. B_2 радіусом, що дорівнює $d_2 = 1600$ мм, проводимо зарубку до перехрестя із окружністю радіуса R_4 та отримуємо т. 4, що відповідає положенню центра осі другого причепа. З'єднав т. B_2 із т. 4 відрізком, отримуємо положення позовдвжньої горизонтальної осі 2 причепа.

6. Між отриманими позовдвжніми горизонтальними осями тягача та першого причепа, а також між двома причепами виникають так звані кути складання ланок АП φ_1 та φ_2 , значення яких можна виміряти та порівняти зі значеннями, отриманими від потенціометричних датчиків.

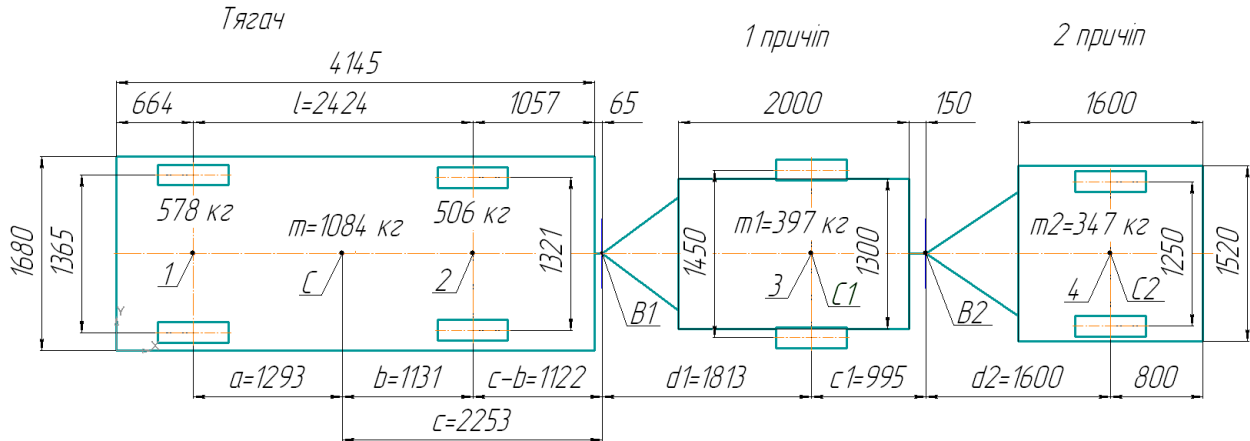


Рис. 4. Геометричні та масові параметри АП

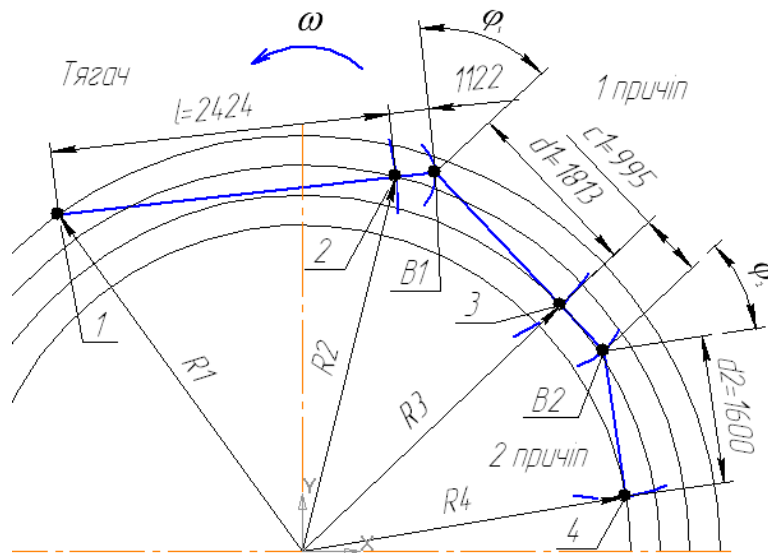


Рис. 5. Графічне побудування схеми руху АП по колу

7. Дотичні окружностей в точках 1, 2, 3 та 4 утворюють з позовдвжніми осями АП кути відведення δ_i . Графічне побудування схем руху АП по колу у чотирьох експериментах та визначення кутів відведення δ_i і складання ланок АП φ_i представлено на рис. 6...9. Результати вимірювань наведені в табл. 3.

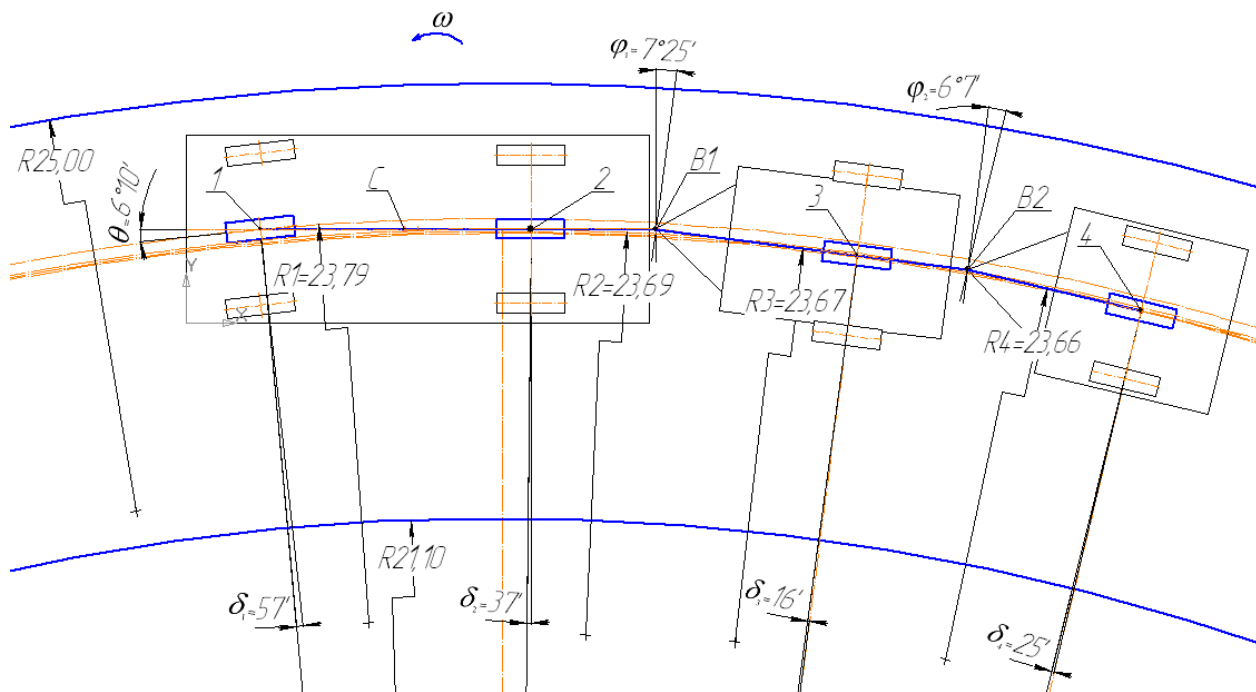


Рис. 6. Графічне побудування схеми руху АП по колу з $R=25$ м та визначення кутів відведення δ_i та складання ланок АП ϕ_i під час експерименту №1

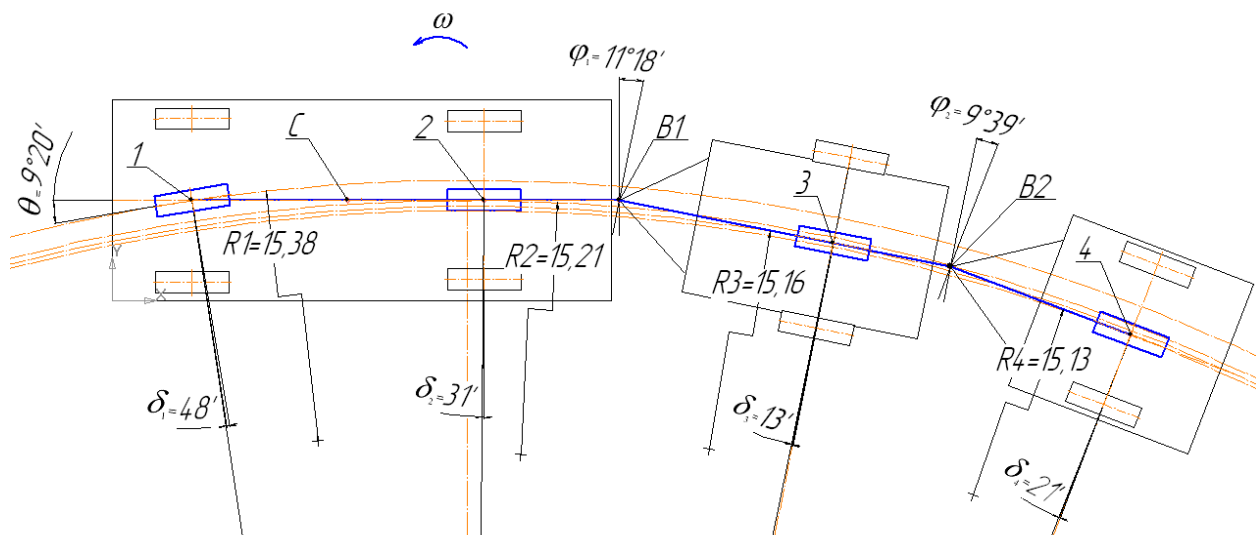


Рис. 7. Графічне побудування схеми руху АП по колу та визначення кутів відведення δ_i та складання ланок АП ϕ_i під час експерименту №2

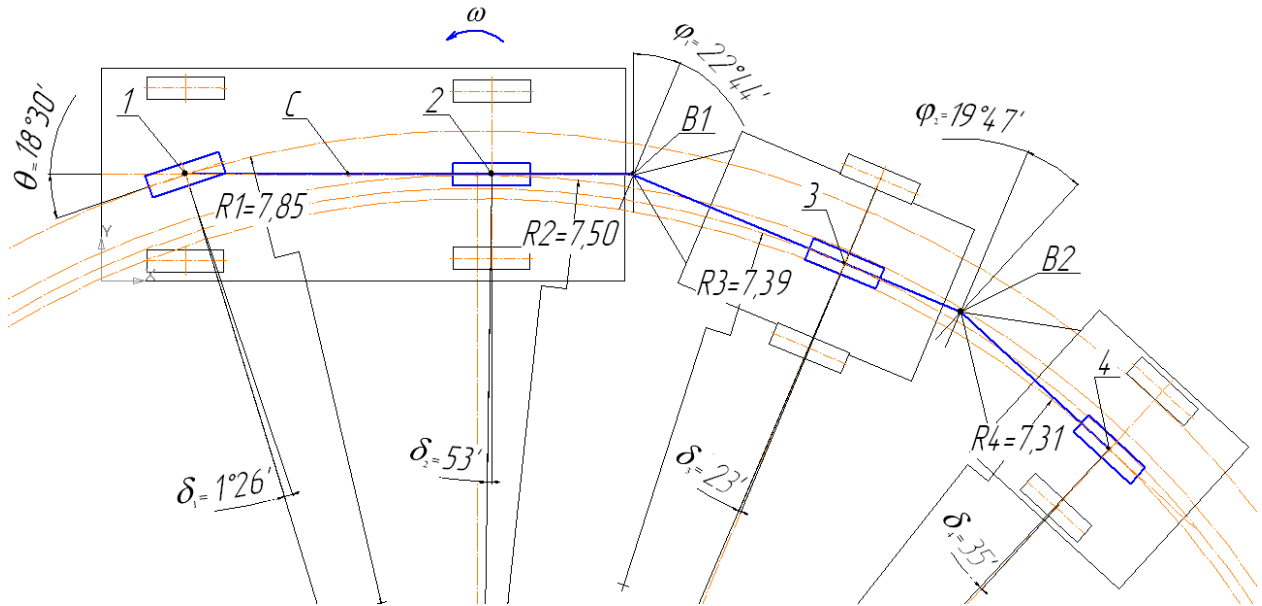


Рис. 8. Графічне побудування схеми руху АП по колу та визначення кутів відведення δ_i та складання ланок АП φ_i під час експерименту №3

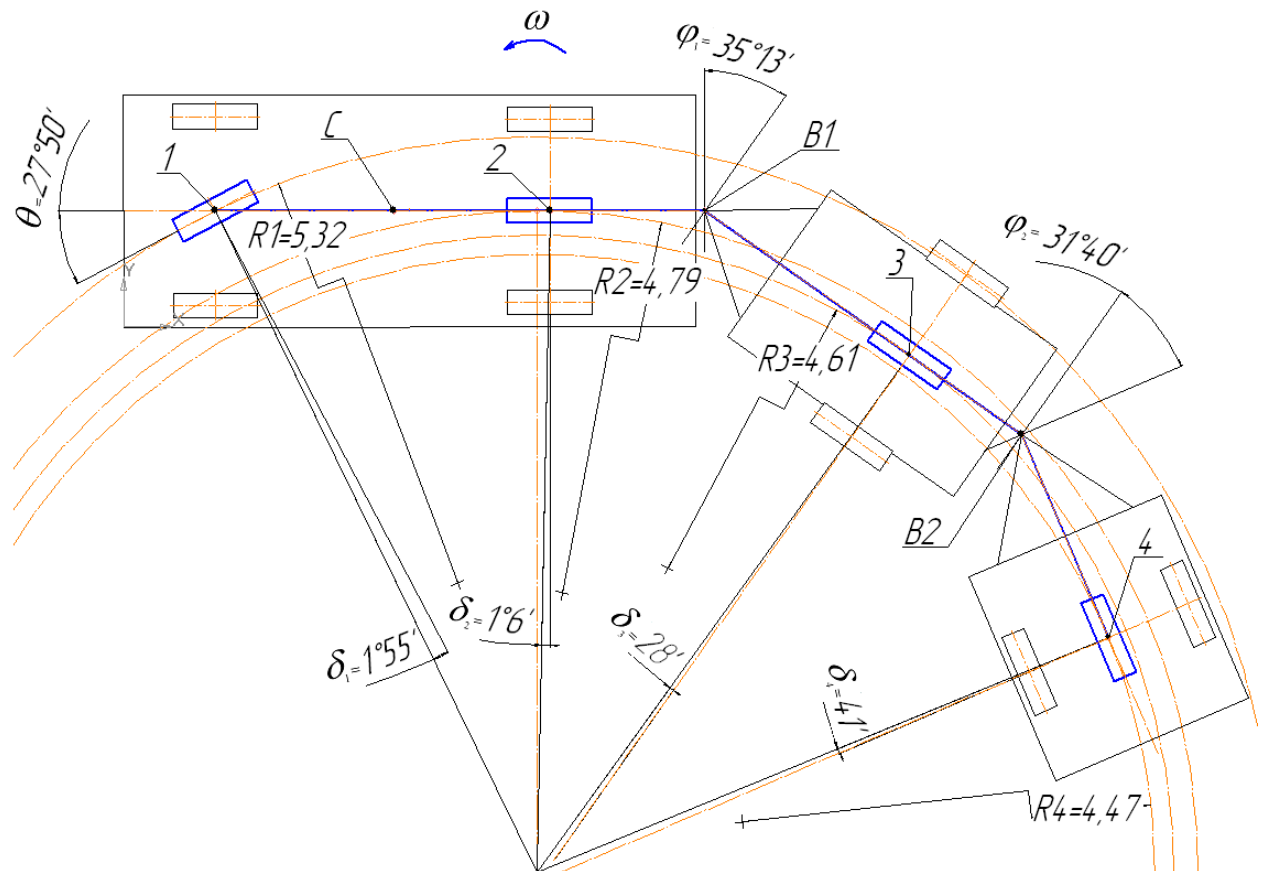


Рис. 9. Графічне побудування схеми руху АП по колу та визначення кутів відведення δ_i та складання ланок АП φ_i під час експерименту №4

На підставі геометричних та кінематичних співвідношень та визначених вище значень кутів відведення були обчислені параметри стаціонарного режиму u і ω та наведені в табл. 3.

Поперечна складова лінійної швидкості центра мас тягача:

$$u = \frac{-V(a \cdot \operatorname{tg}(\delta_2) + b \cdot \operatorname{tg}(\delta_1 - \theta))}{l} \quad (1)$$

Кутова швидкість тягача

$$\omega = \frac{V(\operatorname{tg}(\delta_2) - \operatorname{tg}(\delta_1 - \theta))}{l} \quad (2)$$

при цьому вважаємо, що кутова швидкість усіх ланок АП однакова, тобто $\omega = \omega_1 = \omega_2$.

Для першого причепа поперечна складова лінійної швидкості центра мас:

$$u_2 = -V \sin(\varphi_1) + (u - c \cdot \omega) \cos(\varphi_1) - d_1 \omega_2; \quad (3)$$

поздовжня складова:

$$v_2 = V \cos(\varphi_1) + (u - c \cdot \omega) \sin(\varphi_1). \quad (4)$$

Для другого причепа поперечна складова лінійної швидкості центра мас:

$$u_3 = -V_2 \sin(\varphi_2) + (u_2 - c_1 \cdot \omega) \cos(\varphi_2) - d_2 \omega_3; \quad (5)$$

поздовжня складова

$$v_3 = V_2 \sin(\varphi_2) + (u_2 - c_1 \cdot \omega) \sin(\varphi_2). \quad (6)$$

Таблиця 3

Результати визначення параметрів руху АП в експерименті «Рух по колу»

№ з/п	$\delta_1, ^\circ$	$\delta_2, ^\circ$	$\delta_3, ^\circ$	$\delta_4, ^\circ$	$u, \text{м/с}$	$\omega, \text{с}^{-1}$	$u_2, \text{м/с}$	$v_2, \text{м/с}$	$u_3, \text{м/с}$	$v_3, \text{м/с}$
1	0° 57'	0° 37'	0° 16'	0° 25'	0,350	0,399	-0,045	9,436	-0,069	9,429
2	0° 48'	0° 31'	0° 13'	0° 21'	0,454	0,457	-0,028	6,922	-0,044	6,905
3	1° 26'	0° 53'	0° 23'	0° 35'	0,865	0,852	-0,042	6,299	-0,064	6,227
4	1° 55'	1° 6'	0° 28'	0° 41'	1,237	1,190	-0,046	5,482	-0,066	6,309

З системи рівнянь (7...10), визначаючих рівноважне положення АП, обчислюємо сили відведення кожної осі Y_i , Н:

$$\begin{aligned} & m_2 \omega v + m_3 \omega v + Y_3 \cos(\varphi_1) + m_3 d_1 \omega^2 \sin(\varphi_1) - m_1 \omega v - m \omega v + m_3 c_1 \omega^2 \sin(\varphi_1) \\ & + m_2 d_1 \omega^2 \sin(\varphi_1) + Y_1 \cos(\theta) + Y_2 - m_3 d_2 \omega^2 \cos(\varphi_1) \sin(\varphi_2) + m_3 d_2 \omega^2 \sin(\varphi_1) \cos(\varphi_2) - \\ & - 2m_2 \omega v \cos(\varphi_1)^2 - 2m_3 \omega v \cos(\varphi_1)^2 - 2 \cos(\varphi_1) m_2 \omega \sin(\varphi_1) u + 2 \cos(\varphi_1) m_2 \sin(\varphi_1) c \omega^2 + \\ & + 2 \cos(\varphi_1) m_3 \sin(\varphi_1) c - 2 \omega^2 \cos(\varphi_1) m_3 \omega \sin(\varphi_1) u + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) Y_4 + \sin(\varphi_1) \sin(\varphi_2) Y_4 = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & -b Y_2 + a \cos(\theta) Y_1 - c \cos(\varphi_1) Y_3 - a m_1 \omega v + c m_3 \omega v + c m_2 \omega v + \\ & + c \cos(\varphi_1) \sin(\varphi_2) m_3 d_2 \omega^2 + c \sin(\varphi_1) m_2 d_1 \omega^2 + c \sin(\varphi_1) \cos(\varphi_2) m_3 d_2 \omega^2 + \\ & + c \sin(\varphi_1) m_3 c_1 \omega^2 + c \sin(\varphi_1) m_3 d_1 \omega^2 - c \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) Y_4 + c \sin(\varphi_1) \sin(\varphi_2) Y_4 = 0; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & -d_1 Y_3 - b_1 Y_3 - c \sin(j_1) m_2 d_1 \omega^2 - c \sin(j_1) m_3 c_1 \omega^2 - c \sin(j_1) m_3 d_1 \omega^2 - d_1 \cos(j_2) Y_4 + \\ & + d_1 m_2 \omega \sin(j_1) u + d_1 m_3 \omega v \cos(j_1) + d_1 m_3 \omega \sin(j_1) u + c_1 m_3 \omega v \cos(j_1) + \\ & + c_1 m_3 \omega \sin(j_1) u + c_1 \sin(j_2) m_3 d_2 \omega^2 + d_1 \sin(j_2) m_3 d_2 \omega^2 + d_1 m_2 \omega v \cos(j_1) - c_1 \cos(j_2) Y_4 = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 & -b_2 Y_4 - d_2 Y_4 - c \cos(\varphi_1) \sin(\varphi_2) m_3 d_2 \omega^2 - c \sin(\varphi_1) \cos(\varphi_2) m_3 d_2 \omega^2 - \\
 & -c_1 \sin(\varphi_2) m_3 d_2 \omega^2 - d_1 \sin(\varphi_2) m_3 d_2 \omega^2 + d_2 m_3 \omega \cos(\varphi_2) v \cos(\varphi_1) + \\
 & + d_2 m_3 \omega \cos(\varphi_2) \sin(\varphi_1) u - d_2 m_3 \omega \sin(\varphi_2) v \sin(\varphi_1) + d_2 m_3 \omega \sin(\varphi_2) \cos(\varphi_1) u = 0.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Коефіцієнти опору відведення

$$K_i = Y_i / \delta_i. \tag{11}$$

Результати обчислень наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Результати визначення сил відведення Y_i та коефіцієнтів опору відведення K_i на осях АП

№ з/п	Y_1, H	Y_2, H	Y_3, H	Y_4, H	$K_1, H/рад$	$\Delta\%$	$K_2, H/рад$	$\Delta\%$	$K_3, H/рад$	$\Delta\%$	$K_4, H/рад$	$\Delta\%$
1	1918,58	2177,44	1492,12	1304,64	115403	0,7	201770	0,6	311409	0,5	177605	0,4
2	1629,59	1834,77	1253,89	1094,81	116399	0,1	202924	0,0	306228	1,2	172661	2,4
3	2921,41	3148,04	2121,10	1841,44	116468	0,2	203647	0,3	314957	1,6	179929	1,7
4	3916,84	3918,35	2568,47	2192,80	116775	0,4	203551	0,3	307302	0,9	177360	0,3
Середнє значення коефіцієнту опору відведення $K_{сзi}, H/рад$					116261	-	202973	-	309974	-	176889	-

Висновок

Отримана відносна розбіжність значень коефіцієнтів опору відведення, що не перевищує 2,4%, свідчить про адекватність, а також про достатню точність проведених експериментальних вимірювань, які дозволять в подальшому використовувати їх для аналізу керованості і стійкості руху в стаціонарних та неусталених режимах руху АП.

1. А.Є. Бондаренко, Ю.М. Стрільник, А.В. Куплінов, Д.Л. Мойся, М.М. Макійов. Експериментальний автопоїзд для дослідження курсової стійкості руху // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2010.- Вип. 1. – С. 48-58.
2. Краткий автомобильный справочник / А.Н. Понизовкин, Ю.М. Власко, М.Б. Ляликов и др. – М.: АО «ТРАНСКОНСАЛТИНГ», НИИАТ, 1994. – 779 с.