

М. А. Подригало¹
Д. М. Клец¹

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУРСОВОГО КУТА ПРИ РИСКАННІ АВТОМОБІЛЯ

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

Наведено результати дослідження раціональних параметрів динамічної стабілізації курсового кута при рисканні автомобіля. Визначено час стабілізації курсового кута; початкове керувальне стабілізувальне кутове прискорення; кругову частоту поворотального моменту.

Ключові слова: автомобіль, рискання, стабілізація, курсовий кут.

Вступ

За прямолінійного усталеного руху траєкторія автомобіля є криволінійною з кривизною, що постійно змінюється. У цьому випадку напрямні колеса роблять дотичні рухи з малою амплітудою щодо свого нейтрального положення, що пов'язано з необхідністю підтримки заданого курсового кута автомобіля у разі дії різних збурень. Рискання зі збільшенням частоти й амплітуди коливань машини в площині дороги може призвести до дорожньо-транспортних пригод. Для гасіння коливань у площині дороги й зумовлених цими коливаннями заносів автомобілів використовуються як ручні способи керування (поворот напрямних коліс убік, протилежний напрямку обертання машини), так і автоматичні. До останніх відносяться системи динамічної стабілізації курсового кута.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Динамічна стабілізація курсового кута автомобіля під час заносу стала темою робіт [1—3]. У зазначених роботах розглянуті питання стабілізації курсового кута автомобіля під час заносу, що супроводжується бічним ковзанням задніх коліс. Однак причиною появи бічного заносу може бути рискання автомобіля в результаті коливального руху напрямних коліс у площині дороги. У разі збігу частоти власних коливань автомобіля із частотою вимушених коливань у площині дороги виникає резонанс, різке збільшення амплітуди коливань і, як наслідок резонансу, занос. Частоти власних коливань автомобілів у площині дороги визначені в роботі [4]. Однак у цій роботі не визначені раціональні параметри динамічної стабілізації курсового кута при рисканні автомобіля.

Метою роботи є поліпшення курсової стійкості автомобіля під час прямолінійного руху шляхом раціонального вибору параметрів динамічної стабілізації курсового кута.

Виклад основного матеріалу

Причиною виникнення рискання є поява збурювального впливу, а саме початкового кутового прискорення або кутової швидкості автомобіля в площині дороги. Вважатимемо, що коливання автомобіля в площині дороги відбуваються за рахунок бічної пружності шин, а передні й задні колеса автомобіля зберігають зчеплення з дорогою. Кутові збурення (короткочасні) є причиною вільних згасаючих коливань автомобіля в площині дороги, рівняння яких має вигляд

$$I_{ZM} \ddot{\psi}_Z + \alpha \dot{\psi}_Z + C_{\text{кут}} \psi_Z = 0, \quad (1)$$

де I_{ZM} — момент інерції автомобіля щодо вертикальної осі, яка проходить через центр пружності M автомобіля (рис. 1); $\ddot{\psi}_Z$; $\dot{\psi}_Z$; ψ_Z — кутове прискорення, кутова швидкість і кут повороту автомобіля в площині дороги; α — коефіцієнт пропорційності між кутовою швидкістю й моментом в'язкого тертя в процесі коливань; $C_{\text{кут}}$ — кутова жорсткість автомобіля в площині дороги [4].

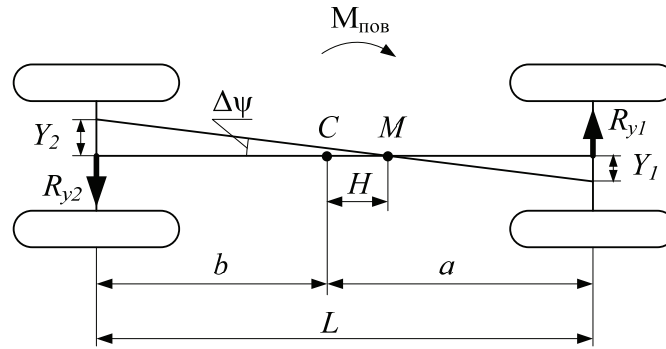


Рис. 1. Схема навантаження автомобіля поворотальним моментом:
 C — центр мас автомобіля; R_{y1}, R_{y2} — сумарні бічні реакції дороги на передніх і задніх колесах;
 Y_1, Y_2 — бічні зсуви середин передньої й задньої осей

Поділивши ліву й праву частину рівняння (1) на I_{ZM} , отримаємо:

$$\ddot{\psi}_Z + 2n\dot{\psi}_Z + K^2\psi_Z = 0, \quad (2)$$

де K — кругова частота власних коливань,

$$K = 2\pi\nu_{\text{власн}} = \sqrt{\frac{C_{\text{кут}}}{I_{ZM}}}; \quad (3)$$

$\nu_{\text{власн}}$ — частота власних коливань автомобіля в площині дороги;

$$2n = \frac{\alpha}{I_{ZM}}. \quad (4)$$

Розв'язок диференціального рівняння (2) має вигляд

$$\psi_Z = A_{\psi_0} e^{-n\tau} \sin\left(\sqrt{K^2 - n^2} \cdot \tau + \alpha_1\right), \quad (5)$$

де A_{ψ_0} — початкова амплітуда згасальних вільних коливань,

$$A_{\psi_0} = \sqrt{\left(\psi_{Z_0}\right)^2 + \frac{\omega_{Z_0}^2}{K^2}}; \quad (6)$$

ψ_{Z_0}, ω_{Z_0} — початковий кутовий зсув і швидкість обертання автомобіля в площині дороги;
 τ, α_1 — час та початкова фаза,

$$\alpha_1 = \text{arctg} \frac{\psi_{Z_0}}{A_{\psi_0}}. \quad (7)$$

Прийемо, що в початковий момент часу ($r = 0$) на автомобіль діє збурення ω_{Z_0} , а $\psi_{Z_0} = 0$.

У цьому випадку вирази (6) і (7) спростяться:

$$A_{\psi_0} = \frac{\omega_{Z_0}}{K}; \quad (8)$$

$$\alpha_1 = 0. \quad (9)$$

Рівняння (5) після підстановки в нього співвідношень (8) і (9) набуде вигляду:

$$\psi_Z = \frac{\omega_{Z_0}}{K} e^{-n\tau} \sin\left(\sqrt{K^2 - n^2} \tau\right). \quad (10)$$

Кутова швидкість для згасальних вільних коливань

$$\omega_Z = \frac{d\psi_Z}{d\tau} = \omega_{Z_0} e^{-n\tau} \cos\left(\sqrt{K^2 - n^2} \cdot \tau + \beta\right), \quad (11)$$

де β — зсув по фазі між коливаннями ψ_Z й ω_Z ,

$$\beta = \arcsin\left(\frac{n}{K}\right) = \arccos\left(\sqrt{1 - \frac{n^2}{K^2}}\right). \quad (12)$$

Час реакції людини або автоматичної системи динамічної стабілізації на появу збуреного руху $\tau = \tau_p$. Через проміжок часу τ_p кут повороту поздовжньої осі ψ_{Zp} й кутова швидкість ω_{Zp} складатимуть:

$$\psi_{Zp} = \frac{\omega_{Z_0}}{K} e^{-n\tau_p} \sin\left(\sqrt{K^2 - n^2} \tau_p\right); \quad (13)$$

$$\omega_{Zp} = \omega_{Z_0} e^{-n\tau_p} \cos\left[\sqrt{K^2 - n^2} \tau_p + \arcsin\left(\frac{n}{K}\right)\right]. \quad (14)$$

Після появи стабілізуючого повертального моменту $M_{пов}$ на автомобіль діють і вимушені коливання, рівняння яких має вигляд

$$I_{ZM} \ddot{\psi}_Z + \alpha \dot{\psi}_Z + C_{кут} \psi_Z = -M_{пов_0} \cos(pt), \quad (15)$$

де $M_{пов_0}$ — повертальний момент для $t = 0$.

Поділивши ліву й праву частини рівняння (15) на Y_{ZM} , отримаємо неоднорідне диференціальне рівняння

$$\ddot{\psi}_Z + 2n\dot{\psi}_Z + K^2\psi_Z = -\varepsilon_{Z_{кер_0}} \cos(pt), \quad (16)$$

де p, t — кругова частота коливань повертального моменту та час; $\varepsilon_{Z_{кер_0}}$ — початкове кутове керувальне прискорення.

Загальний розв'язок неоднорідного диференціального рівняння складається із суми

$$\psi_Z = \psi_{Z_1} + \psi_{Z_2}, \quad (17)$$

де ψ_{Z_1}, ψ_{Z_2} — загальний та частковий розв'язки зрізаного (однорідного) диференціального рівняння.

У теорії вимушених коливань приймається припущення, що для $t \rightarrow \infty$ величина $\psi_{Z_1} \rightarrow 0$, оскільки характеризує вільні коливання. У цьому випадку $\psi_Z = \psi_{Z_2}$. Однак нас цікавить поведінка об'єкта за малих значень t , оскільки стабілізація об'єкта повинна відбуватися за малих значень відхилення курсового кута ψ_Z . Тому розглянемо поведінку об'єкта у разі накладання вільних і вимушених коливань.

Загальний розв'язок зрізаного (однорідного) диференціального рівняння

$$\psi_{Z_1} = e^{-nt} \left(A \cos\sqrt{K^2 - n^2} t + B \sin\sqrt{K^2 - n^2} t \right), \quad (18)$$

де A, B — постійні інтегрування.

Частковий розв'язок неоднорідного диференціального рівняння отримаємо у вигляді

$$\psi_{Z_2} = \frac{\varepsilon_{Z_{кер_0}}}{\sqrt{4n^2 p^2 + (p^2 - K^2)^2}} \sin(\phi - pt), \quad (19)$$

де ϕ — кут зсуву по фазі між коливанням повертального моменту і рухом автомобіля,

$$\phi = \arcsin \frac{p^2 - K^2}{\sqrt{4n^2 p^2 + (p^2 - K^2)^2}} = \arccos \frac{2 \cdot n \cdot p}{\sqrt{4n^2 p^2 + (p^2 - K^2)^2}}. \quad (20)$$

Загальний розв'язок неоднорідного диференціального рівняння 2-го порядку

$$\psi_Z = e^{-nt} \left(A \cos \sqrt{K^2 - n^2} t + B \sin \sqrt{K^2 - n^2} t \right) + \frac{\varepsilon_{Z_{кер0}}}{\sqrt{4n^2 p^2 + (p^2 - K^2)^2}} \sin(\phi - pt). \quad (21)$$

Кутова швидкість автомобіля в площині дороги

$$\omega_Z = \dot{\psi}_Z = e^{-nt} \left[\sqrt{K^2 - n^2} t \left(B \cos \sqrt{K^2 - n^2} t - A \sin \sqrt{K^2 - n^2} t \right) - \right. \\ \left. - n \left(A \cos \sqrt{K^2 - n^2} t + B \sin \sqrt{K^2 - n^2} t \right) \right] - \varepsilon_{Z_{кер0}} \frac{p}{\sqrt{4n^2 p^2 + (p^2 - K^2)^2}} \cos(\phi - pt). \quad (22)$$

Коефіцієнти A і B визначені з крайових умов (якщо $t = 0$; $\psi_Z = \psi_{Zp}$; $\omega_Z = \omega_{Zp}$):

$$A = \psi_{Zp} - \frac{p^2 - K^2}{4n^2 p^2 + (p^2 - K^2)^2} \varepsilon_{Z_{кер0}}; \quad (23)$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{K^2 - n^2}} \left[\omega_{Zp} + n\psi_{Zp} + p \frac{n(p^2 + K^2)}{4n^2 p^2 + (p^2 - K^2)^2} \varepsilon_{Z_{кер0}} \right]. \quad (24)$$

Умовою стабілізації курсового кута автомобіля є отримання $\psi_Z = 0$, якщо $p \cdot t = \phi$. Це можливо, якщо $A = 0$, $B = 0$ й

$$t = \frac{\phi}{p} = \frac{1}{p} \operatorname{arctg} \frac{p^2 - K^2}{2np} = \tau_{\text{стаб}}, \quad (25)$$

де $\tau_{\text{стаб}}$ — час стабілізації курсового кута.

Прирівнюючи нулю праву частину рівняння (23), отримаємо:

$$\varepsilon_{Z_{кер0}} = \psi_{Zp} \frac{4n^2 p^2 + (p^2 - K^2)^2}{p^2 - K^2}. \quad (26)$$

Після прирівнювання до нуля правої частини рівняння (24), отримаємо:

$$p = K \sqrt{1 + 2n \frac{\psi_{Zp}}{\omega_{Zp}}}. \quad (27)$$

Вираз (26) з урахуванням (27) прийме вигляд

$$\varepsilon_{Z_{кер0}} = 2n\psi_{Zp} \left[K^2 \left(2n + \frac{\omega_{Zp}}{\psi_{Zp}} \right) + \frac{\psi_{Zp}}{\omega_{Zp}} \right]. \quad (28)$$

Час стабілізації курсового кута визначимо після підстановки (27) в (25):

$$\tau_{\text{стаб}} = \frac{1}{K \sqrt{1 + 2n \frac{\psi_{Zp}}{\omega_{Zp}}}} \operatorname{arctg} \frac{K \frac{\psi_{Zp}}{\omega_{Zp}}}{\sqrt{1 + 2n \frac{\psi_{Zp}}{\omega_{Zp}}}}, \quad (29)$$

На рис. 2 показані залежності кутової швидкості та кута повороту автомобіля в площині дороги від часу його руху в процесі динамічної стабілізації. На рис. 2а, б використано такі величини варіюваних параметрів: $\alpha = 25$, $\omega_{z_0} = 0,05\text{--}0,2 \text{ c}^{-1}$, $v_{\text{власн}} = 0,7 \text{ Гц}$, час реакції $\tau_p = 0,1 \text{ с}$, а на рис. 2 в, г — $\alpha = 25$, $\omega_{z_0} = 0,1 \text{ c}^{-1}$, $v_{\text{власн}} = 0,7 \text{ Гц}$, $\tau_p = 0,1 \text{ с}$. На рис. 2в прийняті такі позначення: $\omega_{z_1}(t)$, — $\omega_z(t)$, а на рис. 2г — $\psi_{z_1}(t)$, — $\psi_z(t)$. Час стабілізації курсового кута умовного автомобіля склав $0,106 \text{ с}$, початкове кутове керувальне прискорення $\varepsilon_{z_{\text{кер}0}} = 4,6 \text{ м/с}^2$, кутова швидкість автомобіля в площині дороги $\omega_{z_1} = -1,5 \text{ c}^{-1}$.

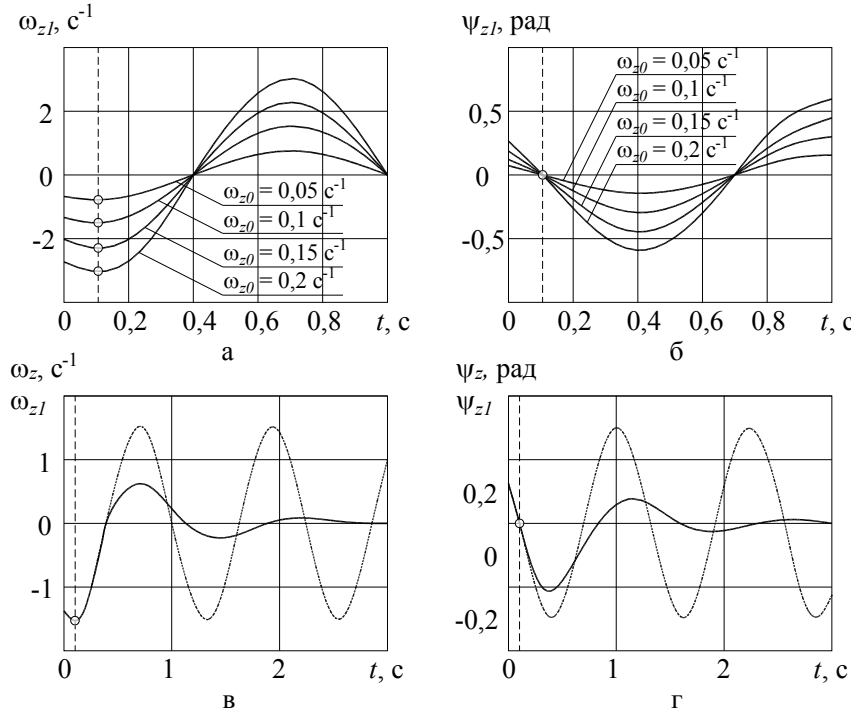


Рис. 2. Залежності кутової швидкості та кута повороту автомобіля в площині дороги від часу його руху в процесі динамічної стабілізації: а — $\omega_z(t)$; б — $\psi_z(t)$; в — $\omega_z(t)$ і $\omega_{z_1}(t)$; г — $\psi_z(t)$ і $\psi_{z_1}(t)$

Висновки

У результаті проведеного теоретичного дослідження визначені раціональні параметри динамічної стабілізації курсового кута у разі виникнення ризику автомобіля. До цих параметрів відносяться: час стабілізації курсового кута $\tau_{\text{стаб}}$; початкове керувальне (стабілізувальне) кутове прискорення $\varepsilon_{z_{\text{кер}0}}$, створюване початковим повертальним моментом; кругова частота повертального моменту $M_{\text{пов}}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Доброгорський М. В. Забезпечення стійкості легкового автомобіля при граничних режимах руху : автореф. дис.. на здобуття наук ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.02 «Автомобілі та трактори» / М. В. Доброгорський. — Харків, 2006. — 20 с.
2. Устойчивость колесных машин при заносе и способы ее повышения / [Подригало М. А., Волков В. П., Степанов В. Ю., Доброгорский М. В.], под ред. М. А. Подригало. — Харьков : изд-во ХНАДУ. — 2006. — 335 с.
3. Стабильность эксплуатационных свойств колесных машин / [Подригало М. А., Волков В. П., Карпенко В. А и др.]; под ред. М. А. Подригало. — Харьков : изд-во ХНАДУ. — 2003. — 614 с.
4. Подригало М. А. Управляемость колесных машин при установившемся движении / М. А. Подригало, Д. М. Клец, В. И. Гацько // Автомобильный транспорт : сб. науч. трудов. — Харьков : изд-во ХНАДУ 2011, Вып. 29. — С. 117—125.

Подригало Михайло Абович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та ремонту машин, **Клець Дмитро Михайлович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та ремонту машин, e-mail: prof_777@mail.ru.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

M. A. Podrygalo¹
D. M. Klets¹

The definition of rational parameters of automobile course angle dynamic stabilization at drifting

¹Kharkov National Automobile and Highway University

The results of rational parameters of vehicle course angle dynamic stabilization study are represented. The time of course angle stabilization, initial control stabilizing angular acceleration and turning angular frequency are determined.

Keywords: automobile, yaw, stabilization, course angle.

Podrygalo Mykhailo A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of The Chair of Manufacturing Engineering and machine maintenance, **Klets Dmytro M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Manufacturing Engineering and machine maintenance, e-mail: prof_777@mail.ru

М. А. Подригало¹
Д. М. Клець¹

Определение рациональных параметров динамической стабилизации курсового угла при рыскании автомобиля

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Приведены результаты исследования рациональных параметров динамической стабилизации курсового угла при рыскании автомобиля. Определено время стабилизации курсового угла; начальное управляющее стабилизирующее угловое ускорение; круговая частота поворачивающего момента.

Ключевые слова: автомобиль, рыскание, стабилизация, курсовой угол.

Подригало Михаил Абович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения и ремонта машин, **Клець Дмитрий Михайлович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения и ремонта машин, e-mail: prof_777@mail.ru