

## ДО ПИТАННЯ АНАЛІЗУ КУРСОВОЇ СТІЙКОСТІ РУХУ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ

*Розроблені узагальнена система та граф-модель, що містить множину факторів, які можуть значуще вплинути на курсову стійкість руху легкового автомобіля. Виконаний аналіз різних шляхів на граф-моделі, які можуть обумовити покращення стійкості руху.*

*Разработана обобщенная система и граф-модель, содержащая множество факторов, которые могут существенно влиять на курсовую устойчивость легкового автомобиля. выполнен анализ различных путей на граф-модели, которые могут улучшить устойчивость движения.*

*The generalized system and graph-model with factors influencing the car course-keeping stability are suggested. The analysis of different directions resulting in possible car course-keeping stability is done on the graph-model.*

**Постановка проблеми.** Існують дослідження, в яких розглядаються залежності КСР від кутів установки коліс, зносу протектора, матеріалу гуми тощо. Тобто вивчені впливи окремих або сукупності чинників, але вся множина значущих чинників одночасно не розглянута. Слід урахувати також достатній рівень розробки прикладних математичних матеріалів, що визначають динаміку автомобіля. Тому можна визначити проблему – необхідність комплексного розгляду впливів характеристик шин на курсову стійкість руху.

Аналіз курсової стійкості руху (КСР), що є важливою експлуатаційною властивістю швидкісного легкового автомобіля (ЛА), виконувався в різних роботах, в тому числі, в дослідженнях, які враховують зміну пружних властивостей шин [1,2]. Було доведено, що нерівномірні або змінні жорсткісні характеристики еластичних рушіїв значуще впливають на КСР.

**Мета статті** - аналіз можливих концепцій поліпшення КСР з урахуванням змінювання пружних властивостей еластичних шин.

В процесі дослідження розроблені узагальнена система (1) та граф-модель, що містить множину факторів, які можуть значуще вплинути на курсову стійкість легкового автомобіля, що рухається сухою чистою дорогою із твердим покриттям.

Основою для аналізу або синтезу КСР, з метою її поліпшення, є узагальнена (повна) система, що дозволяє оцінити вплив на курсову стійкість множини значущих конструктивних та збурюючих чинників

$$\begin{cases} \bar{Y}_1 \cdot \frac{b}{l} + \bar{Y}_2 \cdot \frac{a}{l} + \bar{X}_1 \cdot \theta + \frac{Q}{mg} - \frac{(v + \Delta \cdot \omega) \cdot \omega}{g} = 0; \\ \bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 + \bar{X}_1 \cdot \theta \cdot \frac{l}{b} - \bar{M}_1 - \bar{M}_2 + \frac{c \cdot Q \cdot l}{m \cdot g \cdot a \cdot b} + \frac{\Delta \cdot u \cdot \omega \cdot l}{g \cdot a \cdot b} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2$  - результуюча бічна сила, що діє в контакті колеса з дорогою, відповідно, на передню або задню вісь;

$\bar{X}_1$  - поздовжня сила тяги, що діє в контакті з дорогою колеса передньої ведучої вісі;

$l$  - база автомобіля, м;

$a, b$  - відстань, відповідно, від передньої та задньої вісі до центру мас, м;

$Q$  - зовнішнє збурююче навантаження на автомобіль, Н;

$m$  - маса автомобіля, кг;

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

$v, u$  - швидкість центру мас, відповідно, лінійна або бічна, м/с;

$\omega$  - кутова швидкість відносно вертикальної вісі, рад./с;

$\bar{M}_1, \bar{M}_2$  - результуючий стабілізуючий момент в контакті колеса, відповідно, передньої або задньої вісі;

$c, \Delta$  - зміщення центру мас, відповідно, поздовжнє або бічне, м.

Нижче розглянута граф-модель (рис. 1).

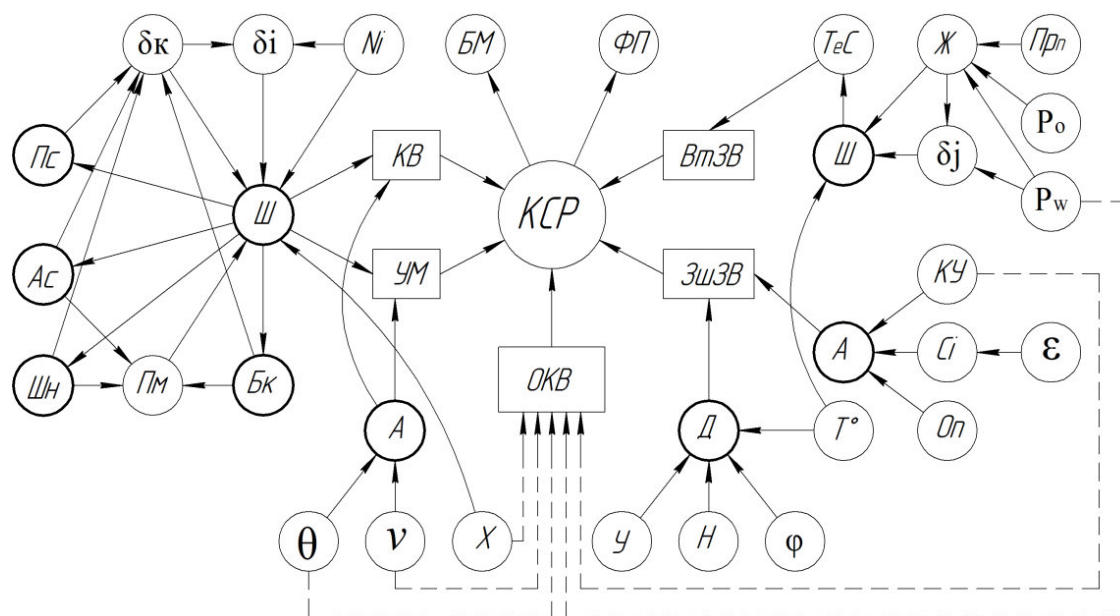


Рис. 1. Граф-модель, що містить множину факторів, які можуть значуще впливати на КСР

Канали (позначені в прямокутниках) показують напрямки дії: ВмЗВ – внутрішніх збурюючих впливів, ЗшЗВ – зовнішніх збурюючих впливів, ОКВ – оперативних керуючих впливів, КВ – конструкторських впливів, УМ – удосконалювання матеріалів. Об'єкти (кола виконані лінією основного контуру) означають шини: Ш – звичайна;  $B_k$  – з біонічним контактом з опорною поверхнею,  $A_c$  – з асиметричним рисунком протектора,  $P_c$  – зі структурою "павукова сітка",  $Ш_n$  – непневматична; інші об'єкти: А – автомобіль, Д – дорога. Характеристики позначені: Ж и  $P_0$  – жорсткості (інтегральні), відповідно, шини із внутрішнім тиском повітря й без нього,  $T_eC$  – технічний стан,  $P_{pn}$  – процеси, впливу яких підлягає шина,  $\delta_i$  – відведення і-тої вісі,  $\delta_j$  – відведення j-тої шини,

$\delta_k$  – відведення к-го колеса асиметричної шини,  $P_w$  – внутрішній тиск повітря в шині,  $K_U$  – кути установки керованих коліс,  $C_i$  – сили інерції,  $O_p$  – опір повітря,  $\phi$  – коефіцієнт зчеплення,  $H$  – нерівності,  $U$  – ухил дороги,  $v$  – лінійна поздовжня швидкість автомобіля,  $\theta$  – кут повороту колеса автомобіля,  $X$  – поздовжня сила,  $P_m$  – стабілізуючий (п'ятковий) момент,  $T^0$  – температура,  $N_i$  – вертикальне навантаження на  $i$ -ту вісь ( $i = 1, 2$ ),  $\varepsilon$  – зміщення центру мас АТЗ.

Стабілізуючий (п'ятковий) момент обумовлений зміщенням бічної сили відносно середньої точки контакту шини з опорною поверхнею.

Характеристиками рівня КСР в граф-моделі є біфуркаційна множина та фазовий портрет. Нижче, шляхом аналізу цих характеристик, оцінюється значущість впливів на курсову стійкість руху автомобіля окремих факторів множини: стабілізуючого моменту; положення центру мас; асиметричних (нерівномірних) жорсткісних характеристик шин; перемінної або різної жорсткості шин; кута розвалу, що регулюється під час руху; ухилу дороги, якою рухається автомобіль; нерівностей (уступів) на дорозі.

Для оцінки впливу стабілізуючого моменту на біфуркаційну діаграму і стійкість стаціонарних режимів руху досліджується шлях на граф-моделі  $P_m \rightarrow \Pi \rightarrow KV \rightarrow KCP$ . Проводиться аналіз впливу нелінійного п'яткового моменту при варіаціях останнього. Розглянутий момент має шина з асиметрією пружних властивостей, що обумовлена, наприклад, кутовою жорсткісною неоднорідністю.

Аналіз впливу на КСР п'яткових моментів з використанням біфуркаційних діаграм приводить до загального висновку про їхній стабілізаційний ефект: області параметрів, у яких існують стійкі стаціонарні режими, розширюються; небезпечні границі області стійкості змінюють свій характер (стають безпечнішими), що сприятливо позначається на безпеці руху при закритичних швидкостях.

З метою оцінки значущості впливу розподілу мас елементів автомобіля на біфуркаційну множину, в роботі проведений аналіз різновидів стаціонарних станів транспортного засобу. Досліджується шлях на граф-моделі:  $\varepsilon \rightarrow C_i \rightarrow A \rightarrow 3шЗВ \rightarrow KCP$ .

Встановлено, що втрата стійкості прямолінійного руху відбувається при значенні швидкості  $v_{кр}$ , величина якої залишається такою ж, як і для «симетричного» автомобіля. Наявність квадратичних членів у системі приводить до асиметрії фазового простору й початок координат не є вже симетричним рішенням (як у випадку  $\varepsilon = 0$ ).

Більш повна картина біфуркаційної множини одержана на основі чисельно-аналітичного методу продовження за двома параметрами ( $v, \theta$ ).

На рис. 2 наведена біфуркаційна множина для випадку несиметричної моделі автомобіля – центр мас зміщений від поздовжньої вісі на відстань  $\varepsilon = 0,2$ ;  $k_1 = k_2 = 0,8$ . Числа на БМ характеризують кількість стаціонарних режимів руху (СРР).

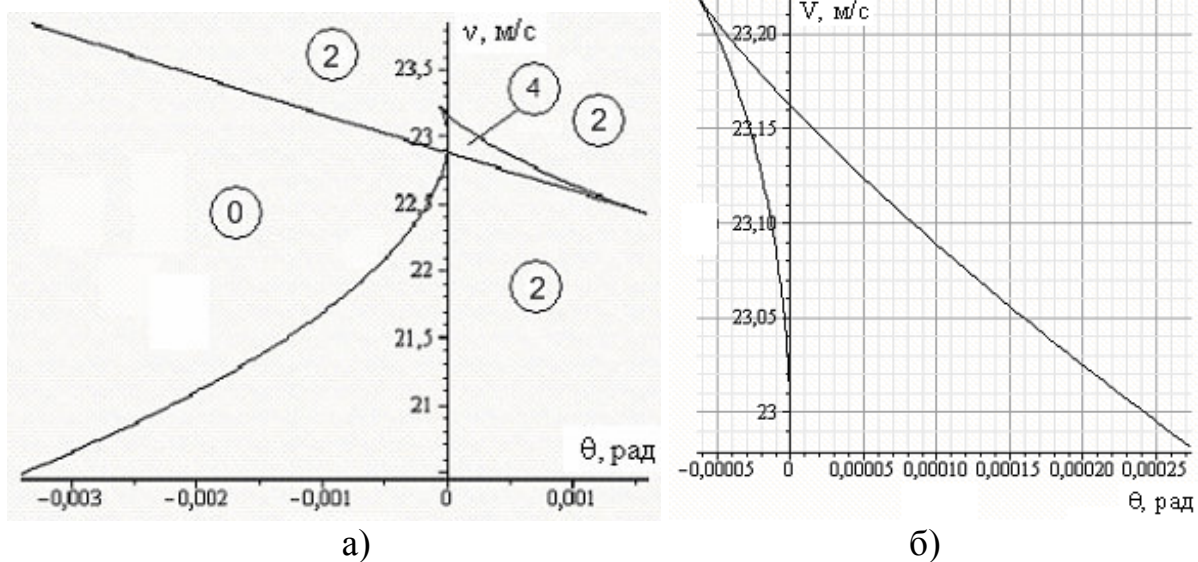


Рис. 2. Біфуркаційна множина для асиметричної моделі (а) та її фрагмент (б)

У випадку втрати біфуркаційною множиною симетричності, змінюється й число стаціонарних режимів руху (стійких і нестійких).

Наведений аналіз вказує на значущий вплив зсуву центру мас автомобіля на показники КСР. Для відновлення симетрії діаграми (поліпшення КСР) слід перевірити й поліпшити дію каналів КВ, УМ і ОКВ.

Нижче розглянутий шлях на графі  $A_c \rightarrow \delta_k \rightarrow \text{Ш} \rightarrow \text{КВ} \rightarrow \text{КСР}$  (рис. 1). Досліджені шини із запроєктованою асиметрією пружних властивостей з погляду їх сумарного впливу на стійкість і керованість автомобіля (перевірка симетричності біфуркаційної множини; розширення області стійкості в просторі керованих параметрів).

Аналіз системи лінійного наближення дає можливість оцінити вплив кожного з параметрів асиметрії на критичну швидкість прямолінійного руху, зокрема, залежності критичної швидкості від параметра  $m_1$  (корекція критичної швидкості обумовлена нелінійністю складової сили відведення). Після обчислення якобіана правих частин системи диференціальних рівнянь руху при незбурених значеннях фазових змінних і прирівнювання його визначника до нуля, одержаний вираз для визначення критичної швидкості

$$v_{\text{кр}}^2 = \frac{2k_1 k_2 (2\varphi_1^2 - 3q_1^2 \delta_{01}^2) l^2}{m(2k_1 a \varphi_1^2 - 3k_1 q_1^2 \delta_{01}^2 a - 2k_2 b \varphi_1^2)} \quad (2)$$

Побудовано біфуркаційну множину для моделі автомобіля. Метод продовження за двома параметрами ( $v$ ,  $\theta$ ) дає можливість визначити значення параметрів, за яких втрачається стійкість відповідних стаціонарних режимів руху автомобіля (одна така точка в площині керованих параметрів уже знайдена ( $v = v_{\text{кр}}$ ,  $\theta = 0$ )). Ці критичні значення параметрів є рішеннями системи кінцевих рівнянь

$$E1(v, u, \omega, \theta) = 0; E2(v, u, \omega, \theta) = 0; E33(v, u, \omega, \theta) = 0. \quad (3)$$

Рішення задачі Коші за початкових умов ( $v = v_{кр}$ ,  $\theta = 0$ ) задає границю біфуркаційної множини, яку треба визначити. Далі приведено чисельне рішення відповідної задачі Коші за різних значень параметрів асиметрії.

В рамках даного підходу можливе попереднє тестування різних шин із запроєктованою асиметрією пружних властивостей з погляду їх сумарного впливу на стійкість і керованість автомобіля (перевірка симетричності біфуркаційної множини; розширення області стійкості в просторі керованих параметрів). Параметр асиметрії жорсткісних властивостей коліс лівого і правого бортів (кутова неоднорідність) може істотно впливати на область стійкості автомобіля і може бути ототожнений з параметрами, що характеризують розвал коліс.

Рішення проблеми підвищення КСР виконується різними шляхами, у тому числі за рахунок використання шин зі змінною жорсткістю, яка є функцією бічної сили, а також за рахунок використання на задній вісі шин з більш широким поперечним профілем. Шини зі змінною бічною жорсткістю сприймають більші значення бічної сили, зміна величини якої характеризується “увігнутістю” після ділянки лінійної залежності. За рахунок використання шин зі змінною жорсткістю критична швидкість зросла з 22 м/с до 54 м/с, що суттєво покращує КСР автомобіля. При використанні на задній вісі шин з більшою шириною профілю ніж на передній, дія початкового збурювання призводить до переміщення центру мас за колом і початкових коливань керованого модуля, які надалі зменшуються та спостерігається стійкий круговий режим руху. При використанні шин з однаковою шириною профілю на обох осях автомобіля дія початкового збурювання призводить до переміщення центру мас за колом більшого радіусу і початкових коливань керованого модуля, які, на відміну від попереднього випадку, збільшуються. Проведений аналіз курсової стійкості руху легкового автомобіля за допомогою математичного моделювання дозволяє зробити наступні висновки: використання шин з більшою шириною профілю на задній (некерованій) вісі автомобіля призводить до того, що п’ятковий момент на цій вісі не змінює знак на більш широкому діапазоні кутів відведення, ніж п’ятковий момент на передній вісі, що сприяє підвищенню КСР автомобіля; поява п’яткових моментів призводить до значного поліпшення КСР моделі автомобіля (критична швидкість зросла з 37 до 64 м/с.); використання шин зі змінною жорсткістю суттєво покращує показники КСР автомобіля.

Практика автомобілебудування показала, що усунення негативного впливу на КСР автомобіля збурюючих факторів можна здійснити також шляхом регулювання розвалу коліс у процесі руху автомобіля на поворотах, які мають різну кривизну. Якщо розвал передніх коліс змінювати у бік збільшення доцентрової сили, а розвал задніх – у бік її зменшення, то радіус кривизни траєкторії руху збільшується, а автоколивання прагнуть до нуля. Таким чином стабілізуючий ефект підсилюється. Різні збурюючі впливи, як наслідок, можуть викликати порушення КСР автомобіля; якщо збурюючим впливом є уступ дороги, то викликане збурювання належить до області притягання початкового

прямолінійного стаціонарного руху, і регулювання розвалу, у цьому випадку, недоцільне. Підвищення швидкості руху автомобіля вище критичної (при його переміщенні на поворотах) викликає автоколивання керованого модуля - регулювання кута розвалу коліс (передніх, задніх або одночасно усіх) може знизити амплітуду автоколивачь.

Метою дослідження динамічних якостей автомобіля при наявності постійних зовнішніх силових збурювачь є визначення реакцій автомобіля на поперечні ЗВ, наприклад, поперечний ухил дороги або бічний вітер. Після проведення відповідного математичного аналізу зроблено висновок, що поворотом передніх коліс у належний бік можна усунути вплив бічної сили й одержати бажаний режим руху, наприклад, зберегти прямолінійний рух автомобіля, на який діє бічне зовнішнє силове збурення.

**Висновки.** Таким чином, всі фактори, вплив яких на КСР підлягав дослідженню, значуще впливають на курсову стійкість руху легкових автомобілів. Зі зміною значень наведених факторів, на біфуркаційній діаграмі змінювалась кількість областей, що характеризують число стаціонарних режимів руху автомобіля в цілому, а також наявність або відсутність між ними стійких режимів руху. Якщо використовувати дію означених вище факторів цілеспрямовано, то можна компенсувати негативний вплив на КСР таких факторів як зсув положення центру мас автомобіля або нерівномірне вертикальне навантаження за рахунок, наприклад, використання шин з визначеним п'ятковим моментом або регулювання кута розвалу під час руху автомобіля.

### Література

1. Макаров В.А. Про один підхід до оцінки впливу жорсткісної неоднорідності еластичної пневматичної шини на стійкість руху дорожнього транспортного засобу / В.А. Макаров, В.Г. Хребет, В.М. Дугельний // Вісник Центрального наукового центру Транспортної академії України. – 2000. – Вип. 3. – С. 95 – 96.
2. Макаров В.А. Повышение работоспособности автомобиля путем управления жесткостными характеристиками шин / В.А. Макаров, В.Н. Дугельный // Автомобильный транспорт : сб. науч. трудов. – Х. : ХГАДТУ, 2000. – С. 43 – 45.