

УДК 629.113

ДО ПИТАННЯ АНАЛІЗУ КУРСОВОЇ СТІЙКОСТІ РУХУ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ

В.А. Макаров, доцент, д.т.н., Донецька академія автомобільного транспорту

Анотація. Розроблено узагальнену систему та граф-модель, що містить множини факторів, які можуть значною мірою вплинути на курсову стійкість руху легкового автомобіля. Виконано аналіз різних шляхів на граф-моделі, які можуть обумовити покращення стійкості руху.

Ключові слова: узагальнена система, граф-модель, курсова стійкість руху.

К ВОПРОСУ ОБ АНАЛИЗЕ КУРСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

В.А. Макаров, доцент, д.т.н., Донецкая академия автомобильного транспорта

Аннотация. Разработаны обобщенная система и граф-модель, которые содержат множество факторов, значительно влияющих на курсовую устойчивость движения легкового автомобиля. Выполнен анализ различных путей на граф-модели, которые могут обусловить улучшение устойчивости движения.

Ключевые слова: обобщённая система, граф-модель, курсовая устойчивость движения.

ANALYSIS OF MOTORCAR COURSE-KEEPING STABILITY

**V. Makarov, Associate Professor, Doctor of Technical Science,
Donetsk Academy of Automobile Transport**

Abstract. The generalized scheme and graph-model with factors influencing the motorcar course-keeping stability are suggested. The analysis of possible variants improving the motorcar course-keeping stability is presented in the graph-model.

Key words: generalized scheme, graph-model, course-keeping stability.

Вступ

Існують дослідження, в яких розглядаються залежності КСР від кутів установки коліс, зносу протектора, матеріалу гуми тощо. Тобто вивчено впливи окремих чинників або їх сукупності, але водночас не розглянуто достатньо репрезентативної множини значущих чинників.

Аналіз публікацій

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]. Було доведено, що нерівномірні або змінні жорсткісні характеристики еластичних рушіїв великою мірою впливають на КСР.

Слід урахувати також достатній рівень розробки прикладних математичних матеріалів, що визначають динаміку автомобіля.

Тому можна визначити проблему комплексного розгляду впливів характеристик шин на курсову стійкість руху.

Мета і постановка задачі

Метою статті є аналіз можливих концепцій поліпшення КСР за рахунок змінювання пружних властивостей еластичних шин.

У процесі дослідження розроблено узагальнену систему (1) та граф-модель, що містить множини факторів, які можуть значною мірою 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 збудувальних 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 – результівна бічна сила, що діє в контактї колеса з дорогою відповідно на передню або задню вісь; \bar{X}_1 – поздовжня сила тяги, що діє в контактї з дорогою колеса передньої тягової осі; l – база автомобіля, м; a, b – відстань відповідно від передньої та задньої осі до центру мас, м; Q – зовнішнє збудувальне навантаження на автомобіль, Н; m – маса автомобіля, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; v, u – швидкість центру мас відповідно лінійна або бічна, м/с; ω – кутова швидкість відносно вертикальної осі, рад/с;

\bar{M}_1, \bar{M}_2 – результівний стабілізуючий момент у контактї колеса відповідно передньої або задньої осі; c, Δ – зміщення центру мас відповідно поздовжнє або бічне, м.

Нижче розглянуто граф-модель (рис. 1).

Канали (позначені у прямокутниках) показують напрямки дії: ВтЗВ – внутрішніх збудувальних впливів, ЗшЗВ – зовнішніх збудувальних впливів, ОКВ – оперативних керуючих впливів, КВ – конструкторських впливів, УМ – удосконалення матеріалів. Об'єкти (кола виконані лінією основного контуру) означають шини: Ш – звичайну; Бк – з біонічним контактм з опорною поверхнею, Ас – з асиметричним рисунком протектора, Пс – зі структурою «павукова сітка», Шн – непневматичну; інші об'єкти: А – автомобіль, Д – дорогу. Характеристики позначені: Ж і Р₀ – жорсткості (інтегральні), відповідно шини із внутрішнім тиском повітря й без нього, ТеС – технічний стан, Прп – процеси, впливу яких зазнає шина, δ_i – відведення i -ї осі, δ_j – відведення j -ї шини, δ_k – відведення k -го колеса асиметричної шини, Р_w – внутрішній тиск повітря в шині, КУ – кути установки тяжних коліс, Сі – сили інерції, Оп – опір повітря, ϕ – коефіцієнт зчеплення, Н – нерівності, У – ухил дороги, v – лінійна поздовжня швидкість автомобіля, θ – кут повороту колеса автомобіля, X – поздовжня сила, П_м – стабілізуючий (п'ятковий) момент, T⁰ – температура, N_i – вертикальне навантаження на i -ту вісь ($i = 1, 2$), ϵ – зміщення центру мас АТЗ.

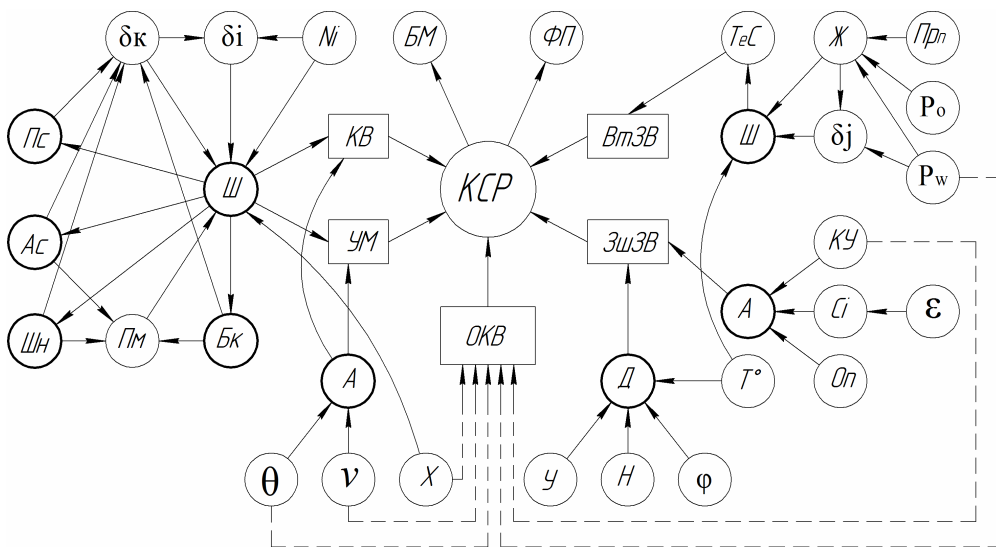


Рис. 1. Граф-модель, що містить множини факторів, які можуть значною мірою впливати на КСР

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

Характеристиками рівня КСР у 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; вертикального навантаження; опору повітря під час руху автомобіля; 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 $\Pi_m \rightarrow \text{Ш} \rightarrow \text{КВ} \rightarrow \text{КСР}$. Проводиться аналіз впливу нелінійного п'яткового моменту при варіаціях останнього. Розглянутий момент має шина з асиметрією пружних властивостей, що обумовлена, наприклад, кутвою 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 за закритичних швидкостей. З метою оцінки значущості впливу розподілу мас елементів автомобіля на біфуркаційну множину, в роботі проведено аналіз різновидів стаціонарних станів транспортного засобу. Досліджується шлях на граф-моделі: $\varepsilon \rightarrow C_i \rightarrow A \rightarrow \text{ЗшЗВ} \rightarrow \text{КСР}$.

Встановлено, що втрата стійкості прямолінійного руху відбувається за значення 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 розв'язком (як у випадку $\varepsilon = 0$).

Більш повну картину біфуркаційної множини одержано на основі чисельно-аналітичного методу продовження за двома параметрами (v, θ).

На рис. 2 наведено біфуркаційну множину для випадку несиметричної моделі автомобіля – центр мас зміщений від поздовжньої осі на відстань $\varepsilon = 0,2$; $k_1 = k_2 = 0,8$. Числа на БМ характеризують кількість СРР.

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.

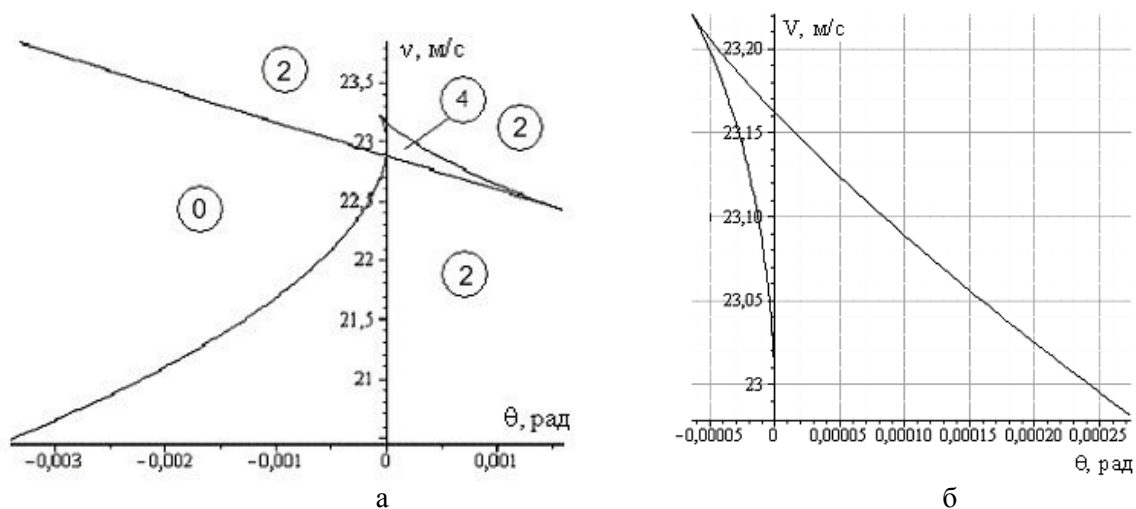


Рис. 2. Біфуркаційна множина для асиметричної моделі (а) та її фрагмент (б)

Нижче розглянуто шлях на графі $A_c \rightarrow \delta_k \rightarrow \text{Ш} \rightarrow \text{КВ} \rightarrow \text{КСР}$ (рис. 1). Досліджено шини із запроєктованою асиметрією пружних властивостей, з погляду їх сумарного впливу на стійкість і керованість автомобіля (перевірка симетричності біфуркаційної множини; розширення області стійкості у 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 за незбурених значень фазових змінних і прирівняння його визначника до нуля одержано вираз 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, θ) дає можливість визначити значення параметрів, за яких втрачається стійкість відповідних стаціонарних режимів руху автомобіля (одну таку точку у площині керованих параметрів уже знайдено ($v = v_{\text{кр}}, \theta = 0$)). Ці критичні значення параметрів є розв'язками системи кінцевих рівнянь

$$\begin{aligned} E1(v, u, \omega, \theta) &= 0; \\ E2(v, u, \omega, \theta) &= 0; \\ E33(v, u, \omega, \theta) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Розв'язок задачі Коші за початкових умов ($v = v_{\text{кр}}, \theta = 0$) задає границю біфуркаційної множини, яку треба визначити. Далі приведено чисельний розв'язок 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 у 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.

Вирішення проблеми підвищення КСР виконується різними шляхами, у тому числі й за рахунок використання шин зі змінною жорсткістю, яка є функцією бічної сили, а також за рахунок використання на задній осі 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 осі шин з більшою шириною профілю, ніж на передній, дія початкового збурювання приводить до переміщення центру мас по колу 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 приводить до переміщення центру мас по колу більшого радіуса 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) осі автомобіля приводить до того, що п'ятковий момент на цій осі не змінює знак на більш широкому діапазоні кутів відведення, ніж п'ятковий момент на передній осі, що сприяє підвищенню КСР автомобіля; поява п'яткових моментів приводить 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 збурювальних 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 збурювальні впливи, як наслідок, можуть викликати порушення КСР автомобіля; якщо збурювальним впливом є уступ дороги, то викликане збурювання належить до області притягання початкового прямолінійного стаціонарного руху, і регулювання розвалу, в цьому випадку, є недоцільним. 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 автоколивань.

Метою дослідження динамічних якостей автомобіля, за наявності постійних зовнішніх силових збурювань, 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 збурювання.

Висновки

Таким чином, всі фактори, вплив яких на КСР підлягав дослідженню, значною мірою впливають на курсову стійкість руху легко-

вих 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.

Рецензент: В.І. Клименко, професор, к.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 16 жовтня 2012 р.
