

629.3.017

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СЛУЖЕБНЫХ ТОРМОЖЕНИЙ

М.А. Подригало, проф., д.т.н., А.И. Туренко, асп.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* Приведены результаты исследования влияния различных возмущающих факторов на устойчивость автомобиля при служебных торможениях. Предложен новый критерий – коэффициент возмущающего воздействия.

*Ключевые слова:* возмущающий фактор, устойчивость, служебное торможение, коэффициент возмущающего воздействия, тормозная сила.

## ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ АВТОМОБІЛЯ ПРИ ДІЇ ЗБУРЮВАНЬ У ПРОЦЕСІ СЛУЖБОВИХ ГАЛЬМУВАНЬ

М.А. Подригало, проф., д.т.н., А.І. Туренко, асп.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Наведено результати досліджень впливу різних збурюючих факторів на стійкість автомобіля під час службових гальмувань. Запропоновано новий критерій – коефіцієнт збурюючої дії.

*Ключові слова:* збурюючий фактор, стійкість, службове гальмування, коефіцієнт збурюючої дії, гальмівна сила.

## EVALUATION OF VEHICLE STABILITY UNDER THE ACTION OF DISTURBANCES IN THE PROCESS OF SERVICE BRAKING

M. Podryhalo, Prof., D. Sc. (Eng), A. Turenko, P. G.,  
Kharkiv National Automobile and Highway University

*Abstract.* The results of research of influence of various disturbing factors on vehicle stability at service brake applications are presented. A new criterion – the coefficient of the disturbance factor is offered.

*Key words:* disturbing factor, stability, service braking, disturbance coefficient, braking force.

### Введение

При служебных торможениях на передних и задних колесах автомобиля имеется запас по сцеплению, позволяющий противодействовать боковым силам, вызванным различными возмущениями. Однако уровень возмущающих воздействий может превысить имеющийся запас по сцеплению колес с дорогой, что может привести к потере автомобилем устойчивости движения.

В настоящей статье приведены результаты исследования влияния различных возмущающих факторов на устойчивость автомобиля при служебных торможениях. Предложен новый критерий – коэффициент возмущающего воздействия.

### Анализ публикаций

Приведенный в работе [1] анализ ряда исследований показал, что в реальных условиях движения автомобильного колеса на него практически всегда действует боковая сила, а

фактическая траектория движения автомобиля состоит из сопряженных криволинейных участков. Боковые силы на колесах могут возникнуть в следующих случаях [1]:

- прямолинейного движения по полосе «динамического габарита»;
- изменения углов установки передних колес при движении;
- нарушения геометрии ходовой части автомобиля;
- асимметричности шин;
- при повороте и маневрировании;
- при экстренном торможении с маневрированием;
- при неравенстве тормозных сил по бортам;
- при поперечном уклоне дороги;
- при боковом ветре.

Однако в работе [1] не рассмотрено служебное торможение с маневрированием или служебное торможение, сопровождающееся малыми колебаниями направляющих колес относительно своего нейтрального положения. Не рассмотрено также служебное торможение на поперечном уклоне дороги.

#### Цель и постановка задачи

Целью исследования является повышение устойчивости автомобиля при служебных торможениях путем совершенствования методов проектирования за счет учета воздействия различных возмущающих факторов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи оценки устойчивости автомобиля при служебных торможениях:

- при действии боковой силы на поперечном уклоне дороги;
- при малых колебаниях направляющих колес относительно нейтрального положения;
- при действии в плоскости дороги поворачивающего момента.

#### Оценка устойчивости автомобиля при действии боковой силы на поперечном уклоне дороги

Коэффициент устойчивости  $k_{уст}$  автомобиля при торможении определяется запасом по сцеплению с дорогой на колесах передней и задней осей. Соотношение предельных по сцеплению боковых сил на этих колесах и определяет способность автомобиля противостоять потере устойчивости движения.

В случае действия боковой силы на поперечном уклоне дороги на передней и задней осях действуют боковые силы, определяемые соотношениями

$$P_{\delta 1} = \frac{b}{L} G_a \sin \gamma ; \quad (1)$$

$$P_{\delta 2} = \frac{a}{L} G_a \sin \gamma , \quad (2)$$

где  $P_{\delta 1}$ ,  $P_{\delta 2}$  – суммарные боковые силы, действующие на колеса передней и задней осей автомобиля;  $a$  – расстояние от передней оси до проекции центра масс автомобиля на горизонтальную плоскость, проходящую через указанную ось, м;  $b$  – расстояние от задней оси до проекции центра масс автомобиля на горизонтальную плоскость, проходящую через указанную ось, м;  $L$  – колесная база автомобиля, м;  $G_a$  – общий вес автомобиля, Н;  $\gamma$  – угол поперечного уклона дороги.

Введем показатель – коэффициент возмущающего воздействия

$$K_{возм} = \frac{b P_{\delta 2}}{a P_{\delta 1}} = \frac{b \frac{a}{L} G_a \sin \gamma}{a \frac{b}{L} G_a \sin \gamma} = 1 . \quad (3)$$

Для обеспечения устойчивости автомобиля при служебных торможениях необходимо, чтобы коэффициент устойчивости был больше, чем коэффициент возмущающего воздействия. Поскольку  $K_{возм}$  в рассматриваемом случае равен единице, то можно сделать вывод о том, что если выполняется условие устойчивости автомобиля при отсутствии рассматриваемого возмущения, то и при его действии машина будет устойчива.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что если  $k_{уст} \geq 1$ , то при действии любой боковой силы, приложенной в центре масс (центральной боковой силы), автомобиль сохраняет устойчивость в процессе торможений.

#### Оценка устойчивости автомобиля при малых колебаниях направляющих колес относительно нейтрального положения

В работе [2] определены суммарные боковые реакции дороги на передних и задних колесах при совершении автомобилем неустановившегося поворота. Поскольку эти реакции рав-

ны действующим боковым силам, то уравнения для них можно представить в виде [2]

$$P_{\delta 1} = R_{\delta 1} = m_a \sec \bar{\alpha} \times \left( \begin{array}{l} \operatorname{tg} \bar{\alpha} \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} \frac{dV_a}{dt} + \\ + V_a^2 \frac{b}{L^2} \operatorname{tg} \bar{\alpha} + V_a \frac{b^2 + i_z^2}{L^2 \cos^2 \bar{\alpha}} \frac{d\bar{\alpha}}{dt} \end{array} \right) - R_{k1} \operatorname{tg} \bar{\alpha}; \quad (4)$$

$$P_{\delta 2} = R_{\delta 2} = m_a \times \left( \begin{array}{l} \operatorname{tg} \bar{\alpha} \frac{ab - i_z^2}{L^2} \frac{dV_a}{dt} + \\ + V_a \frac{a}{L^2} \operatorname{tg} \bar{\alpha} + V_a \frac{ab - i_z^2}{L^2 \cos^2 \bar{\alpha}} \frac{d\bar{\alpha}}{dt} \end{array} \right), \quad (5)$$

где  $\bar{\alpha}$  – средний угол поворота направляющих колес;  $i_z$  – радиус инерции автомобиля относительно вертикальной оси;  $R_{k1}$  – суммарная касательная реакция на колесах передней оси автомобиля;  $V_a$  – линейная скорость автомобиля.

При прямолинейном движении автомобиля  $\bar{\alpha} \rightarrow 0$ . Принимая  $\bar{\alpha} = 0$ , преобразуем выражения (4) и (5) к виду

$$P_{\delta 1} = m_a V_a \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} \frac{d\bar{\alpha}}{dt}; \quad (6)$$

$$P_{\delta 2} = m_a V_a \frac{ab - i_z^2}{L^2} \frac{d\bar{\alpha}}{dt}. \quad (7)$$

Коэффициент возмущающего воздействия

$$K_{\text{возм}} = \frac{b P_{\delta 2}}{a P_{\delta 1}} = \frac{b ab - i_z^2}{a b^2 + i_z^2}. \quad (8)$$

Условие устойчивости автомобиля при служебных торможениях

$$K_{\text{возм}} \leq k_{\text{уст}}, \quad (9)$$

или с учетом [2]

$$k_{\text{уст}} = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{\varphi^2 \left( \frac{a}{L} - \frac{j_x}{g} \frac{h - r_d}{L} \right)^2 - (1 - \beta)^2 \frac{j_x^2}{g^2}}{\varphi^2 \left( \frac{b}{L} + \frac{j_x}{g} \frac{h - r_d}{L} \right)^2 - \beta^2 \frac{j_x^2}{g^2}}, \quad (10)$$

где  $\varphi$  – коэффициент сцепления колес с дорогой;  $j_x$  – продольное замедление автомоби-

ля,  $m/c^2$ ;  $h$  – высота центра масс автомобиля (от опорной поверхности), м;  $r_d$  – динамический радиус колес, м;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\beta$  – коэффициент распределения тормозной силы на переднюю ось.

Получим

$$\frac{ab - i_z^2}{b^2 + i_z^2} \leq \sqrt{\frac{\varphi^2 \left( \frac{a}{L} - \frac{j_x}{g} \frac{h - r_d}{L} \right)^2 - (1 - \beta)^2 \frac{j_x^2}{g^2}}{\varphi^2 \left( \frac{b}{L} + \frac{j_x}{g} \frac{h - r_d}{L} \right)^2 - \beta^2 \frac{j_x^2}{g^2}}. \quad (11)$$

Из выражения (11) получим неравенство

$$\left( \frac{j_x}{g} \right)^2 + 2 \frac{j_x}{g} \times \left[ \frac{\varphi^2 \frac{h - r_d}{L} \left[ \frac{a}{L} + \frac{b}{L} \left( \frac{ab - i_z^2}{b^2 + i_z^2} \right)^2 \right]}{1 - 2\beta + \left[ \beta^2 - \left( \varphi \frac{h - r_d}{L} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{ab - i_z^2}{b^2 + i_z^2} \right)^2 \right]} - \frac{\frac{a^2}{L^2} + \frac{b^2}{L^2} \left( \frac{ab - i_z^2}{b^2 + i_z^2} \right)^2}{1 - 2\beta + \left[ \beta^2 - \left( \varphi \frac{h - r_d}{L} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{ab - i_z^2}{b^2 + i_z^2} \right)^2 \right]} \right] \leq 0 \quad (12)$$

Решая квадратное неравенство, находим область значений  $j_x/g$ , соответствующих устойчивому состоянию автомобиля при служебных торможениях

$$\frac{j_x}{g} \leq \frac{\varphi^2 \frac{h - r_d}{L} \left[ \frac{a}{L} + \frac{b}{L} \left( \frac{ab - i_z^2}{b^2 + i_z^2} \right)^2 \right]}{1 - 2\beta + \left[ \beta^2 - \left( \varphi \frac{h - r_d}{L} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{ab - i_z^2}{b^2 + i_z^2} \right)^2 \right]} \times \left\{ \left[ \frac{1 + \left[ \frac{1 - 2\beta}{\varphi^2 \frac{h - r_d}{L} \left[ \frac{a}{L} + \frac{b}{L} \left( \frac{ab - i_z^2}{b^2 + i_z^2} \right)^2 \right]} + \left[ \beta^2 - \left( \varphi \frac{h - r_d}{L} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{ab - i_z^2}{b^2 + i_z^2} \right)^2 \right]} \right]^2}{\varphi^2 \frac{h - r_d}{L} \left[ \frac{a}{L} + \frac{b}{L} \left( \frac{ab - i_z^2}{b^2 + i_z^2} \right)^2 \right]} \right] - 1 \right\}. \quad (13)$$

Полученное аналитическое выражение позволяет учесть влияние геометрических параметров автомобиля и распределение тормозных сил между осями на устойчивость автомобиля при возникновении малых колебаний направляющих колес в процессе служебного торможения. Правая часть уравнения (13) определяет максимально допустимую по условию устойчивости величину  $\left(\frac{j_x}{g}\right)_{\max}$ .

Расчеты, проведенные по зависимости (13), показывают, что с увеличением коэффициента  $\beta$  происходит уменьшение  $\left(\frac{j_x}{g}\right)_{\max}$ , значение которого становится минимальным при  $\beta \rightarrow 1$ . С увеличением коэффициента сцепления  $\phi$  величина  $\left(\frac{j_x}{g}\right)_{\max}$  также снижается.

#### Оценка устойчивости автомобиля при действии в плоскости дороги поворачивающего момента

Причинами появления поворачивающего момента при служебном торможении могут быть следующие факторы:

- неравномерность тормозных сил по бортам автомобиля;
- боковое смещение центра масс автомобиля относительно продольной оси;
- неравномерность коэффициентов сопротивления качению по бортам автомобиля;
- нарушение геометрии ходовой части автомобиля (смещение и перекос мостов, деформация рамы или кузова автомобиля).

Суммарные боковые силы на передней и задней осях автомобиля при действии поворачивающего момента  $M_{\text{пов}}$

$$P_{\delta 1} = P_{\delta 2} = \frac{M_{\text{пов}}}{L}. \quad (14)$$

Коэффициент возмущающего воздействия

$$K_{\text{возм}} = \frac{b M_{\text{пов}} / L}{a M_{\text{пов}} / L} = \frac{b}{a}. \quad (15)$$

С учетом (10) определим условие сохранения устойчивости при действии поворачивающе-

го момента в процессе служебного торможения.

Выполняя неравенство (9), получим

$$1 \leq \frac{b}{a} \sqrt{\frac{\left(\frac{a}{L} - \frac{j_x}{g} \frac{h-r_d}{L}\right)^2 - (1-\beta)^2 \frac{j_x^2}{g^2}}{\left(\frac{b}{L} + \frac{j_x}{g} \frac{h-r_d}{L}\right)^2 - \beta^2 \frac{j_x^2}{g^2}}}. \quad (16)$$

Преобразовав неравенство (16), получим

$$\frac{j_x^2}{g^2} (2\beta - 1) - 2 \frac{j_x}{g} \phi^2 \frac{h-r_d}{L} + \phi^2 \frac{a-b}{L} \geq 0. \quad (17)$$

Решение неравенства (17) имеем в виде

$$\frac{j_x}{g} \leq \frac{\phi^2 (h-r_d)}{L(2\beta-1)} \times \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{L(2\beta-1)}{\phi^2} \frac{a-b}{(h-r_d)^2}} \right]. \quad (18)$$

Таким образом, при выполнении условия (18) автомобиль будет сохранять курсовую устойчивость при торможении, независимо от величины поворачивающего момента  $M_{\text{пов}}$ .

Определим из неравенства (17) закон изменения коэффициента распределения тормозной силы на переднюю ось, обеспечивающий устойчивость автомобиля при действии поворачивающего момента в процессе служебного торможения. Преобразовав (17) относительно  $\beta$ , получим

$$\beta \geq 0,5 + \phi^2 \frac{h-r_d}{L} \frac{g}{j_x} \left( 1 - 0,5 \frac{a-b}{h-r_d} \frac{g}{j_x} \right). \quad (19)$$

Анализируя выражение (19), можно сделать вывод о том, что при  $h=r_d$  и

$$1 - 0,5 \frac{a-b}{h-r_d} \frac{g}{j_x} = 0 \quad (20)$$

величина  $\beta$  должна быть больше 0,5 по условию сохранения курсовой устойчивости. Из (20) определим

$$\frac{j_x}{g} = 0,5 \frac{a-b}{h-r_d}. \quad (21)$$

При  $a = b = L/2$  величина  $\frac{j_x}{g} = 0$ , а неравенство (19) примет вид

$$\beta \geq 0,5 + \varphi^2 \frac{h - r_d}{L} \frac{g}{j_x}. \quad (22)$$

Принимая во внимание уравнение

$$\beta_{\text{ид}}^{**} = 0,5 + \frac{g}{j_x} \varphi^2 \frac{h - r_d}{L}, \quad (23)$$

можно сделать вывод о том, что для автомобиля с центром масс, расположенным посередине базы ( $a = b = L/2$ ), условие устойчивости при действии поворачивающего момента в процессе служебного торможения будет соблюдаться, если

$$\beta \geq \beta_{\text{ид}}^{**}, \quad (24)$$

где  $\beta_{\text{ид}}^{**}$  – идеальный коэффициент распределения тормозной силы на переднюю ось при максимальном коэффициенте сцепления.

### Выводы

Для оценки влияния возмущений на устойчивость автомобиля при служебных торможениях предложен новый критерий – коэф-

фициент возмущающего воздействия. Если указанный критерий не превышает коэффициента устойчивости, то автомобиль устойчив, а в противном случае – теряет устойчивость.

Определено, что при действии центральной боковой силы автомобиль, имеющий  $k_{\text{уст}} \geq 1$ , всегда сохраняет устойчивость. Определено условие, при выполнении которого автомобиль сохраняет устойчивость в процессе служебного торможения и возникновении малых колебаний направляющих колес.

### Литература

1. Петров М.А. Работа автомобильного колеса в тормозном режиме / М.А. Петров. – Омск: Западносибирское книжное издательство, 1973. – 144 с.
2. Стабильность эксплуатационных свойств колесных машин / М.А. Подригало, В.П. Волков, В.А. Карпенко; под ред. М.А. Подригало. – Х.: ХНАДУ, 2003. – 616 с.

Рецензент: В.П. Волков, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 15 июня 2015 г.