

УДК 621.863.2

ДВИЖЕНИЕ ЖЕСТКОГО АВТОМОБИЛЬНОГО КОЛЕСА ПРИ ДЕЙСТВИИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА И ТОЛКАЮЩЕЙ СИЛЫ

М.А. Подригало, профессор, д.т.н., Н.Н. Потапов, ассистент, ХНАДУ

Аннотация. Определен дополнительный режим качения колеса, при котором на колесо действует крутящий момент и толкающая сила. В этом режиме касательная реакция может иметь как положительное, так и отрицательное направление. Получены аналитические зависимости, позволяющие описать вынужденный режим качения колеса.

Ключевые слова: автомобильное колесо, толкающая сила, крутящий момент, касательная реакция, скольжение, буксование.

РУХ ЖОРСТКОГО АВТОМОБІЛЬНОГО КОЛЕСА ПРИ ДІЇ КРУТНОГО МОМЕНТУ ТА ШТОВХАЮЧОЇ СИЛИ

М.А. Подригало, професор, д.т.н., М.М. Потапов, асистент, ХНАДУ

Анотація. Визначено додатковий режим кочення колеса, за якого на колесо діє крутний момент та штовхальна сила. У цьому режимі дотична реакція може мати як позитивний, так і негативний напрямок. Отримано аналітичні залежності, що дозволяють описати змушений режим кочення колеса.

Ключові слова: автомобільне колесо, штовхальна сила, крутний момент, дотична реакція, ковзання, буксування.

MOVEMENT OF RIGID AUTOMOBILE WHEEL AT ACTION OF TWISTING MOMENT AND PUSHING FORCE

M. Podrigalo, Professor, Doctor of Technical Science, N. Potapov, assistant, KhNAHU

Abstract. The additional mode of wheel rolling at which the wheel is influenced by the twisting moment and pushing force is determined. In this mode the tangent reaction can have both a positive and negative direction. The analytical dependences that allow describing the compelled mode wheel rolling are obtained.

Key words: motor-car wheel, twisting moment, pushing force, tangent reaction, sliding, skidding.

Введение

В классической теории автомобиля предложено рассматривать пять режимов качения автомобильного колеса: ведущий, свободный, нейтральный, ведомый и тормозной. При ведущем и тормозном режимах к колесу приложены крутящий и тормозной моменты соответственно. При ведомом режиме – толкающая сила. При свободном режиме момент сопротивления качению уравнивается моментом от толкающей силы. При этом касательная реакция дороги в пятне контакта равна нулю. При нейтральном режиме каче-

ния величина касательной реакции в пятне контакта изменяется в пределах от нуля до силы сопротивления качению. Однако не рассмотрен режим качения колеса при одновременном действии толкающей силы и крутящего момента, что характерно для случая циркуляции мощности бездифференциального автомобиля с несколькими ведущими мостами.

В настоящей статье рассмотрен указанный режим, названный авторами вынужденным режимом качения автомобильного колеса.

Анализ публикаций

В работах Е.А. Чудакова [1, 2] определены пять основных режимов качения автомобильного колеса:

- ведущий режим (к колесу приложен активный крутящий момент);
- ведомый режим (к колесу приложена активная толкающая сила);
- свободный режим (колесо нагружено небольшим активным крутящим моментом, равным по величине моменту сопротивления качению); в этом случае касательная реакция дороги на колесе равна нулю;
- нейтральный режим, характеризующийся тем, что качение колеса осуществляется и активным крутящим моментом (по величине меньшим, чем момент сопротивления качению), и активной толкающей силой; при этом касательная реакция дороги на колесо изменяется от нуля до величины, равной силе сопротивления качению [2];
- тормозной режим, при котором к колесу приложен тормозной момент.

Таким образом, нейтральный режим занимает промежуточное положение между ведомым и свободным режимами в том случае, если оценку осуществлять по величине и направлению касательной реакции, возникающей в контакте колеса с дорогой.

Указанные режимы рассматривались в работах Петрушова В.А. с соавторами [3]. Однако в известных исследованиях [1–7] не рассмотрен режим движения автомобильного колеса при действии активных крутящего момента и толкающей силы, приложенной к оси. Этот режим движения занимает промежуточное положение между ведущим и ведомым режимами, поскольку касательная реакция дороги на колесе может принимать как положительное, так и отрицательное направление в зависимости от соотношения величин активных крутящего момента и толкающей силы. Такой режим движения автомобильного колеса можно назвать вынужденным режимом, являющимся следствием возникновения циркуляции мощности в автомобилях с несколькими ведущими мостами при отсутствии межосевых дифференциалов.

Цель и постановка задачи

Целью исследования является оценка параметров движения жесткого автомобильного

колеса при действии активных крутящего момента и толкающей силы.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить вектор касательной реакции дороги в контакте жесткого колеса с дорогой;
- провести анализ уравнения, определяющего величину и направление касательной реакции дороги.

Определение вектора касательной реакции дороги

На рис. 1 приведена схема нагружения жесткого одиночного автомобильного колеса при действии на него активных крутящего момента и толкающей силы.

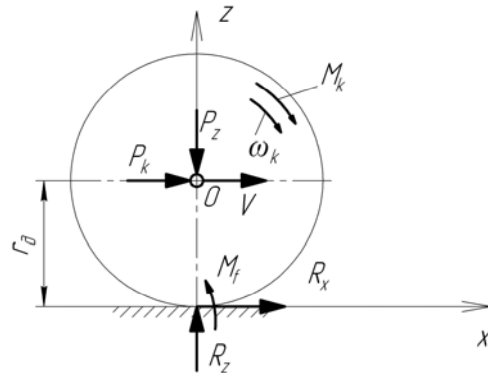


Рис. 1. Схема нагружения одиночного жесткого автомобильного колеса при действии активных крутящего момента M_k и толкающей силы P_k

Уравнение плоскопараллельного движения колеса

$$\begin{cases} m_k \cdot \dot{V} = P_k + R_x; \\ J_k \cdot \dot{\omega}_k = M_k - M_f - R_x \cdot r_d, \end{cases} \quad (1)$$

где m_k – масса колеса; J_k – момент инерции колеса; \dot{V} – линейное ускорение точки O (оси колеса); $\dot{\omega}_k$ – угловое ускорение колеса; R_x – касательная реакция на колесе; r_d – динамический радиус колеса; P_k, M_k – активная толкающая сила и крутящий момент; M_f – момент сопротивления качению колеса.

Момент сопротивления качению колеса:

$$M_f = R_z \cdot f \cdot r_d, \quad (3)$$

где R_z – вертикальная реакция дороги на колесе; f – коэффициент сопротивления качению.

Из уравнения (2), с учетом (3), определим касательную реакцию на колесе

$$R_x = \frac{M_k}{r_d} - R_z \cdot f - \frac{J_k}{r_d} \cdot \dot{\omega}_k. \quad (4)$$

При условии отсутствия скольжения (буксования) в контакте колеса с дорогой, т.е. принимая эту связь идеальной, имеем известное соотношение

$$\dot{\omega}_k = \frac{\dot{V}}{r_d}. \quad (5)$$

Подставляя выражение (4) в уравнение (1), получим, с учетом (5)

$$m_k \cdot \left(1 + \frac{J_k}{m_k \cdot r_d^2}\right) \cdot \dot{V} = P_k + \frac{M_k}{r_d} - R_z \cdot f. \quad (6)$$

В уравнении (6)

$$m_k \cdot \left(1 + \frac{J_k}{m_k \cdot r_d^2}\right) = m_{\text{кпр}}, \quad (7)$$

где $m_{\text{кпр}}$ – приведенная масса колеса.

Соответственно

$$1 + \frac{J_k}{m_k \cdot r_d^2} = \delta_{\text{вр}}, \quad (8)$$

где $\delta_{\text{вр}}$ – коэффициент учета вращения колеса.

Учитывая, что

$$J_k = m_k \cdot i_k^2, \quad (9)$$

где i_k – радиус инерции колеса, преобразуем выражение (8) к виду

$$\delta_{\text{вр}} = 1 + \left(\frac{i_k}{r_d}\right)^2. \quad (10)$$

Из выражения (6), с учетом (10), определим линейное ускорение оси колеса

$$\dot{V} = \frac{P_k + \frac{M_k}{r_d} - R_z \cdot f}{m_k \left(1 + \frac{i_k^2}{r_d^2}\right)}. \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в уравнение (5), а последнее в (4), получим после преобразований

$$R_x = \frac{\frac{M_k}{r_d} - P_k \cdot \frac{i_k^2}{r_d^2}}{1 + \frac{i_k^2}{r_d^2}} - R_z \cdot \frac{f}{1 + \frac{i_k^2}{r_d^2}}. \quad (12)$$

Анализ уравнения для касательной реакции на колесе

Таким образом, получено уравнение (12), связывающее величину касательной реакции в контакте жесткого колеса с дорогой с величинами активных крутящего момента и толкающей силы.

В установившемся режиме движения $\dot{V} = 0$ и $\dot{\omega}_k = 0$. Уравнение (1) и (2) в этом случае примут вид

$$\begin{cases} P_k + R_x = 0; \\ M_k - M_f - R_x \cdot r_d = 0. \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_k + R_x = 0; \\ M_k - M_f - R_x \cdot r_d = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Подставляя (13) в (14), получим условие равномерного движения колеса при наличии идеальных связей

$$M_k + P_k \cdot r_d = M_f. \quad (15)$$

Таким образом, уравнение (15) выражает условие равномерного движения колеса при отсутствии скольжения (буксования) в контакте с дорогой. При малых значениях M_f это возможно при малом значении суммы $M_k + P_k \cdot r_d$.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что равномерное движение колеса возможно только при малых значениях активных крутящего момента и толкающей силы, направленных в одну сторону. Касательная реакция на колесе в этом случае равна толкающей силе, но направлена в противоположную сторону.

Из уравнения (12) определим условие равенства нулю касательной реакции R_x

$$M_k - P_k \cdot \frac{i_k^2}{r_d} - R_z \cdot f \cdot r_d = 0. \quad (16)$$

Касательная реакция будет направлена в сторону движения колеса в случае

$$M_k - P_k \cdot \frac{i_k^2}{r_d} - R_z \cdot f \cdot r_d > 0 \quad (17)$$

и в противоположную, если

$$M_k - P_k \cdot \frac{i_k^2}{r_d} - R_z \cdot f \cdot r_d < 0. \quad (18)$$

Условие отсутствия скольжения (буксования) колеса

$$|R_x| \leq \phi \cdot R_z, \quad (19)$$

где ϕ – коэффициент сцепления колеса с дорогой.

Условие (19) лучше записать в виде

$$R_x^2 \leq \phi^2 \cdot R_z^2. \quad (20)$$

Подставляя выражение (12) в неравенство (20), получим после преобразований

$$\left(\frac{M_k}{r_d} - P_k \cdot \frac{i_k^2}{r_d^2} - R_z \cdot f \right)^2 - \phi^2 \cdot R_z^2 \left(1 + \frac{i_k^2}{r_d^2} \right)^2 \leq 0. \quad (21)$$

После дальнейших преобразований получим

$$\frac{\left(\frac{M_k}{r_d \cdot \phi \cdot R_z} - \frac{P_k}{\phi \cdot R_z} \cdot \frac{i_k^2}{r_d^2} - \frac{f}{\phi} \right)^2}{\left(1 + \frac{i_k^2}{r_d^2} \right)^2} - 1 \leq 0. \quad (22)$$

Неравенство (22) выражает условие отсутствия скольжения (буксования) жесткого автомобильного колеса при действии на него активных крутящего момента и толкающей силы. При невыполнении указанного условия и $R_x > 0$ колесо будет буксовать, а при $R_x < 0$ – скользить.

Выводы

1. Полученное уравнение (12) позволяет определить величину и направление касательной реакции в контакте жесткого автомо-

бильного колеса с дорогой при действии активных крутящего момента и толкающей силы и условия отсутствия скольжения или буксования.

2. Равномерное движение колеса возможно только при малых значениях активных крутящего момента и толкающей силы, направленных в одну сторону. Касательная реакция на колесе в этом случае равна толкающей силе, но направлена в противоположную сторону. Этот режим соответствует нейтральному режиму движения колеса.

3. Полученное неравенство (22) выражает условия скольжения (буксования) жесткого автомобильного колеса при действии на него активных крутящего момента и толкающей силы. При невыполнении указанного условия и положительном направлении касательной реакции колесо буксует, а при отрицательном направлении – скользит.

Литература

1. Чудаков Е.А. Теория автомобиля / Е.А. Чудаков. – М. : Машгиз, 1950. – 343 с.
2. Чудаков Е.А. Циркуляция паразитной мощности в механизмах бездифференциального автомобиля / Е.А. Чудаков. – М. : Машгиз, 1950. – 79 с.
3. Петрушов В.А. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов / В.А. Петрушов, С.А. Шуклин, В.В. Московкин. – М. : Машиностроение, 1975. – 225 с.
4. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз, Е.В. Клешников, И.П. Петров и др. ; под ред. В.И. Кнороза. – М. : Транспорт, 1976. – 238 с.
5. Федосов А.С. Модель стационарного плоского движения колеса / А.С. Федосов // Автомобильный транспорт : сб. науч. трудов. – 2002. – Вып. 9. – С. 122–126.
6. Романченко М.И. Сопротивление деформации шины при качении колеса / М.И. Романченко // Автомобильная промышленность. – 2009. – №7. – С. 20–23.
7. Томило Э.А. К теории качения колеса / Э.А. Томило // Автомобильная промышленность. – 1996. – №5. – С. 12–13.

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

Статья поступила в редакцию 1 июня 2011 г.