

УСТОЙЧИВОСТЬ АВТОМОБИЛЯ ПРИ БОРТОВОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕС С ДОРОГОЙ

**М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ,
Н.С. Корчан, к.ю.н., зав. лабораторией, ХНИИСЭ,
Д.М. Клец, аспирант, ХНАДУ**

***Аннотация.** Определены условия обеспечения устойчивости движения автомобиля при бортовой неравномерности коэффициентов сцепления и различной степени блокировки дифференциала.*

***Ключевые слова:** устойчивость, дифференциал, коэффициент блокировки, занос, коэффициент сцепления.*

Введение

Движение автомобиля в тяговом режиме при внезапном появлении разности коэффициентов сцепления колес левого и правого бортов с дорогой может привести к заносу. При отсутствии трения в дифференциале поворачивающий момент не возникает, поскольку в этом случае тяговые силы и касательные реакции на колесах левого и правого бортов одинаковы. В дифференциалах повышенного трения и самоблокирующихся дифференциалах возникает дополнительный момент (момент трения), приводящий к увеличению крутящего момента на отстающей полуоси автомобиля и уменьшению крутящего момента на забегающей (буксующей) полуоси. Разность крутящих моментов на полуосях приводит к разности тяговых сил и появлению поворачивающего (возмущающего) момента.

Анализ публикаций

Влияние межколесного дифференциала на устойчивость автомобиля против заноса впервые рассмотрено в работе Е.А. Чудакова [1]. Рассмотрены различные варианты: начало пробуксовывания внутреннего колеса ведущей оси, начало бокового скольжения оси при наличии и без пробуксовывания внутреннего колеса. Однако в указанной работе [1] не рассматривается трение в дифферен-

циале и его влияние на появление разности тяговых сил на левом и правом колесах.

Трение в дифференциале рассмотрено в работе А.С. Литвинова [2]. Определено влияние коэффициента блокировки дифференциала на изменение коэффициентов увода колес ведущей оси. Рассмотрено влияние коэффициента сцепления колес с дорогой при наличии тяговой силы на колесах ведущей оси на устойчивость и управляемость автомобиля. Однако не рассмотрено влияние на указанные свойства машины бортовой неравномерности коэффициентов сцепления. В работе [3] приведены результаты экспериментальных исследований грузовых автомобилей МАЗ с серийным (обычным) коническим дифференциалом, дифференциалами свободного хода. Определено, что при дифференциалах повышенного трения значительно снижается курсовая устойчивость автомобиля.

Однако в работе [3] не определены условия возникновения заноса автомобиля при бортовой неравномерности коэффициентов сцепления колес с дорогой и различных значениях коэффициента блокировки дифференциала.

Цель и постановка задачи

Целью исследования является определение условий устойчивого движения автомобиля

при бортовой неравномерности коэффициента сцепления ведущих колес с дорогой и различных значениях коэффициента блокировки дифференциала.

Динамика ведущего моста автомобиля

Рассмотрим движение ведущего моста автомобиля при появлении бортовой неравномерности коэффициентов сцепления.

Бортовая неравномерность коэффициентов сцепления колес с дорогой в тяговом режиме может вызвать занос в случае, если колеса «слабого» борта находятся в режиме буксования, при появлении разности угловых скоростей на колесах ведущих мостов автомобиля. В этом случае крутящий момент на отстающем колесе будет больше, чем на забегающем колесе на величину момента трения. У обычных межколесных дифференциалов этот момент относительно невелик. У дифференциалов повышенного трения разность крутящих моментов на отстающем и забегающем колесах больше.

Рассмотрим схему сил, действующих на ведущий мост автомобиля при разности коэффициентов сцепления с дорогой колес левого и правого бортов (рис. 1).

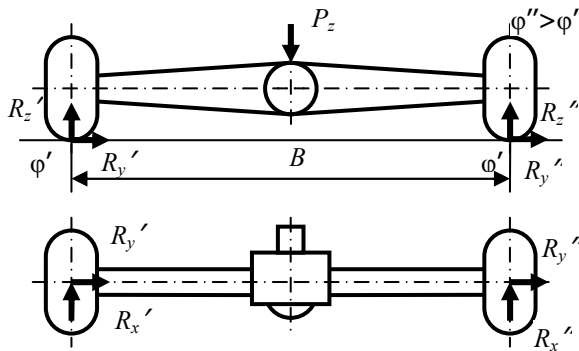


Рис. 1. Схема сил, действующих на ведущий мост автомобиля при разности коэффициентов сцепления

У забегающего колеса коэффициент сцепления ϕ' с дорогой ниже, чем у отстающего (ϕ''). Крутящий момент на буксующем колесе, имеющем меньший коэффициент ϕ'

$$M'_{кр} = (\phi' + f) \cdot R'_z \cdot r_d = 0,5 \cdot (\phi' + f) \cdot R_z \cdot r_d, \quad (1)$$

где R'_z – вертикальная реакция дороги на забегающем колесе; R_z – суммарная верти-

кальная реакция дороги на ведущей оси; r_d – динамический радиус колеса; f – коэффициент сопротивления качению.

Крутящий момент на отстающем колесе, находящемся в лучших условиях сцепления

$$\begin{aligned} M''_{кр} &= M'_{кр} \cdot \frac{1 - K'}{K'} = \\ &= 0,5 \cdot (\phi' + f) \cdot R_z \cdot r_d \cdot \frac{1 - K'}{K'}, \end{aligned} \quad (2)$$

где K' – коэффициент учитывающий неравномерность распределения крутящих моментов в дифференциале при возникновении разности угловых скоростей и момента трения

$$K' = \frac{M'_{кр}}{M'_{кр} + M''_{кр}}. \quad (3)$$

Касательные реакции на колесах

$$R'_x = \frac{M'_{кр}}{r_d} - f \cdot R'_z = \phi' \cdot R'_z = 0,5 \cdot \phi' \cdot R_z; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} R''_x &= \frac{M''_{кр}}{r_d} - f \cdot R''_z = 0,5 \cdot \phi' \cdot R_z \cdot \frac{1 - K'}{K'} + \\ &+ f \cdot R_z \cdot \frac{0,5 - K'}{K'}. \end{aligned} \quad (5)$$

Поворачивающий момент на оси автомобиля, обусловленный разностью реакций R'_x и R''_x

$$\begin{aligned} M_{пов} &= \frac{B}{2} \cdot (R''_x - R'_x) = \\ &= \frac{B}{2} \cdot (\phi' + f) \cdot R_z \cdot \frac{0,5 - K'}{K'}. \end{aligned} \quad (6)$$

Максимальная боковая сила, которую может выдержать ось автомобиля без бокового скольжения

$$\begin{aligned} R_y &= R'_y + R''_y = R''_y = 0,5 \cdot R_z \times \\ &\times \phi' \cdot \sqrt{\left(\frac{\phi''}{\phi'}\right)^2 - \left(\frac{1 - K'}{K'} + \frac{f}{\phi'} \cdot \frac{0,5 - K'}{K'}\right)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

В выражениях (6) и (7) величина $f \ll \phi'$, поэтому при дальнейшем анализе примем, что $\phi' + f \approx \phi'$ и $f / \phi' \approx 0$.

В выражении (7) величина $R'_y = 0$, поскольку забегающее колесо находится в режиме бук-

сования и не способно выдержать боковую силу.

Коэффициент блокировки дифференциала [4]

$$\lambda_{\text{бл}} = \frac{M''_{\text{кр}}}{M'_{\text{кр}}} = \frac{1 - K'}{K'} \quad (8)$$

Выражение (7) с учетом коэффициента блокировки дифференциала (8) примет следующий вид:

$$\frac{R_y}{R_z \cdot \varphi'} = 0,5 \cdot \sqrt{\left(\frac{\varphi''}{\varphi'}\right)^2 - \lambda_{\text{бл}}^2} \quad (9)$$

Из выражения (8) определим

$$K' = \frac{1}{1 + \lambda_{\text{бл}}} \quad (10)$$

Выражение (6) с учетом (10) преобразуется к виду

$$\frac{M_{\text{пов}}}{B \cdot \varphi' \cdot R_z} = \frac{\lambda_{\text{бл}} - 1}{4} \quad (11)$$

Графики зависимостей (9) и (11) приведены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

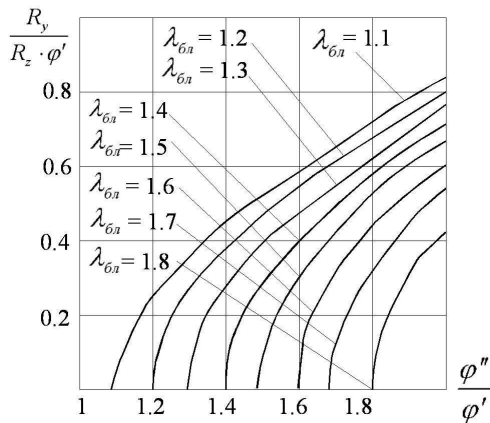


Рис. 2. Зависимость $\frac{R_y}{R_z \cdot \varphi'} = F\left(\frac{\varphi''}{\varphi'}\right)$ при различных значениях $\lambda_{\text{бл}}$

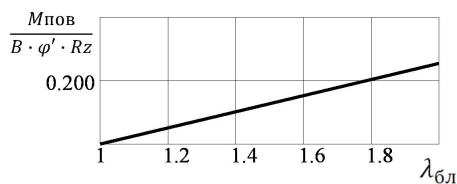


Рис. 3. Зависимость $\frac{M_{\text{пов}}}{B \cdot \varphi' \cdot R_z} = F(\lambda_{\text{бл}})$

Анализ графиков, приведенных на рис. 2, показывает, что с ростом отношения φ''/φ' и уменьшением $\lambda_{\text{бл}}$ величина соотношения

$$\frac{R_y}{R_z \cdot \varphi'}$$

а следовательно, и боковая сила R_y , которую может выдерживать ось автомобиля, возрастают. С увеличением коэффициента блокировки $\lambda_{\text{бл}}$ возрастает и поворачивающий момент $M_{\text{пов}}$ (рис. 3).

Полноприводный автомобиль

На рис. 4 приведена схема сил, действующих на полноприводный автомобиль при бортовой неравномерности коэффициентов сцепления.

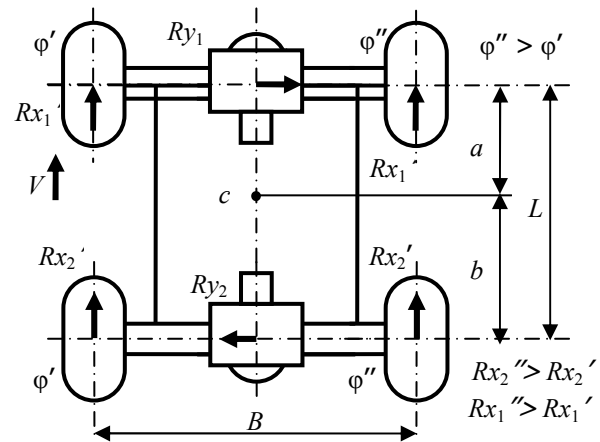


Рис. 4. Схема сил, действующих на полноприводный автомобиль в тяговом режиме при бортовой неравномерности коэффициентов сцепления

Для полноприводного автомобиля поворачивающий момент будет равен

$$M_{\text{пов}} = M_{\text{пов}_1} + M_{\text{пов}_2} = \frac{B}{2} \cdot \varphi' \times \left[R_{z_1} \cdot \left(\frac{0,5}{K_1'} - 1 \right) + R_{z_2} \cdot \left(\frac{0,5}{K_2'} - 1 \right) \right] \quad (12)$$

Стабилизирующий момент

$$M_{\text{стб}} = R_{y_2} \cdot L = 0,5 \cdot R_{z_2} \times \varphi' \cdot L \cdot \sqrt{\left(\frac{\varphi''}{\varphi'}\right)^2 - \left(\frac{1}{K_2'} - 1\right)^2} \quad (13)$$

Коэффициент устойчивости автомобиля против заноса с учетом (12) и (13) и при $K_1' = K_2' = K'$ (передний и задний мосты одинаковой конструкции) будет иметь вид

$$K_{уст} = \frac{M_{стб}}{M_{пов}} = \frac{a}{B} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{\varphi''}{\varphi'}\right)^2 - \left(\frac{1}{K'} - 1\right)^2}}{\frac{0,5}{K'} - 1}. \quad (14)$$

Условие устойчивости против заноса ($K_{уст} \geq 1$) полноприводного автомобиля

$$\frac{\varphi''}{\varphi'} \geq \sqrt{\left(\frac{1}{K'} - 1\right)^2 + \frac{B^2}{a^2} \cdot \left(\frac{0,5}{K'} - 1\right)^2}. \quad (15)$$

Условие отсутствия бокового увода передней оси

$$M_{пов} < R_{y1} \cdot L \quad (16)$$

или

$$\frac{B}{2} \cdot \varphi' \cdot m_a \cdot g \cdot (0,5/K' - 1) \leq 0,5 \cdot R_{z1} \times \varphi' \cdot L \cdot \sqrt{\left(\frac{\varphi''}{\varphi'}\right)^2 - (1/K' - 1)^2}. \quad (17)$$

Отсюда определим

$$\frac{\varphi''}{\varphi'} \geq \sqrt{\left(\frac{1}{K'} - 1\right)^2 + \frac{B^2}{b^2} \cdot \left(\frac{0,5}{K'} - 1\right)^2}. \quad (18)$$

Сравнивая выражения (15) и (18) можно сделать вывод о том, что при $a > b$ автомобиль теряет устойчивость против заноса, а при $a < b$ – его уводит в сторону. При $a = b$ автомобиль теряет устойчивость против заноса и его уводит в сторону.

С учетом выражений (8) и (10), а также при $\lambda_{бл1} = \lambda_{бл2} = \lambda_{бл}$ уравнение (14) примет вид

$$K_{уст} = \frac{a}{B} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{\varphi''}{\varphi'}\right)^2 - \lambda_{бл}^2}}{\lambda_{бл}}. \quad (19)$$

Из уравнения (19) видно, что при $\varphi''/\varphi' \geq \lambda_{бл}$ величина $K_{уст} \geq 0$. Условие устойчивости (15) автомобиля против заноса с учетом (8) и (10) примет вид

$$\frac{\varphi''}{\varphi'} \geq \sqrt{\lambda_{бл}^2 + \frac{B^2}{4 \cdot a^2} \cdot (\lambda_{бл} - 1)^2}. \quad (20)$$

или, с учетом указанных выше допущений

$$\varphi''/\varphi' \geq \lambda_{бл}. \quad (21)$$

Аналогичный вид с учетом (8) и (10) и указанных допущений (21) примет и соотношение (18).

Выводы

Проведенное исследование позволило прийти к парадоксальному выводу о том, что с ростом бортовой неравномерности коэффициента сцепления колес с дорогой у автомобилей с обычными симметричными коническими дифференциалами происходит увеличение устойчивости против заноса. При малой неравномерности коэффициентов сцепления и высоком значении коэффициента блокировки дифференциала автомобили неустойчивы.

При бортовой неравномерности коэффициентов сцепления возможен боковой увод автомобиля, сопровождающийся боковым скольжением передних колес.

Полученные аналитические выражения позволяют произвести оценку возможности потери автомобилем устойчивости против заноса и бокового увода передней оси, сопровождающихся боковым скольжением задних или передних колес.

Условием отсутствия бокового заноса задней оси или бокового увода передней оси автомобиля является $\varphi''/\varphi' \geq \lambda_{бл}$.

Литература

1. Чудаков Е.А. Устойчивость автомобиля против заноса. – М.: Машгиз, 1949. – 143 с.
2. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
3. Лефаров А.Х. Дифференциалы автомобилей и тягачей. – М.: Машиностроение, 1972. – 147 с.
4. Андреев А.Ф., Ванцевич В.В., Лефаров А.Х. Дифференциалы колесных машин. – М.: Машиностроение, 1987. – 176 с.

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

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2007 г.