

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ НА НЕРОВНОЙ ДОРОГЕ

Разработана математическая модель автомобиля, которая описывает динамику его масс в процессе торможения и позволяет оценить параметры тормозных свойств на дороге с неровным микропрофилем поверхности. Дифференцирование переменных колебательного процесса произведено по пройденному автомобилем пути, что раньше представляло сложность и не применялось при моделировании тормозной динамики автотранспортных средств.

Ключевые слова: тормозные свойства автомобиля, тормозная динамика, торможение на неровной дороге, математическая модель динамики автомобиля

Современная теория рассматривает большинство эксплуатационных свойств автомобиля при условии его движения по ровной дорожной поверхности. Из практической же эксплуатации известно, что движение автомобиля по неровной дороге сопровождается колебаниями, которые оказывают значительное влияние на его эксплуатационные свойства, в том числе и на тормозную динамику.

Существующие научные работы, посвященные исследованию тормозной динамики автомобиля при движении по дороге с неровным микропрофилем [1, 2], имеют существенные недостатки,

которые носят принципиальный характер. В то же время, влияние колебаний на тормозные свойства остается изученным недостаточно.

Для оценки тормозных свойств на неровной дороге была разработана математическая модель тормозной динамики автомобиля, в основу которой легли опубликованные ранее научные работы [3, 4, 5].

На рис. 1 изображена схема колебательной системы автомобиля, а на рис. 2 – нагрузки, действующие на отдельное колесо при его качении в тормозном режиме по неровной дороге.

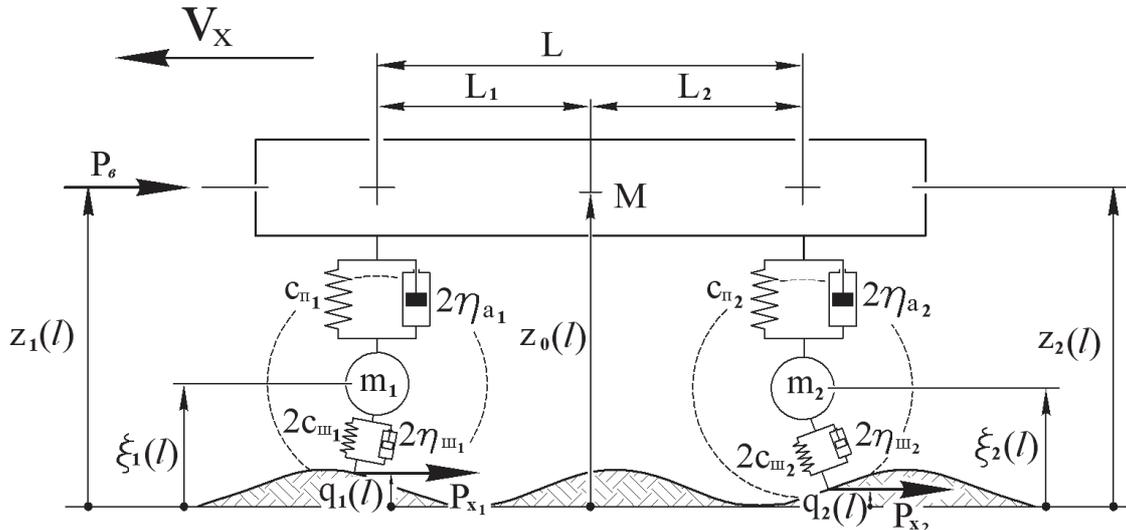


Рис. 1. Колебательная система автомобиля при торможении на дороге с неровным микропрофилем

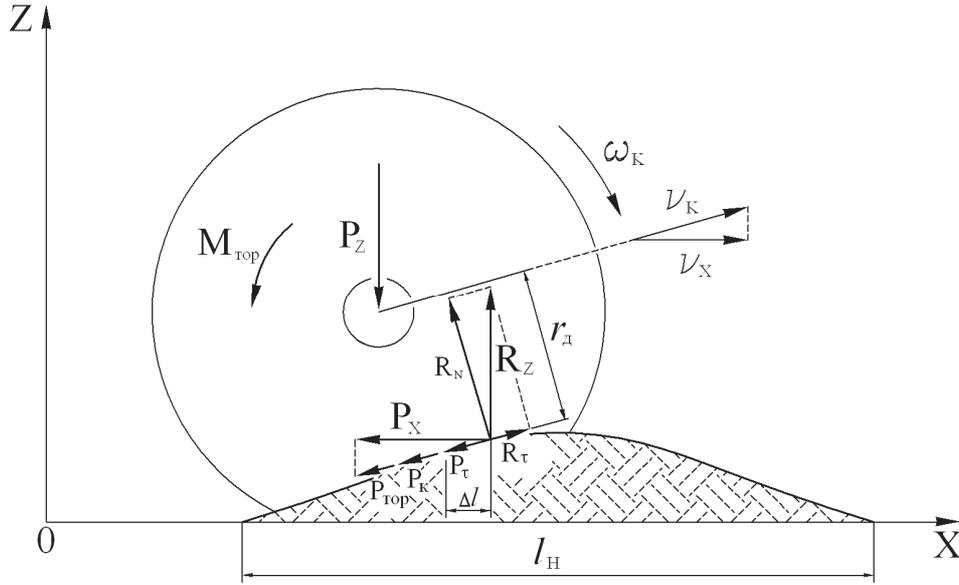


Рис. 2. Силы и моменты, действующие на автомобильное колесо при качении в ведущем режиме по неровной дороге

На схемах приняты следующие обозначения: M – поддрессоренная масса автомобиля; m_1 и m_2 – передняя и задняя неподдрессоренные массы автомобиля; L – база автомобиля; L_1 и L_2 – расстояния от центра тяжести поддрессоренной массы до осей передних и задних колес по горизонтали; $C_{ш1}$ и $C_{ш2}$ – коэффициенты нормальной жесткости автомобильных шин переднего и заднего колес; $C_{п1}$ и $C_{п2}$ – коэффициенты вертикальной жесткости передней и задней подвесок; ω_K и η_{A2} – коэффициенты неупругого сопротивления амортизаторов передней и задней подвесок; $\eta_{ш1}$ и $\eta_{ш2}$ – коэффициенты неупругого сопротивления автомобильных шин переднего и заднего колес; P_{x1} и P_{x2} – суммарные силы сопротивления поступательному движению автомобиля, действующие в контакте шин передних и задних колес с поверхностью дороги; l – путь, пройденный автомобилем; l_H – длина неровности дороги; ω_K – угловая скорость вращения автомобильного колеса; Z_1 и Z_2 – вертикальное положение передней и задней частей поддрессоренной массы; Z_0 – вертикальное положение центра тяжести поддрессоренной массы; ξ_1 и ξ_2 – вертикальное положение передней и задней неподдрессоренных масс; q_1 и q_2 – возмущающие воздействия дороги на передние и задние колеса; V_X – скорость поступательного движения автомобиля; P_b – сила аэродинамического сопротивления.

Вертикальные и угловые колебания автомобиля при торможении описываются системой из

четырёх дифференциальных уравнений второго порядка:

$$1) M\ddot{Z}_0 = C_{п1}(\xi_1 - Z_1 + H_1 - R_1) + 2\eta_{A1}(\dot{\xi}_1 - \dot{Z}_1) + C_{п2}(\xi_2 - Z_2 + H_2 - R_2) + 2\eta_{A2}(\dot{\xi}_2 - \dot{Z}_2) - Mg;$$

$$2) J\ddot{\alpha} = L_2C_{п2}(\xi_2 - Z_2 + H_2 - R_2) + 2L_2\eta_{A2}(\dot{\xi}_2 - \dot{Z}_2) - L_1C_{п1}(\xi_1 - Z_1 + H_1 - R_1) - 2L_1\eta_{A1}(\dot{\xi}_1 - \dot{Z}_1) + L_1M_1g - L_2M_2g + P_{x1}(Z_0 - q_1) + P_{x2}(Z_0 - q_2);$$

$$3) m_1\ddot{\xi}_1 = -C_{п1}(\xi_1 - Z_1 + H_1 - R_1) - 2\eta_{A1}(\dot{\xi}_1 - \dot{Z}_1) + 2C_{ш1}(q_1 - \xi_1 + R_1) + 2\eta_{ш1}(\dot{q}_1 - \dot{\xi}_1) - m_1g;$$

$$4) m_2\ddot{\xi}_2 = -C_{п2}(\xi_2 - Z_2 + H_2 - R_2) - 2\eta_{A2}(\dot{\xi}_2 - \dot{Z}_2) + 2C_{ш2}(q_2 - \xi_2 + R_2) + 2\eta_{ш2}(\dot{q}_2 - \dot{\xi}_2) - m_2g;$$

где H_1 и H_2 – положения передней и задней частей поддрессоренной массы относительно поверхности при движении по ровной дороге; R_1 и R_2 – динамические радиусы автомобильных шин передних и задних колес при движении по ровной дороге; J – момент инерции поддрессоренной массы.

$$\text{При этом } \alpha = \frac{Z_2 - Z_1}{L}, \quad Z_0 = \frac{Z_1L_2 + Z_2L_1}{L},$$

$$M_1 = \frac{MgL_2}{L} \text{ и } M_2 = \frac{MgL_1}{L}.$$

Целью решения системы дифференциальных уравнений является определение вертикальных реакций в контакте автомобильных шин с поверхностью дороги:

$$R_{z1} = (M_1 + m_1)g + C_{ш1}(\xi_1 - Z_1 + H_1 - R_1) + 2\eta_{A1}(\dot{\xi}_1 - \dot{Z}_1) + 2C_{ш1}(q_1 - \xi_1 + R_1) + 2\eta_{ш1}(\dot{q}_1 - \dot{\xi}_1);$$

$$R_{z2} = (M_2 + m_2)g + C_{ш2}(\xi_2 - Z_2 + H_2 - R_2) + 2\eta_{A2}(\dot{\xi}_2 - \dot{Z}_2) + 2C_{ш2}(q_2 - \xi_2 + R_2) + 2\eta_{ш2}(\dot{q}_2 - \dot{\xi}_2).$$

В соответствии со схемой, представленной на рис. 2, вертикальная реакция R_z разлагается на нормальную R_N и касательную R_τ реакции к дорожной поверхности на малом участке пути Δl , на котором функция возмущающего воздействия условно имеет линейную зависимость.

Исходя из математического представления линейной зависимости, угол между осью абсцисс OX и линейным участком функции возмущающего воздействия определяется как $\arctg \frac{q_k - q_H}{\Delta l}$,

где q_H и q_k – начальная и конечная координаты микропрофиля дороги на линейном участке Δl .

Исходя из принятой схемы, следует равенство углов: $OX \wedge R_\tau = R_N \wedge R_z$. Следовательно, нормальная реакция в контакте колес с дорожной поверхностью определяется следующим образом:

$R_N = R_z \cos R_N \wedge R_z$. При этом динамический радиус $r_d = r_0 - \frac{R_N}{C_{ш}}$, где r_0 – свободный радиус автомобильной шины.

Дополнительная сила сопротивления движению P_τ , затрачиваемая на преодоление неровности, численно равна касательной реакции R_τ и определяется как $P_\tau = R_\tau = R_z \sin R_N \wedge R_z$. Следует отметить, что после преодоления автомобильным колесом вершины неровности сила P_τ , наоборот, не препятствует, а вызывает движение автомобиля.

Также в контакте шины с дорожной поверхностью действуют по касательной сила сопротивления качению P_k [3] и тормозная сила, которая определяется как отношение тормозного момента $M_{\text{тор}}$ к динамическому радиусу автомобильной шины, $P_{\text{тор}} = \frac{M_{\text{тор}}}{r_d}$.

Следовательно, суммарная сила сопротивления поступательному движению тормозящего колеса, действующая в контакте шин передних и задних колес с поверхностью дороги в направлении оси абсцисс OX , в общем случае при незаблокированном колесе равна

$$P_x = (P_\tau + P_k + P_{\text{тор}}) \times \cos R_N \wedge R_z.$$

В свою очередь, при блокировке колеса $\omega_k = 0$ и $P_k = 0$, а также, какой бы не создавался тормозным механизмом тормозной момент, тормозная

сила не может превысить силу сцепления P_ϕ , действующую по касательной в контакте автомобильной шины с поверхностью дороги [5]. В этом случае $P_x = (P_\tau + P_\phi) \times \cos R_N \wedge R_z$.

При решении уравнений необходимо также задавать и проверять условия отрыва автомобильных шин от дорожной поверхности [3], так как при отрыве силы как естественного, так и искусственного сопротивления в контакте с дорогой будут равны нулю.

Дифференциальное уравнение движения автотранспортного средства при торможении на неровной дороге также составлено в соответствии с основным законом динамики и имеет вид: $(M + m_1 + m_2)\ddot{X}\delta = -P_{x1} - P_{x1} - P_b$, где δ – коэффициент учета вращающихся масс, а \ddot{X} – ускорение автомобиля вдоль оси абсцисс OX . Следует отметить, что при расчетах \ddot{X} имеет отрицательные значения, то есть является замедлением, а также одним из оценочных параметров тормозных свойств автомобиля.

При решении системы дифференциальных уравнений численными методами следует учитывать, что за одинаковые промежутки времени dt колеса передней и задней осей будут проходить разные расстояния $\Delta l_1 = V_{x1}dt$ и $\Delta l_2 = V_{x2}dt$, а следовательно, линейные скорости передней V_{x1} и задней V_{x2} осей в заданном временном интервале будут различны. На практике эта неравномерность компенсируется тангенциальной и крутильной податливостями эластичных шин, а в редких случаях кратковременным их проскальзыванием относительно дорожной поверхности. Поэтому для расчета параметров колебательного процесса и величины замедления скорость автомобиля и его осей в начале следующего временного интервала необходимо задавать как среднее арифметическое значение скоростей передней и задней осей в конце предыдущего интервала времени.

Тормозной путь как оценочный параметр тормозных свойств определяется как сумма расстояний Δl , которые прошла одна из осей до полной остановки автомобиля $V_x = 0$.

Вопреки сложившемуся к настоящему времени мнению, теоретические исследования показали, что тормозной путь на дороге с неровным микропрофилем меньше, чем на ровной дороге, в зависимости от высоты и длины неровностей. В качестве примера, на рис. 3 приведена зависимость тормозного пути от начальной скорости торможения легкового автомобиля среднего класса при торможении на ровной и неровной ($q_{\text{max}} = 15$ см и $l_H = 1$ м) дорогах с сухим асфальтобетонным покрытием.

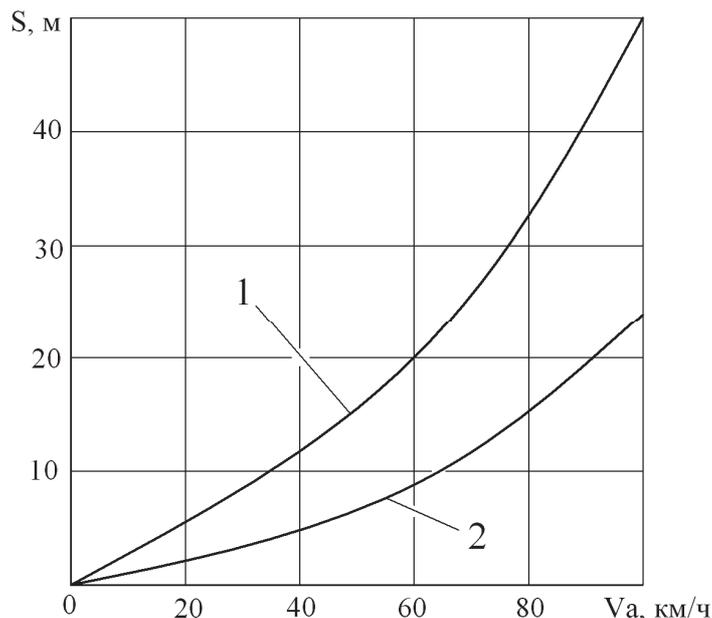


Рис. 3. Изменение тормозного пути в зависимости от начальной скорости торможения:
1 – на ровной дороге, 2 – на дороге с неровным микропрофилем

Литература

1. Енаев, А. А. Колебания автомобиля при торможении и применение их исследования в проектных расчетах, технологии испытаний, доводке конструкции: дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03. / А. А. Енаев, МАМИ – М., 2002. – 440 с.
2. Слепенко, Е. А. Оценка стабильности контакта колес автомобиля с опорной поверхностью: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03. / Е.А. Слепенко; НАТИ – М., 2004. – 131 с.
3. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010611128 (РФ) Расчет действующих на автомобиль сил при движе-

нии по неровной дороге (AutoForces v.1.00) / В.В. Мазур ; Брат гос. ун-т. – Дата поступления 15.12.2009.
4. Мазур, В. В. Математическая модель динамики масс автотранспортного средства с поврежденной пневматической шиной при торможении на неровной дороге / В. В. Мазур // Системы. Методы. Технологии : науч. журн. / Брат. гос. ун-т. 2009. – № 2. – С. 36-38.
5. Мазур, В. В. Определение параметров эксплуатационных свойств автотранспортного средства при движении по неровной дороге / В. В. Мазур // Системы. Методы. Технологии : науч. журн. / Брат. гос. ун-т. – 2009. – № 2. – С. 39-41.