

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОГО БАЛАНСА АВТОМОБИЛЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ДОРОГЕ С НЕРОВНЫМ МИКРОПРОФИЛЕМ

Тягово-скоростные свойства являются одними из наиболее важных эксплуатационных свойств автомобиля. Но современная теория рассматривает большинство эксплуатационных свойств автомобиля при движении по ровной дороге. Влияние на эксплуатационные свойства автомобиля колебаний, возникающих при движении по дороге с неровным микропрофилем, исследовано недостаточно. Поэтому моделирование эксплуатационных свойств автомобиля, в том числе и тягово-скоростных, при движении по неровной дороге носит актуальный характер.

Ключевые слова: силовой баланс автомобиля, эксплуатационные свойства автомобиля, тягово-скоростные свойства автомобиля, колебания автомобиля.

Из теории эксплуатационных свойств известно, что силы, которые действуют на автомобиль, или вызывают его движение, или этому движению препятствуют. Возможность движения автотранспортного средства определяется условием $P_{\phi} \geq P_T \geq P_D + P_B$,

где P_{ϕ} – сила сцепления ведущих колес с дорожной поверхностью; P_T – тяговая сила на ведущих колесах автомобиля; P_D – сила сопротивления дороги; P_B – сила аэродинамического сопротивления.

Силы, действующие на автомобиль с классической компоновкой трансмиссии и колесной формулой 4×2, схема которого обычно приводится в теории эксплуатационных свойств для рассмотрения силового баланса при движении по ровной дороге, определяются известным образом как

$$P_{\phi} = R_{N2} \phi_{\tau},$$

где ϕ_{τ} – коэффициент сцепления вдоль пятна контакта автомобильных шин с поверхностью дороги; R_{N2} – суммарная нормальная реакция в контакте шин ведущих колес с поверхностью дороги.

$$P_T = \frac{M_T}{r_{д2}},$$

где M_T – тяговый момент, подводимый к ведущим колёсам; $r_{д2}$ – динамический радиус ведущих колёс.

$$P_B = F_c k_o V_A^2,$$

где F_c – площадь лобового сопротивления; k_o – коэффициент обтекаемости; V_A – скорость движения автомобиля.

Сила P_D при условии движения по ровной горизонтальной дорожной поверхности определяется по эмпирической формуле как сила сопротивления качению колес

$$P_D = P_K = (R_{N1} + R_{N2})(f_o + 7 \cdot 10^{-6} \cdot V_A^2),$$

где f_o – справочное значение коэффициента со-

противления качению колес при малой (до 50 км/ч) скорости, определяемое типом и состоянием дорожной поверхности.

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 приводят к ухудшению его эксплуатационных свойств, что, в свою очередь, выражается в увеличении расхода топлива, ухудшении устойчивости и управляемости и вынуждает уменьшать скорость движения.

Существуют научные работы, посвященные исследованию эксплуатационных свойств автомобиля при движении по дороге с неровным микропрофилем [1, 2, 3]. Тем не менее указанные работы имеют существенные недостатки, иногда носящие принципиальный характер, а влияние колебаний на эксплуатационные свойства остаётся изученным недостаточно.

Для оценки влияния колебаний на силы, действующие на автомобиль, который движется по неровной дорожной поверхности, была разработана математическая модель. Особенностью математической модели в сравнении с аналогичными существующими является то, что функция возмущающего воздействия дороги и функции, описывающие колебания автомобиля относительно дорожной поверхности, могут быть представлены в виде зависимостей как от времени, так и от пройденного автомобилем пути. Это позволяет рассчитывать изменяющуюся скорость движения автомобиля при постоянной частоте вращения коленчатого вала двигателя, а также силы сопротивления движению автомобиля, которые от этой скорости зависят.

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

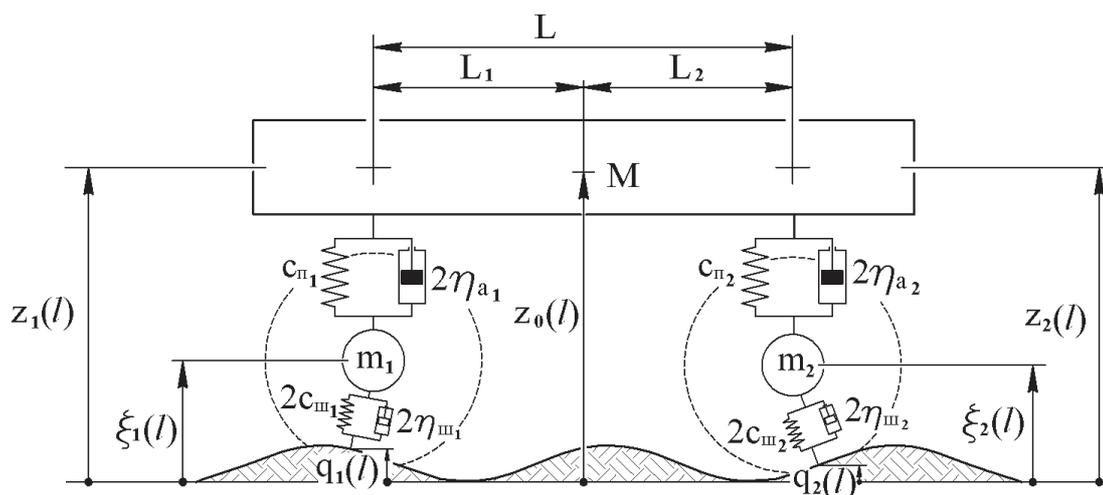


Рис.1. Колебательная система автомобиля при движении по дороге с неровным микропрофилем

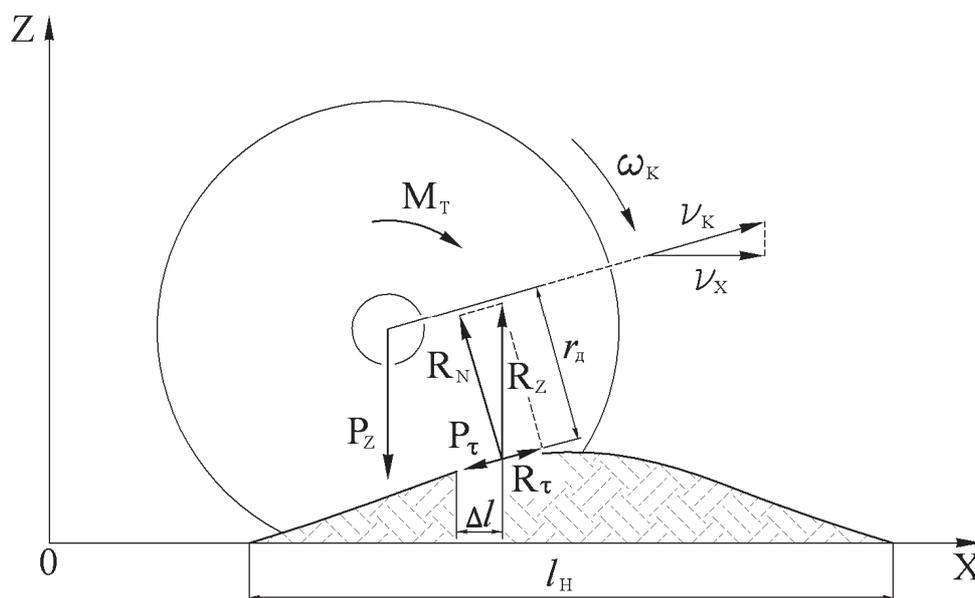


Рис.2. Силы и моменты, действующие на автомобильное колесо при качении в ведущем режиме по неровной дороге

На схемах приняты следующие обозначения: M – поддресоренная масса автомобиля; J – момент инерции поддресоренной массы; m_1 и m_2 – передняя и задняя неподдресоренные массы автомобиля; L – база автомобиля; L_1 и L_2 – расстояния от центра тяжести поддресоренной массы до осей передних и задних колёс по горизонтали; $C_{ш1}$ и $C_{ш2}$ – коэффициенты нормальной жесткости автомобильных шин переднего и заднего колёс; $C_{п1}$ и $C_{п2}$ – коэффициенты вертикальной жёсткости передней и задней подвесок; η_{a1} и η_{a2} – коэффициенты неупругого сопротивления амортизаторов передней и задней подвесок; $\eta_{ш1}$ и $\eta_{ш2}$ – коэффициенты неупругого сопротивления автомобильных шин переднего и заднего колёс; l_H –

длина неровности дороги; ω_k – угловая скорость вращения автомобильного колеса; Z_1 и Z_2 – вертикальное положение передней и задней частей поддресоренной массы; Z_0 – вертикальное положение центра тяжести поддресоренной массы; ξ_1 и ξ_2 – вертикальное положение передней и задней неподдресоренных масс; q_1 и q_2 – возмущающие воздействия дороги на передние и задние колёса.

Колебания автомобиля описываются системой из четырех дифференциальных уравнений второго порядка:

$$1) M\ddot{Z}_0 = C_{п1}(\xi_1 - Z_1 + H_1 - R_1) + 2\eta_{a1}(\dot{\xi}_1 - \dot{Z}_1) + C_{п2}(\xi_2 - Z_2 + H_2 - R_2) + 2\eta_{a2}(\dot{\xi}_2 - \dot{Z}_2) - Mg;$$

$$\begin{aligned}
 2) J\ddot{\alpha} &= L_1 C_{\Pi 1} (\xi_1 - Z_1 + H_1 - R_1) + 2L_1 \eta_{A1} (\dot{\xi}_1 - \dot{Z}_1) - \\
 &- L_2 C_{\Pi 2} (\xi_2 - Z_2 + H_2 - R_2) - \\
 &- 2L_2 \eta_{A2} (\dot{\xi}_2 - \dot{Z}_2) - L_1 M_1 g + L_2 M_2 g; \\
 3) m_1 \ddot{\xi}_1 &= - C_{\Pi 1} (\xi_1 - Z_1 + H_1 - R_1) - \\
 &- 2\eta_{A1} (\dot{\xi}_1 - \dot{Z}_1) + 2C_{\Pi 1} (q_1 - \xi_1 + R_1) + \\
 &+ 2\eta_{\Pi 1} (\dot{q}_1 - \dot{\xi}_1) - m_1 g; \\
 4) m_2 \ddot{\xi}_2 &= - C_{\Pi 2} (\xi_2 - Z_2 + H_2 - R_2) - \\
 &- 2\eta_{A2} (\dot{\xi}_2 - \dot{Z}_2) + 2C_{\Pi 2} (q_2 - \xi_2 + R_2) + \\
 &+ 2\eta_{\Pi 2} (\dot{q}_2 - \dot{\xi}_2) - m_2 g,
 \end{aligned}$$

где H_1 и H_2 – положения передней и задней частей подрессоренной 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;

$$\alpha = \frac{Z_1 - Z_2}{L} \quad \text{и} \quad Z_0 = \frac{Z_1 L_2 + Z_2 L_1}{L}; \quad M_1 = \frac{M g L_2}{L} \quad \text{и} \quad M_2 = \frac{M g L_1}{L}.$$

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

$$\begin{aligned}
 R_{z1} &= (M_1 + m_1)g + C_{\Pi 1} (\xi_1 - Z_1 + H_1 - R_1) + \\
 &+ 2\eta_{A1} (\dot{\xi}_1 - \dot{Z}_1) + 2C_{\Pi 1} (q_1 - \xi_1 + R_1) + \\
 &+ 2\eta_{\Pi 1} (\dot{q}_1 - \dot{\xi}_1); \\
 R_{z2} &= (M_2 + m_2)g + C_{\Pi 2} (\xi_2 - Z_2 + H_2 - R_2) + \\
 &+ 2\eta_{A2} (\dot{\xi}_2 - \dot{Z}_2) + 2C_{\Pi 2} (q_2 - \xi_2 + R_2) + \\
 &+ 2\eta_{\Pi 2} (\dot{q}_2 - \dot{\xi}_2).
 \end{aligned}$$

При решении уравнений также задаются и проверяются условия отрыва автомобильных шин от дорожной поверхности.

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 $\arctg \frac{q_k - q_n}{\Delta l}$,

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

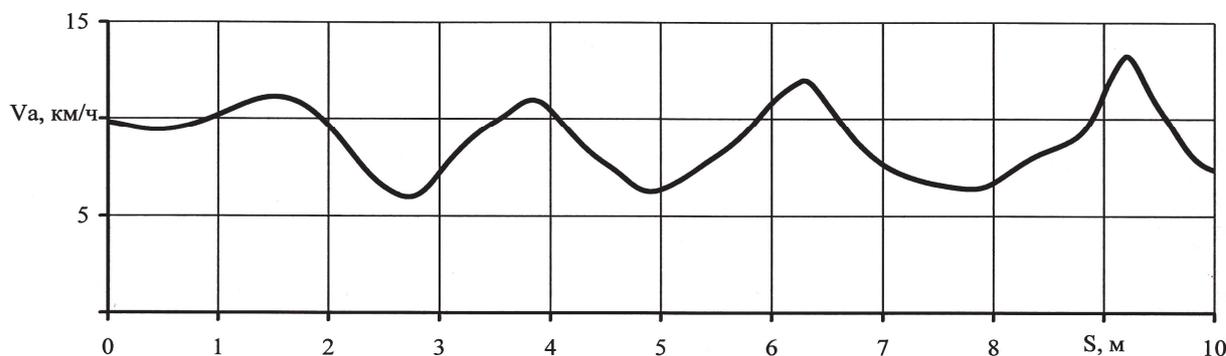
Исходя из принятой схемы, следует равенство углов: $\angle OX R_\tau = \angle R_N R_z$. Следовательно, нормальная реакция в контакте колес с дорожной поверхностью определяется следующим образом:

$$R_N = R_z \cos \angle R_N R_z. \quad \text{При этом динамический радиус} \quad r_d = r_0 - \frac{R_N}{C_{\Pi}},$$

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 $P_\tau = R_\tau = R_z \sin \angle R_N R_z$.

На рис. 3 приведены кривые изменения скорости и сил, действующих на автомобиль, при его движении по неровной дороге, рассчитанные по разработанной математической модели. Для расчётов были приняты параметры легкового автомобиля малого класса и грунтовой дороги после дождя.



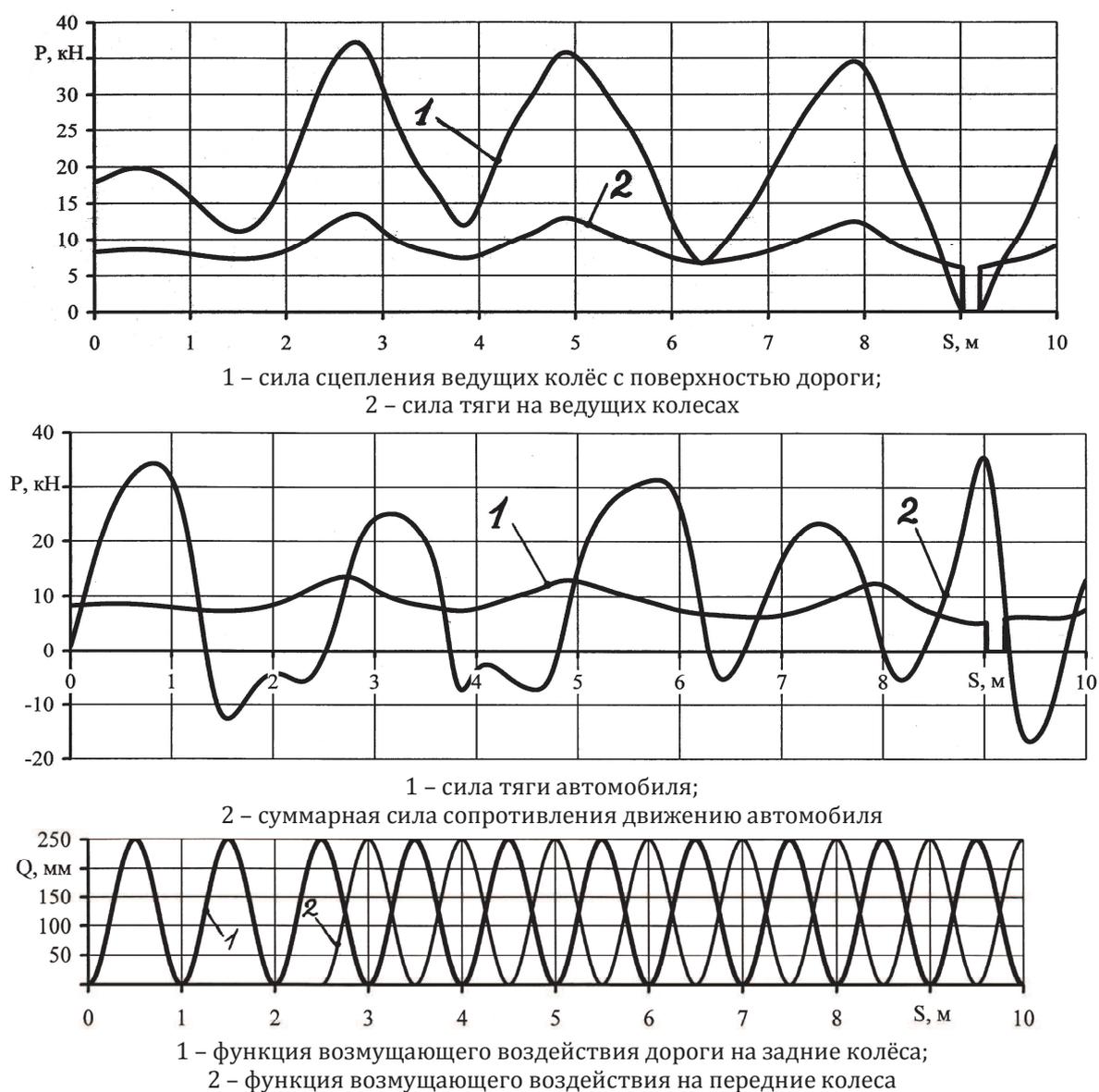


Рис.3. Скорость и силы, действующие на автомобиль, при движении по дороге с неровным микропрофилем

Кривые наглядно показывают моменты буксования и отрыва колёс от поверхности дороги. Тем не менее, кратковременное невыполнение условия возможности движения компенсируется инерцией масс автомобиля, что подтверждается его положительной скоростью, которая не уменьшается до нулевого значения.

Разработанная математическая модель может быть полезна при проведении исследований влияния колебательных параметров автомобиля на его тягово-скоростные свойства и опорную проходимость.

Литература

1. Енаев, А. А. Колебания автомобиля при тор-

можении и применение их исследования в проектных расчётах, технологии испытаний, доводке конструкции : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / А. А. Енаев ; МГТУ МАМИ. – М., 2002. – 440 с.

2. Слепенко, Е. А. Оценка стабильности контакта колёс автомобиля с опорной поверхностью : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / Е. А. Слепенко ; НАТИ – М., 2004. – 131 с.

3. Желтышев, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования топливной экономичности автомобиля при движении по неровной дороге : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / А. В. Желтышев ; БрГУ. – Братск, 2006. – 128 с.