

УДК 629.113

А. С. Мельников, канд. техн. наук, доц., И. С. Сазонов, д-р техн. наук, проф.,
В. А. Ким, д-р техн. наук, проф.

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДВЕСКИ МОТОЦИКЛА С ДИСКОВЫМ ТОРМОЗОМ НА ПОКАЗАТЕЛИ ТОРМОЗНОЙ ДИНАМИКИ

Рассмотрено влияние жесткости и демпфирования подвески мотоцикла на тормозной путь, время торможения и ускорение замедления. Для оценки влияния параметров подвески на показатели тормозной эффективности проводилось математическое моделирование процесса торможения мотоцикла. Установлено, что наибольшее влияние на показатели тормозной эффективности оказывает жесткость передней и задней подвесок, влияние коэффициентов демпфирования передней и задней подвесок на показатели тормозной эффективности не выявлено.

Для определения упругих и диссипативных характеристик подвески мотоцикла проводился анализ их влияния на параметры торможения.

Для этого выполним математическое моделирование процесса торможения мотоцикла с параметрами, соответствующими параметрам мотоцикла ММВЗ-3.1135, выпускаемого Минским мотовелозаводом

(ОАО «Мотовело»).

Мотоцикл при этом рассматривается как динамическая система с сосредоточенными параметрами: корпус – подвеска – движитель [1].

Динамическая модель (расчётная схема) выбранного объекта исследования представлена на рис. 1.

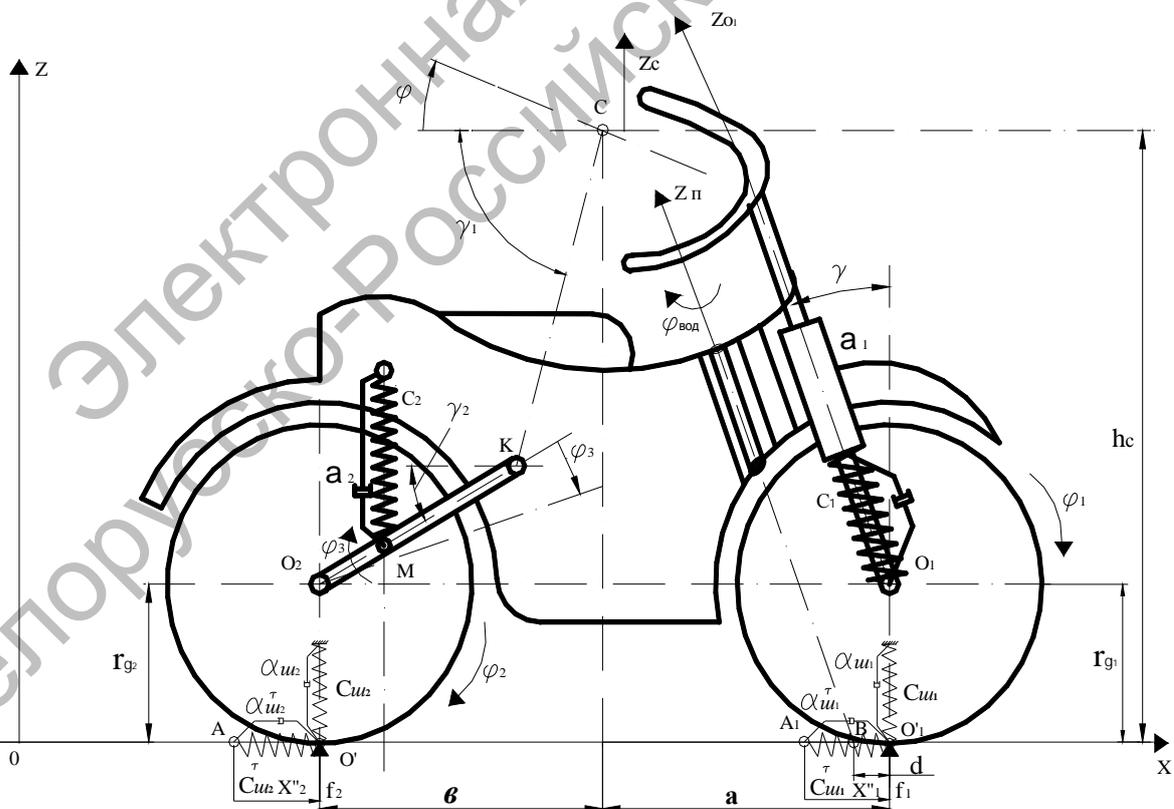


Рис. 1. Динамическая модель двухколесной самоходной машины

Для составления дифференциальных уравнений движения мотоцикла воспользуемся уравнением Лагранжа 2-го рода с неопределёнными множителями:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + Q_{qi}, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия системы; Π – потенциальная энергия системы; Φ – диссипативная функция системы; Q_{qi} – обобщённые силы; q_i – обобщённые координаты; \dot{q}_i – обобщённые скорости.

Рассматриваемая динамическая система характеризуется следующими обобщёнными координатами: x_c, z_c – координаты поступательного перемещения корпуса мотоцикла; φ – угол поворота остова мотоцикла; φ_1 – угол поворота переднего колеса мотоцикла; φ_2 – угол поворота заднего колеса мотоцикла; φ_3 – угол поворота рычага задней подвески мотоцикла; z_{O1} – координата перемещения центра масс переднего колеса.

Для определения кинетической энергии находим скорости центра масс колёс мотоцикла O_1 и O_2 :

– координаты точки O_1

$$x_{O_1} = x_c - z_{O_1} \cdot \sin \gamma_1 + X^{\Pi}; \quad (2)$$

– координаты точки O_2

$$\begin{cases} x_{O_2} = x_c - C_{O_2} \cdot \cos(\gamma_1 - \varphi) - \\ - K_{O_2} \cdot \cos(\gamma_2 - \varphi_3) + X^{\Pi}; \\ z_{O_2} = z_c - C_{O_2} \cdot \sin(\gamma_1 - \varphi) - \\ - K_{O_2} \cdot \sin(\gamma_2 - \varphi_3); \end{cases} \quad (3)$$

– скорости точки O_1

$$\begin{cases} \dot{x}_{O_1} = \dot{x}_c - \dot{z}_{O_1} \cdot \sin \gamma + \dot{x}^{\Pi}; \\ \dot{z}'_{O_1} = \dot{z}_{O_1} \cdot \cos \gamma; \end{cases} \quad (4)$$

– скорости точки O_2

$$\begin{cases} \dot{x}_{O_2} = \dot{x}_c + \dot{\varphi}_3 \cdot C_{O_2} \cdot \sin(\gamma - \varphi) + \\ + \dot{\varphi}_3 \cdot K_{O_2} \cdot \sin(\gamma_2 - \varphi_3) + \dot{X}^{\Pi}; \\ \dot{z}_{O_2} = \dot{z}_c + \dot{\varphi} \cdot C_{O_2} \cdot \cos(\gamma_1 - \varphi) + \\ + \dot{\varphi} \cdot K_{O_2} \cdot \cos(\gamma_2 - \varphi_3). \end{cases} \quad (5)$$

Компоненты, входящие в уравнение Лагранжа 2-го рода:

- кинетическая энергия системы

$$\begin{aligned} T = \frac{1}{2} \cdot \{ & M \cdot \frac{\dot{z}_c^2}{2} + M \cdot \dot{x}_c^2 + \dot{z}_{O_1}^2 \cdot \cos^2 \gamma + \\ & + m_{K_1} \cdot (\dot{x}_c - \dot{z}_{O_1} \cdot \sin \gamma + X_1^{\Pi})^2 + \\ & + m_{K_2} \cdot [\dot{x}_c + \dot{\varphi} \cdot C_{O_2} \cdot \sin(\gamma - \varphi) + \\ & + \dot{\varphi}_3 \cdot K_{O_2} \cdot \sin(\gamma_2 - \varphi_3) + X_2^{\Pi}]^2 + \\ & + I \cdot \dot{\varphi}^2 + I_p \cdot \dot{\varphi}_3^2 + I_{K_1} \cdot \dot{\varphi}_1^2 + I_{K_2} \cdot \dot{\varphi}_2^2 \}; \quad (6) \end{aligned}$$

– потенциальная энергия системы

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{1}{2} \cdot [& c_1 \cdot (z_{O_1} - z_c \cdot \cos \gamma + a \cdot \varphi + f_1) + \\ & + c_2 \cdot (K \cdot M \cdot \varphi_3 - b \cdot \varphi + f_2)^2 + \\ & + c_{m_1}^r \cdot (X_2^{\Pi})^2 + c_{m_2}^r \cdot (X_1^{\Pi})^2 + c_{m_1} \times \\ & \times (z_{O_1} \cdot \cos \gamma)^2 + c_{m_2} \cdot (K_{O_2} \cdot \sin \varphi_3)^2]^2; \quad (7) \end{aligned}$$

– диссипативная функция системы

$$\begin{aligned} \Phi = \frac{1}{2} \cdot [& \alpha_1 \cdot (\dot{z}_{O_1} + \dot{z}_c \cdot \cos \gamma + a \cdot \dot{\varphi} + \dot{f}_1)^2 + \\ & + \alpha_{m_2}^r \cdot (K \cdot M \cdot \dot{\varphi}_3 - b \cdot \dot{\varphi} + \dot{f}_2)^2 + c_{m_1} \times \\ & \times (\dot{X}_2^{\Pi})^2 + \alpha_{m_2}^r \cdot (\dot{X}_1^{\Pi})^2 + \alpha_{m_1} \cdot (\dot{z}_c \cdot \cos \gamma)^2 + \\ & + \alpha_{m_2} \cdot (K_{O_2} \cdot \sin \varphi_3)^2]^2; \quad (8) \end{aligned}$$

– обобщённые силы по координате φ

$$Q_{\varphi} = (T_1 + T_2) \cdot h_c; \quad (9)$$

$$N_1 = \frac{g \cdot m_m \cdot b}{a + b}; \quad N_2 = \frac{g \cdot m_m \cdot a}{a + b}; \quad (10)$$

$$Q_{X_c} = -\left(N_1 + c_{1m} \cdot z_{O_1} \cdot \cos \gamma\right) \times \\ \times \varphi_{cu_1} - \left(N_2 - c_{2m} \cdot K_{O_2} \cdot \varphi_3\right) \cdot \varphi_{cu_2}; \quad (11)$$

$$Q_\varphi = \left(N_1 + c_{1m} \cdot z_{O_1} \cdot \cos \gamma\right) \cdot \varphi_{cu_1} \cdot h_c + \\ + \left(N_2 - c_{2m} \cdot K_{O_2} \cdot \varphi_3\right) \cdot \varphi_{cu_2} \cdot h_c; \quad (12)$$

$$Q_{z_{O_1}} = \left(N_1 + c_{1m} \cdot z_{O_1} \cdot \cos \gamma\right) \cdot \sin \gamma \cdot \varphi_{cu_1}; \quad (13)$$

$$Q_{\varphi_3} = K_{O_2} \cdot \left(N_2 + c_{2m} \cdot K_{O_2} \cdot \varphi_3\right) \times \\ \times \varphi_{cu_2} \cdot \sin(\gamma_2 - \varphi_3); \quad (14)$$

$$Q_{\varphi_{1,2}} = -M_{T_{1,2}}; \quad (15)$$

$$\left|M_{T_{1,2}}\right| \leq \left[N_{1,2} \pm c_{1m,2m} \times \right. \\ \left. \times \left(f_{1,2} - z_{O_1} \cdot \cos \gamma\right)\right] \cdot \varphi_{cu_{1,2}} \cdot r_{g_{1,2}}. \quad (16)$$

Определив составляющие уравнения (1) по координатам, получаем дифференциальные уравнения движения мотоцикла:

$$\ddot{z}_c = \frac{c_1}{M} \cdot \left(z_{O_1} - z_c \cdot \cos \gamma + a \cdot \varphi + f_1\right) \cdot \cos \gamma + \\ + \frac{\alpha_1}{M} \cdot \left(\dot{z}_{O_1} - \dot{z}_c \cdot \cos \gamma + a \cdot \dot{\varphi} + \dot{f}_1\right) \cdot \cos \gamma; \quad (17)$$

$$\ddot{x}_c \cdot \left(M + m_{K_1} + m_{K_2}\right) + \ddot{x}_1'' \cdot \left(M + m_{K_1}\right) - \\ - \ddot{z}_{O_1} \cdot m_{K_1} \cdot \sin \gamma + \ddot{\varphi}_3 \cdot m_{K_2} \cdot C_{O_2}^2 \times \\ \times \sin(\gamma - \varphi) = -\varphi_3 \cdot \dot{\varphi} \cdot m_{K_2} \cdot C_{O_2}^2 - \\ - \frac{\xi}{\varphi_{cu_1} \cdot N_1 + \varphi_{cu_2} \cdot N_2} + z_{O_1} \cdot \cos \gamma \times \\ \times c_{1m} \cdot \varphi_{cu_1} - \varphi_3 \cdot c_{2m} \cdot K_{O_2} \cdot \varphi_{cu_2}; \quad (18)$$

$$\ddot{z}_{O_1} \left(m_{K_1} \cdot \cos^2 \gamma + m_{K_1} \cdot \sin \gamma\right) \cdot m_{K_1} - \\ - \ddot{x}_c \cdot m_{K_1} \cdot \sin \gamma - \ddot{x}_1'' \cdot m_{K_1} \cdot \sin \gamma = \\ = -c_1 \left(z_{O_1} - z_c \cdot \cos \gamma + a \cdot \varphi + f_1\right) - \\ - \alpha_1 \left(\dot{z}_{O_1} - \dot{z}_c \cdot \cos \gamma + a \cdot \dot{\varphi} + \dot{f}_1\right) + \\ + \left(N_1 + c_{1m} \cdot z_{O_1} \cdot \cos \gamma\right) \cdot \varphi_{cu_1} \cdot \sin \gamma \cdot x_1^n; \quad (19)$$

$$\ddot{x}_c \cdot m_{K_1} - \ddot{z}_{O_1} \cdot m_{K_1} \cdot \sin \gamma + \ddot{x}_1'' \cdot m_{K_1} = \\ = -c_1 \left(z_{O_1} - z_c \cdot \cos \gamma + a \cdot \varphi + f_1\right) - \\ - \alpha_1 \left(\dot{z}_{O_1} - \dot{z}_c \cdot \cos \gamma + a \cdot \dot{\varphi} + \dot{f}_1\right); \quad (20)$$

$$\ddot{x}_c \cdot m_{K_1} - \ddot{\varphi} \cdot m_{K_1} \cdot c_0^2 \cdot \sin(\gamma - \varphi) + J \cdot \ddot{\varphi} = \\ = m_{K_1} \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot c_0 \cdot (\gamma - \varphi) - c_1 \cdot \left(z_{O_1} - z_c \times \right. \\ \times \cos \gamma + f_1\right) \cdot a + c_2 \cdot \left(km \cdot \varphi_3 + f_2\right) \cdot b - \\ - \varphi \cdot \left(c_1 \cdot a^2 + c_2 \cdot b^2\right) - \alpha_1 \cdot \left(\dot{z}_{O_1} - \dot{z}_c \times \right. \\ \times \cos \gamma + \dot{f}_1\right) \cdot a + \alpha_2 \cdot \left(km \cdot \dot{\varphi}_3 + \dot{f}_2\right) \cdot b - \\ - \dot{\varphi} \cdot \left(\alpha_1 \cdot a^2 + \alpha_2 \cdot b^2\right) + \varphi_{cu_1} \cdot h_c \cdot \left(N_1 + \right. \\ \left. + c_1 \cdot z_{O_1} \cdot \cos \gamma\right) + \varphi_{cu_2} \cdot h_c \cdot \left(N_2 - c_{2m} \times \right. \\ \left. \times k_{O_2} \cdot \varphi_3\right) + m_{K_2} \left[\dot{x}_c + \dot{\varphi}_3 \cdot c_0 \cdot \sin(\gamma_2 - \varphi_3) + \right. \\ \left. + \dot{x}_2''\right] \cdot \dot{\varphi} \cdot c_0 \cdot c_{O_1} (\gamma - 4); \quad (21)$$

$$\ddot{\varphi}_3 \left[J - m_{K_2} \cdot c_0 \cdot \sin(\gamma - \varphi) \cdot k_{O_2} \times \right. \\ \times \cos(\gamma_2 - \varphi_3)\right] - \ddot{x}_c \cdot m_{K_2} \cdot k_{O_2} \times \\ \times \cos(\gamma_2 - \varphi_3) + \ddot{x}_2'' \cdot m_{K_2} \cdot k_{O_2} \times \\ \times \cos(\gamma_2 - \varphi_3) = -km \cdot c_2 \left(km \cdot \varphi_3 - \right. \\ - b \cdot \varphi + f_2\right) - km \cdot \psi_2 \cdot \left(km \cdot \dot{\varphi}_3 - \right. \\ - b \cdot \dot{\varphi}_3 + \dot{f}_2\right) + k_{O_2} \cdot \left(N_2 - c_{2m} \times \right. \\ \left. \times k_{O_2} \cdot \varphi_3\right) \cdot \varphi_{cu_2} \cdot \sin(\gamma_2 - \varphi_3) - \\ - m_{K_2} \left[\dot{x}_c \cdot \dot{\varphi} \cdot c_0 \cdot \sin(\gamma - \varphi) + \right. \\ \left. + \dot{\varphi}_3 \cdot k_{O_2} \cdot \sin(\gamma_2 - \varphi_3) + x_2''\right] \times \\ \times \dot{\varphi}_3 \cdot k_{O_2} \cdot \cos(\gamma_2 - \varphi_3); \quad (22)$$

$$J_{K_1} \cdot \ddot{\varphi}_1 = -M_{T_1}; \quad (23)$$

$$J_{K_2} \cdot \ddot{\varphi}_2 = -M_{T_2}. \quad (24)$$

Полученные результаты позволяют сделать качественную оценку колебаний нормальных реакций на передние колёса при торможении с детерминированными возмущениями со стороны опорной поверхности.

На рис. 2 и 3 приведены графики, иллюстрирующие изменение некоторых характеристик тормозной динамики мотоцикла при имитации с помощью представленной модели процесса экстренного торможения со скорости 8,3 и 11,1 м/с на горизонтальной асфальтированной сухой дороге [2].

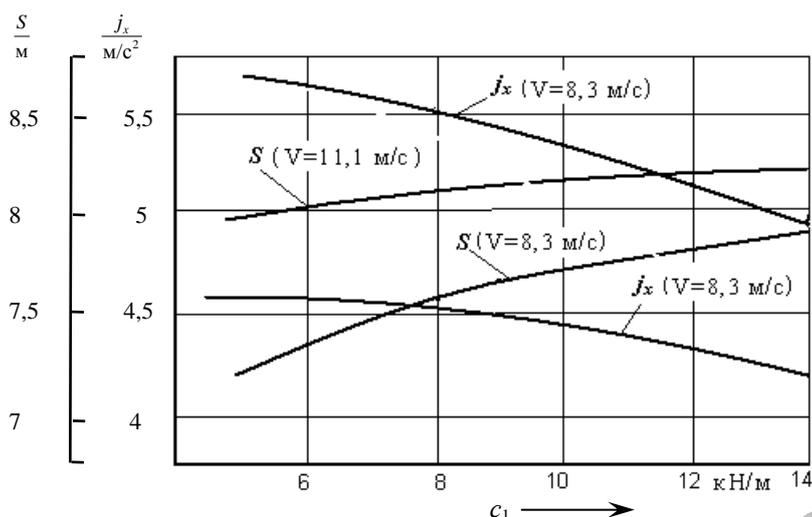


Рис. 2. Зависимость ускорения замедления и тормозного пути от жесткости передней подвески c_1

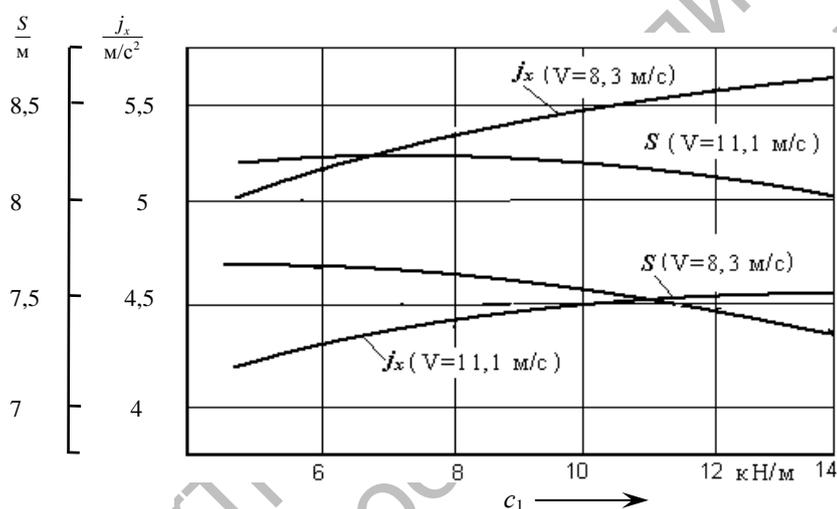


Рис. 3. Зависимость ускорения замедления и тормозного пути от жесткости задней подвески c_2

Для оценки влияния упругих и диссипативных характеристик подвески мотоцикла на показатели тормозной динамики выбирались следующие факторы варьирования (аргументы):

- коэффициент жёсткости передней подвески c_1 ;
- коэффициент жёсткости задней подвески c_2 ;
- коэффициент демпфирования передней подвески α_1 ;
- коэффициент демпфирования задней подвески α_2 .

В качестве показателей оценки ка-

чества тормозной системы машины принимаем:

- тормозной путь автомобиля S ;
- ускорение замедления j_x , м/с^2 ;
- коэффициент скольжения колеса $S_{ск}$.

При проведении исследования жесткость передней подвески c_1 , кН/м , варьировалась в следующих пределах: 14; 12; 10; 8; 6. Изменения коэффициента скольжения и ускорения замедления в зависимости от величины жесткости передней подвески приведены в табл. 1–4.

Исследовалось также влияние ко-

эффицентоф демпфирования на параметры торможения. Значение коэффициента демпфирования передней подвески α_1 , Н·с/м, варьировалось в следующих пределах: 2; 4; 6; 8. Изменение коэффициента демпфирования задней подвески произво-

дилось в таких же пределах, как и для передней подвески. Влияние коэффициентов демпфирования передней и задней подвесок на тормозные параметры мотоцикла не выявлено.

Табл. 1. Изменение коэффициента скольжения при жесткости передней подвески $c_1 = 14$ кН/м

Время торможения t , с	Скорость движения мотоцикла U , м/с	Угловая скорость переднего колеса ω , с ⁻¹	Коэффициент скольжения переднего колеса $S_{ск}$, %
0,16	8,221	27,992	0,35
0,4	7,928	27,236	1,3
0,8	7,445	24,538	2,7
1,2	6,972	20,04	15,2
1,6	6,512	13,743	37,7
2,00	6,068	5,643	72,5
2,160	5,894	1,974	90,1
2,250	5,798	0,00	100

Табл. 2. Изменение коэффициента скольжения при жесткости передней подвески $c_1 = 12$ кН/м

Время торможения t , с	Скорость движения мотоцикла U , м/с	Угловая скорость переднего колеса ω , с ⁻¹	Коэффициент скольжения переднего колеса $S_{ск}$, %
0,16	8,221	27,992	0,35
0,4	7,928	27,236	1,3
0,8	7,444	24,538	2,6
1,2	6,967	20,04	15,1
1,6	6,502	13,743	37,6
2,00	6,05	5,648	72,4
2,160	5,873	1,974	90,0
2,250	5,775	0,00	100

Табл. 3. Зависимость ускорения замедления и тормозного пути от жесткости передней подвески c_1

Жесткость передней подвески c_1 , кН/м	Ускорение замедления j_x , м/с ² , при начальной скорости $V = 11,1$ м/с	Тормозной путь при начальной скорости $V = 11,1$ м/с	Ускорение замедления j_x , м/с ² , при начальной скорости $V = 8,3$ м/с	Тормозной путь при начальной скорости $V = 8,3$ м/с
14	4,290	8,233	4,904	7,911
12	4,402	8,151	5,078	7,845
10	4,418	8,146	5,271	7,702
8	4,481	8,128	5,567	7,533
6	4,542	8,052	5,632	7,420

Табл. 4. Зависимость ускорения замедления и тормозного пути от жесткости задней подвески c_2

Жесткость передней подвески c_2 , кН/м	Ускорение замедления j_x , м/с ² , при начальной скорости $V = 11,1$ м/с	Тормозной путь при начальной скорости $V = 11,1$ м/с	Ускорение замедления j_x , м/с ² , при начальной скорости $V = 8,3$ м/с	Тормозной путь при начальной скорости $V = 8,3$ м/с
14	4,539	8,077	5,633	7,426
12	4,475	8,101	5,606	7,455
10	4,425	8,130	5,487	7,563
8	4,356	8,187	5,376	7,612
6	4,300	8,241	5,280	7,694

При расчете тормозной динамики мотоцикла сила сопротивления воздуха из уравнений исключалась, так как последняя является дополнительным фактором, препятствующим движению, и воздействие силы сопротивления воздуха на мотоцикл однозначно выражалось бы в повышении эффективности торможения (что является своеобразной гарантией сохранения значений полученных параметров тормозной динамики мотоцикла).

Кроме того, в процессе торможения происходит значительное снижение скорости движения мотоцикла и, как следствие, значительное снижение воздействия силы сопротивления воздуха на тормозную динамику мотоцикла.

В результате анализа влияния на параметры торможения упругих и диссипативных характеристик подвески мотоцикла было установлено, что: с уменьшением жесткости передней подвески сокращается тормозной путь и время торможения, возрастает ускорение замедления; с увеличением жесткости задней подвески уменьшаются тормозной путь и время торможения, возрастает ускорение замедления; изменение коэффициентов демпфирования передней и задней

подвесок не оказывает влияния на тормозной путь, ускорение замедления и время торможения; при уменьшении коэффициента демпфирования передней подвески возрастают угловые колебания остова мотоцикла; уменьшение коэффициента демпфирования задней подвески не оказывает значительного влияния на угловые колебания остова мотоцикла; коэффициент скольжения незначительно снижается при уменьшении жесткости передней подвески.

Уменьшение коэффициента скольжения составляет 0,1 % при уменьшении жесткости передней подвески на 2 кН/м; изменение жесткости задней подвески не оказывает значительного влияния на коэффициент скольжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ким, В. А.** Методология создания систем активной безопасности автотранспортных средств на основе силового анализа / В. А. Ким ; под ред. Р. И. Фурунжиева. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 344 с.
2. **Сазонов, И. С.** Стратегия управления полноприводных АТС / И. С. Сазонов // Автомобильная промышленность. – 2000. – № 8. – С. 12–13.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 20.06.2008

A. S. Melnikov, I. S. Sazonov, V. A. Kim
Influence of the main parameters of the motorcycle suspension with a disk brake on the indices of braking dynamics

The influence of motorcycle suspension rigidity and damping on the braking route, braking time and speeding-up of deceleration is considered in the paper. Mathematical simulation of motorcycle braking was carried out to evaluate the influence of suspension parameters on the indices of braking efficiency. It has been found that the indices of braking efficiency are mostly influenced by the rigidity of the front and back suspension. The influence of the damping coefficients of the front and back suspensions on the indices of braking efficiency is not revealed.