

$\dot{\omega}(t) = \Delta N_k / K_{з\text{диф}} \geq 5,235 \text{ рад/с}^2$. Коэффициент передачи $K_{з\text{диф}}$ составляет при этом $0,191 \text{ имп.с}^2/\text{рад}$, а интервал времени цикла дифференцирования (время запаздывания) $\Delta t_k = 2 \Delta t = 0,1 \text{ с}$.

Таким образом, рассмотренные варианты алгоритма работы цифрового дифференциатора 1) не обладают высокой точностью ($K_{диф} < 1$) определения значения производной $\dot{\omega}(t)$ при весьма скромном быстродействии ($\Delta t_k \geq 0,05 \text{ с}$); 2) цифровой дифференциатор с алгоритмом работы по уравнению (1) в электронных САУ трансмиссией автомобиля можно использовать лишь для определения знака Sign производной при значениях $\dot{\omega}(t) \geq 5 \text{ рад/с}^2$; 3) проблема разработки быстродействующего цифрового дифференциатора с циклом дифференцирования $\Delta t_k \leq 0,01 \text{ с}$ и коэффициентом передачи $K_{диф} \geq 1$ для применения в электронных системах автоматического управления трансмиссией автомобиля остается нерешенной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобильные электронные системы: Сб. статей/Пер. с англ. Под ред. Ю.М. Галкина. — М.: Машиностроение, 1982. — 144 с. 2. Автомобильные датчики: Сб. статей/Пер. с англ. Ю.Н. Савченко. — М.: Машиностроение, 1982. — 102 с. 3. А. с. 675366 (СССР). Устройство для измерения угловой скорости/В.А. Миклашевич, В.В. Мочалов. — Опубл. в Б.И., 1979, № 27. 4. А. с. 923895 (СССР). Устройство дистанционной передачи сигнала для транспортных средств/В.В. Мочалов, В.А. Миклашевич. — Опубл. в Б.И., 1982, № 16. 5. П и с к у н о в Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. — М.: Наука, 1976. — 456 с.

УДК 629.113—598

В.В. МОЧАЛОВ, канд.техн.наук (БПИ)

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗАМЕДЛЕНИЯ КОЛЕСА АВТОМОБИЛЯ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ В ДОКРИТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

При создании систем автоматического управления торможения автомобиля одной из наиболее информативных переменных является ускорение (замедление) колеса, что определяет необходимость детального исследования особенностей его изменения в процессе торможения.

В работах В.Д. Балакина [1] и Я.Н. Нефедьева [2] был обоснован экстремальный характер изменения замедления колеса при торможении в докритической по продольному скольжению зоне, т.е. когда коэффициент продольного скольжения S не превышает критического значения $S_{кр}$ ($S \leq S_{кр}$). В ходе разработки алгоритма управления противоблокировочной тормозной системы автомоби-

лей особо большой грузоподъемности нами были проведены экспериментальные исследования динамики колеса при торможении. Исследования подтвердили наличие такого экстремума замедления, однако не во всех условиях торможения. Для анализа этого явления, а также для оценки предлагаемой некоторыми иностранными фирмами, например фирмой Бош, возможности управления противоблокировочной системой по моменту обращения в ноль производной от сигнала замедления колеса и учитывая при этом имеющиеся в литературе высказывания о специфике торможения колес с большим моментом инерции, исследуем аналитически особенности замедления колеса при торможении в различных условиях.

Исходя из широко известного уравнения баланса сил, действующих на колесо при торможении, а также принимая линейной зависимость коэффициента φ продольного сцепления от коэффициента S продольного скольжения с коэффициентом пропорциональности k_1 и допуская постоянство скорости v_a автомобиля (скорости поступательного движения оси колеса) [3] при торможении колеса в докритической зоне, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$-\dot{v}_k(t) = M_T(t) \frac{r_d}{J} - \frac{G_k r_d^2}{J} k_1 \left(1 - \frac{v_k(t)}{v_a}\right), \quad (1)$$

где, кроме указанных: $-\dot{v}_k$ — окружное замедление колеса; M_T — тормозной момент, подведенный к колесу; r_d — динамический радиус колеса; J — приведенный момент инерции колеса; G_k — вертикальная нагрузка на колесо.

Дифференцируя уравнение (1) по времени и переходя к преобразованию Лапласа, получим в операторной форме

$$\dot{v}_k(p) \left(-p - \frac{G_k r_d^2}{J v_a} k_1\right) = M_T(p) \frac{r_d}{J} p.$$

Из последнего выражения, вводя обозначения

$$K_k = \frac{v_a}{G_k r_d k_1}; \quad T_k = \frac{J v_a}{G_k r_d^2 k_1}, \quad (2)$$

получим передаточную функцию рассматриваемой зависимости

$$W_k(p) = \frac{\dot{v}_k(p)}{M_T(p)} = - \frac{p K_k}{p T_k + 1}. \quad (3)$$

Выражение (3) представляет собой передаточную функцию дифференцирующего звена с запаздыванием с постоянной времени T_k и коэффициентом передачи K_k и определяет, таким образом, инерционные свойства объекта управления — колеса.

Оценим характер изменения замедления колеса при различных входных воздействиях. Для обратного преобразования к временным зависимостям будем использовать при этом обратное преобра-

зование Лапласа для рациональных алгебраических функций (для случаев некратных корней), выраженных отношением двух многочленов D_1 и D_2 — разложение Хевисайда [4]:

$$L^{-1} \left[\frac{D_1(p)}{D_2(p)} \right] = \sum_{k=1}^n \frac{D_1(p_k)}{D'(p_k)} e^{p_k t} . \quad (4)$$

При скачкообразном входном воздействии $M_T(p) = M_{T_{\max}}/p$, исходя из формул (3) и (2) и используя (4), получим выражение для экспоненциально уменьшающегося замедления колеса:

$$\dot{v}_k(t) = -M_{T_{\max}} e^{-t/T_k} \frac{1}{J} . \quad (5)$$

При линейно возрастающем во времени тормозном моменте: $M_T(t) = b_1 t$ и соответственно $M_T(p) = b_1/p^2$, где b_1 — темп возрастания тормозного момента, получим выражение для экспоненциально возрастающего по модулю значения замедления:

$$\dot{v}_k(t) = -b_1 (1 - e^{-t/T_k}) . \quad (6)$$

Сопоставляя выражения (6) и (5), можно сделать вывод о том, что при любом характере возрастания тормозного момента и последующем его ограничении, т.е. поддержании неизменного во времени значения, замедление колеса должно вначале увеличиваться, а затем уменьшаться, т.е. иметь экстремальную зависимость. Проверим последнее предположение для случая монотонно-гладкого возрастания тормозного момента до максимально возможного значения $M_{T_{\max}}$. Для этого примем экспоненциальным характер изменения тормозного момента:

$$M_T(p) = M_{T_{\max}}/[p(pT_T + 1)] , \quad (7)$$

где T_T — постоянная времени тормозного привода с тормозным механизмом. Тогда из выражения (3) с учетом (7) следует

$$\dot{v}_k(t) = -M_{T_{\max}} K_k \frac{e^{-t/T_k} - e^{-t/T_T}}{T_k - T_T} . \quad (8)$$

Определим экстремум функции (8), для чего продифференцируем ее по времени и приравняем нулю:

$$-M_{T_{\max}} K_k \left(\frac{1}{T_T} e^{-t/T_T} - \frac{1}{T_k} e^{-t/T_k} \right) / (T_k - T_T) = 0 .$$

Из последнего выражения определяем время t^l наступления экстремума:

$$t^l = T_T \frac{\Psi \ln \Psi}{\Psi - 1} , \quad \text{где } \Psi = T_k/T_T . \quad (9)$$

Неопределенность выражения (9) при $\Psi = 1$ раскроем по правилу Лопиталя:

$$\lim_{\Psi \rightarrow 1} \frac{t}{T_T} = \lim_{\Psi \rightarrow 1} \frac{\ln \Psi + 1}{1} = 1.$$

Значение появляющегося в начальной фазе торможения экстремума замедления колеса \dot{V}_K^l определим, подставляя выражение (9) в (8):

$$\dot{V}_K^l = -M_{T \max} \frac{r_d}{J} \frac{\Psi}{\Psi - 1} (e^{-t/T_K} - e^{-t/T_T}). \quad (10)$$

На рис. 1 проиллюстрировано изменение замедления колеса при торможении с различными постоянными времени T_T тормозного привода, рассчитанные по уравнению (8). При этом постоянная

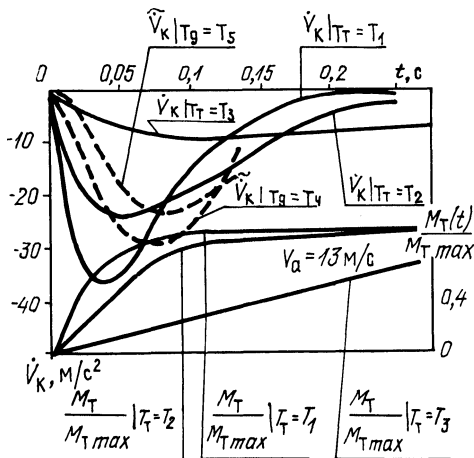


Рис. 1. Динамика изменения окружного замедления колеса \dot{V}_K и сигнала замедления \dot{V}_K при различных управляющих воздействиях $M_T(t)$: $T_1 = 0,0286$ с, $T_2 = 0,0573$ с, $T_3 = 0,1$ с, $T_4 = 0,25$ с, $T_5 = 0,05$ с, $T_K = 0,043$ с.

времени T_K задавалась для переднего колеса автосамосвала БелАЗ-549 неизменной и равной 0,043 с. Видно, что характер замедления — экстремальный, причем максимальное значение экстремума замедления соответствует торможению с минимальной постоянной времени тормозного привода $T_T = T_1 = 0,0286$ с, т.е. случаю экстренного торможения. Экстремум значителен и достигает 35 м/с². При этом экстремум наступает до окончания переходного процесса в тормозном приводе. Например, при повышении тормозного момента M_T , также показанного на рис. 1, за время приблизительно 0,1 с соответствующее время наступления экстремума 0,035 с.

Появление экстремума замедления может оказать существенное влияние на работу противоблокировочных тормозных систем (ПБС), алгоритм функционирования которых основан лишь на анализе ускорения колеса. В таких ПБС сигнал на уменьшение тормозного момента формируется при превышении замедлением колеса не-

которого порогового значения. Последнее должно соответствовать переходу колеса из зоны докритического в зону послекритического скольжения. Однако появляющийся в начале торможения экстремум замедления может превысить пороговое значение. Так как он появляется в зоне докритического скольжения, сигнал на уменьшение тормозного момента будет выработан преждевременно, и наступит "ложное" преждевременное растормаживание колеса, что серьезно ухудшит эффективность торможения. Поэтому требуются специальные меры для устранения подобного преждевременного растормаживания.

Оценим, сможет ли устранить этот, возникающий из-за экстремального замедления колеса, эффект преждевременного растормаживания фильтрация замедления, т.е. формирование электрического эквивалента — сигнала замедления колеса, осуществляемая, как правило, во всех электронных ПБС.

Обозначим через \tilde{v}_k ускорение колеса на выходе инерционного звена — фильтра, запаздывающее во времени по отношению к реальному ускорению колеса \dot{v}_k . Будем в дальнейшем называть \tilde{v}_k сигналом ускорения. Тогда в операторной форме имеем для фильтра первого порядка соотношение

$$\tilde{v}_k(p) = \frac{\dot{v}_k(p)}{pT_d + 1}, \quad (11)$$

где T_d — постоянная времени фильтра.

Учитывая зависимость (3), (7) и (11) и используя разложение Хевисайда (4), получим изменение переменной v_k во времени:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_k(t) = & -M_T \max K_k \frac{T_k e^{-t/T_k}}{(T_T - T_k)(T_d - T_k)} + \\ & + \frac{T_T e^{-t/T_T}}{(T_k - T_T)(T_d - T_T)} + \frac{T_d e^{-t/T_d}}{(T_k - T_d)(T_T - T_d)}. \end{aligned} \quad (12)$$

На рис. 1 нанесены штриховые кривые $\tilde{v}_k|_{T_d}$, построенные по выражению (12) при двух различных значениях постоянной времени фильтра $T_d = T_4 = 0,025$ с и $T_d = T_5 = 0,05$ с. Значения T_4 и T_5 соответствуют крайним возможным значениям реальной ПБС. Обе кривые построены при тех же исходных данных, что и кривая $\dot{v}_k|_{T_T = T_1}$. Видно, что после фильтрации снизилось значение экстремума замедления и увеличилось время его появления соответственно с 35 м/с² и $0,035$ с до $28,6$ м/с² и $0,06$ с в первом случае и $22,7$ м/с² и $0,08$ с во втором. Существенно при этом, однако, что при любых практически возможных значениях постоянных времени фильтра не устраняется возможность преждевременного рас-

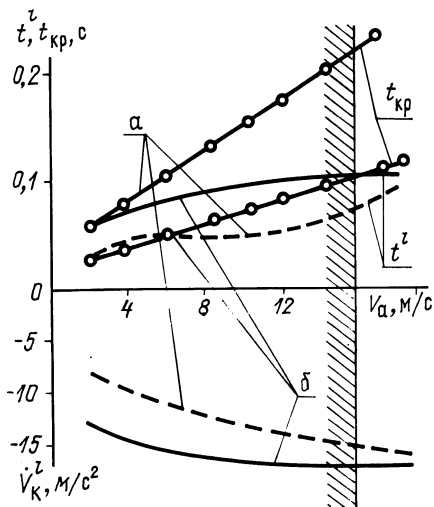


Рис. 2. Зависимость величины экстремума замедления колеса \dot{V}_K^z и время его появления t^1 от скорости автомобиля V_a :

а) при $\varphi_m = 0,6$; $S_{кр} = 0,2$; б) при $\varphi_m = 0,1$; $S_{кр} = 0,1$ ($t_{кр}^z$ — время достижения коэффициентом продольного скольжения критического значения $S_{кр}$).

тормаживания. Действительно, практически во всех зарубежных ПБС, растормаживающих колесо при превышении его замедлением порогового значения, последнее выбирается от 1 до 2g (g — ус-

корение свободного падения). Мы показали, что при экстренном торможении без блокирования замедление превышает 2,0g даже после фильтрации. Значительное же увеличение постоянной времени фильтра для сглаживания сигнала замедления и устранения преждевременного растормаживания практически нецелесообразно, так как ухудшает динамические свойства ПБС и ее эффективность.

Для определения областей существования экстремума замедления учтем, что при переходе колеса в послекритическую по скольжению зону замедление колеса возрастает — происходит его блокирование. Это говорит о том, что для наличия экстремума необходимо, чтобы время t^1 его появления было меньше времени $t_{кр}$ достижения критического значения $S_{кр}$ коэффициентом продольного скольжения. Последнее определим следующим образом. Интегрируя уравнение (8) и переходя от окружной скорости к коэффициенту скольжения S , получим

$$S = \frac{M_T \max S_{кр}}{G_K r_d \varphi_m} \left[1 - \frac{T_{кр} e^{-t/T_{кр}} - T_T e^{-t/T_T}}{T_{кр} - T_T} \right], \quad (13)$$

где φ_m — экстремум коэффициента φ .

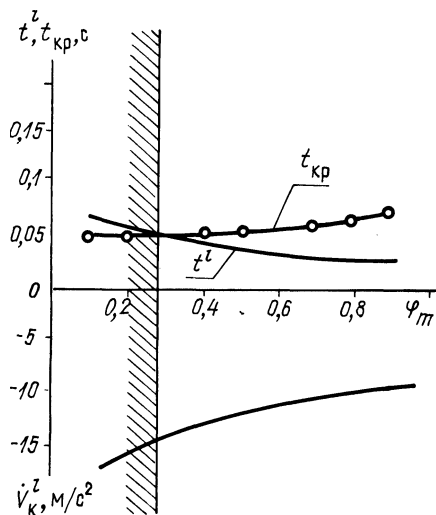
Из выражения (13) определяем время $t_{кр}$ достижения критического скольжения:

$$t_{кр} = t |_{S=S_{кр}}$$

На рис. 2 и 3 показаны зависимости экстремума замедления от параметров торможения в различных условиях. Расчет проведен для негруженого автомобиля БелАЗ-549 в случае экстренного торможения заднего колеса. Из рисунков следует, что значение экстремума замедления колеса при торможении уменьшается с

Рис. 3. Зависимость характеристик экстремума замедления от максимального коэффициента продольного сцепления φ_m :
 при $V_a = 5$ м/с, $S_{кр} = 0,1$.

уменьшением скорости автомобиля (рис. 2) и увеличивается с уменьшением коэффициента продольного сцепления (рис. 3). Наиболее заметен экстремум должен быть в области высоких скоростей движения (рис. 2, а) и высоких коэффициентов сцепления (рис. 3), когда времена t^1 и существенно различны, t^1 меньше $t_{кр}$.



Для хороших условий по сцеплению ($\varphi_m \geq 0,6$) экстремум существует при всех скоростях движения (рис. 2, а), а для низких значений φ_m — лишь при высоких скоростях (рис. 2, б, 3, справа от заштрихованной зоны, где $t^1 < t_{кр}$). При низких скоростях движения существование экстремума возможно лишь в условиях, когда коэффициент сцепления выше определенного граничного значения (рис. 3), причем, чем ниже скорость автомобиля, тем лучше должны быть условия по сцеплению для существования экстремума замедления колеса при торможении.

Таким образом, 1) получены аналитические выражения для определения экстремума замедления колеса при докритическом торможении; 2) существование указанного экстремума может привести к сбоям в работе противоблокировочных тормозных систем; 3) фильтрация сигнала замедления не устраняет его экстремум; 4) при торможении автомобиля особо большой грузоподъемности указанный экстремум отсутствует при низких скоростях движения и низких коэффициентах сцепления колеса с дорогой, что затрудняет использование этого явления в автоматических системах автомобилей подобного класса; 5) погрешность из-за допущения постоянства скорости автомобиля при аналитическом определении экстремума составляет не более 10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В.Д. Исследование устранения блокирования колес автомобиля при торможении: Автореф. дис. ... канд.техн.наук. — Омск, 1969. — 20 с.
2. Нефедьев Я.Н. Исследование процесса торможения автомобиля на аналоговой вычислительной машине. — Тр. НИИ Автоприборов. М.: ОНТИ, 1976, вып. 39, с. 155—167.
3. Мочалов В.В. Графоаналитическое исследование противоблокировочной тормозной системы методом фазового пространства. — Рукопись деп. в БелНИИТИ 20.05.80, № 155 — 80. Деп. — 18 с.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по механике. — М.: Наука, 1973, с. 234.