

Print. 16. Valivahin S.O., Porubajmeh V.I., Shevchenko S.A. Reguljator tisku gazu. Derzhavne pidpriemstvo «Konstruktors'ke bjuro «Pivdenne» im. M.K. Jangelja». Ukraïna, assignee. Patent. 76857, MPK(7) G05D 16/10. № u 20120527. 25 January 2013. 17. Dawson, B. Comparing floating point numbers. Web. 05 May 2014 <<http://www.cygnum-software.com/papers/comparingfloats/comparing-floats.htm>>

Поступила (received) 31.03.2014

УДК 629.017:681.532.58

**С. Н. ШУКЛИНОВ**, д-р техн. наук, доц., ХНАДУ, Харьков

## **АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТОРМОЖЕНИЕМ АВТОМОБИЛЯ С ПЕРЕНАСТРАИВАЕМОЙ МОДЕЛЬЮ**

Предложена структурная схема адаптивной автоматизированной системы управления тормозами автомобиля с перенастраиваемой моделью. Разработан метод определения порогового значения задающего воздействия, по которому определяется момент перенастройки коэффициента эффективности модели. Сформирована статическая характеристика управления торможением перенастраиваемой модели автомобиля.

**Ключевые слова:** автомобиль, торможение, управление, адаптивная система, перенастраиваемая модель, задающее воздействие, статическая характеристика.

**Введение.** Тормозное управление автомобиля в существенной мере определяет безопасность движения. В этой связи исследователи и разработчики тормозных систем уделяют значительное внимание их совершенствованию. Работы направлены на повышение эффективности торможения, сохранение устойчивости движения автомобиля при торможении, а также на повышение эффективности и качества управления. В последнем случае результаты исследований позволяют повысить комфортабельность управления торможением, которая оценивается коэффициентом эффективности тормозного управления  $k = j_a / P_n$  ( $j_a$  – замедление автомобиля;  $P_n$  – усилие на педали тормоза) [1]. Следует заметить, что при эксплуатации автомобилей различные возмущающие факторы изменяют коэффициент эффективности тормозного управления. Вследствие этого водителю приходится адаптироваться к изменившимся условиям, что увеличивает напряженность его работы и как следствие снижает безопасность движения. В этой связи при служебных торможениях автомобиля функции адаптации к меняющимся условиям рационально переложить на автоматическую систему с эталонной моделью. Для помощи водителю и повышения эффективности управления в случае экстренного торможения предлагаются автоматические системы – *Brake Assist* [2]. В этом случае обеспечивается автоматическое повышение коэффициента эффективности тормозного управления, что помогает водителю адаптироваться к изменившимся условиям и создать задающее воздействие, обеспечивающее быстрое формирование максимального управляющего воздействия на тормозные механизмы.

© С. Н. Шуклинов, 2014

**Анализ последних исследований.** Автор работы [3] отметил преимущества адаптивных систем с эталонной моделью по сравнению с обычными системами управления:

– обеспечение устойчивости и высоких качественно-точных показателей процессов управления при широких пределах изменения характеристик объекта;

– возможность упрощения основного контура управления за счет упрощения корректирующих устройств;

– простота реализации, вследствие чего их надежность может быть выше надежности обычных систем.

В работах [4, 5] авторами выполнена оценка устойчивости системы с эталонной моделью адаптивного управления тормозами и доказана целесообразность применения в качестве параметра оценки состояния системы – замедление автомобиля. Теоретические исследования параметров управления торможением автомобиля с адаптивным электропневматическим приводом тормозов при действии возмущающих факторов подтвердили достоинства систем управления с эталонной моделью [6, 7].

**Постановка задачи.** Адаптивные системы с эталонной моделью управления торможением [4] обеспечивают инвариантность статической характеристики тормозного управления, то есть обеспечивают пропорциональность замедления автомобиля усилию на педали тормоза при действии возмущающих факторов: изменении степени загрузки автомобиля, снижении коэффициентов эффективности тормозных механизмов, уменьшение эффективности тормозных контуров. Вследствие этого повышается комфортабельность управления служебным торможением и безопасность движения автомобилей.

Рациональное значение коэффициента эффективности определяется для *служебных торможений*, как наиболее распространенных. В случае экстренного торможения автомобиля рационально увеличить коэффициент эффективности тормозного управления  $k$ . При этом в адаптивных системах с моделью эту задачу можно решить, обеспечив перенастройку коэффициентов модели. То есть статическая характеристика перенастраиваемой модели должна иметь нелинейный характер.

**Уравнения состояния системы с эталонной моделью.** Динамическое состояние автомобиля при управлении торможением адаптивной системой с эталонной моделью описываются уравнениями состояния объекта управления (автомобиля) и его эталонной модели [4]

$$\ddot{y} = -a_1 \cdot \dot{y} + k \cdot \dot{u}(x), \quad (1)$$

$$\ddot{y}_m = -a_{1m} \cdot \dot{y}_m + k_m \cdot \dot{q}, \quad (2)$$

где  $\ddot{y}, \dot{y}_m$  – скорость изменения замедления автомобиля и эталонной модели;

$\dot{y}, \dot{y}_m$  – замедление автомобиля и эталонной модели;

$$a_1 = 2 \cdot \kappa_B \cdot F_a \cdot V_a / m_a \cdot \delta_{вр}, \quad a_{1m} = 2 \cdot \kappa_B \cdot F_a \cdot V_a / m_{ан} \cdot \delta_{вр}$$

– коэффициенты, характеризующие нестационарность процесса объекта

управления и эталонной модели;  $\kappa_b$  – коэффициент обтекаемости автомобиля;  $F_a$  – лобовая площадь автомобиля;  $V_a$  – скорость;  $m_a, m_{ан}$  – масса соответственно автомобиля и эталонной модели;  $\delta_{вр}$  – коэффициент учета вращающихся масс;  $\dot{i}(x), \dot{q}$  – функция скорости изменения управляющего воздействия соответственно автомобиля и эталонной модели;  $k, k_M$  – коэффициенты эффективности тормозного управления автомобиля и эталонной модели.

Эталонная модель описывает желаемые свойства реальной системы. Она строится в форме стационарного устройства на основе предварительных расчетов эффективности торможения. При этом параметры торможения модели соответствуют установившемуся торможению автомобиля для *снаряженного состояния*, у которого коэффициенты тормозных колес остаются постоянными. То есть масса модели  $m_{ан}$  равна сумме массы автомобиля в снаряженном состоянии и массы водителя, а коэффициент эффективности тормозного управления эталонной модели  $k_M = const$ .

**Структура системы управления с перенастраиваемой моделью.** Для формирования адаптивного тормозного управления автомобиля с нелинейной характеристикой, реализуемая аппаратным или программным путем модель должна быть перенастраиваемой. Блок-схема адаптивной автоматизированной системы управления тормозами (рис. 1) кроме водителя и основного контура управления, модели объекта (МО) и контура самонастройки включает в себя блок идентификации задающего воздействия, формируемого водителем. Блок идентификации *б* состоит из модели экстренного задающего воздействия *М*, определяющего пороговое значение  $q_n$  (переход к экстремному торможению) и блока настройки модели *7* объекта.

Входом представленной автоматизированной системы является задача управления в виде значения желаемого замедления автомобиля, определяемого водителем *1* в соответствии с дорожной обстановкой. При этом водитель формирует задающее воздействие  $x$  для основного контура управления и задающее воздействие  $q$  – для модели объекта. Результат управления водитель оценивает по сигналу обратной связи  $\gamma$ .

В соответствии с задающим воздействием  $x$  в основном контуре управления *2* на основании оценки ошибки управления  $\varepsilon$  формируется управляющее воздействие  $u(x)$ . Ошибка управления  $\varepsilon$  определяется в устройстве *3* в результате сравнения параметра оценки состояния системы – замедления автомобиля  $\dot{y}$  и замедления модели  $\dot{y}_M$ .

В блоке идентификации *б* по результатам сравнения сигналов, задающего воздействия  $q$  с выходом модели экстренного задающего воздействия  $q_n$ , реализуется модель задающего воздействия для МО с перенастраиваемыми коэффициентами. Перенастройка коэффициентов модели объекта выполняется при помощи блока настройки модели *7*.

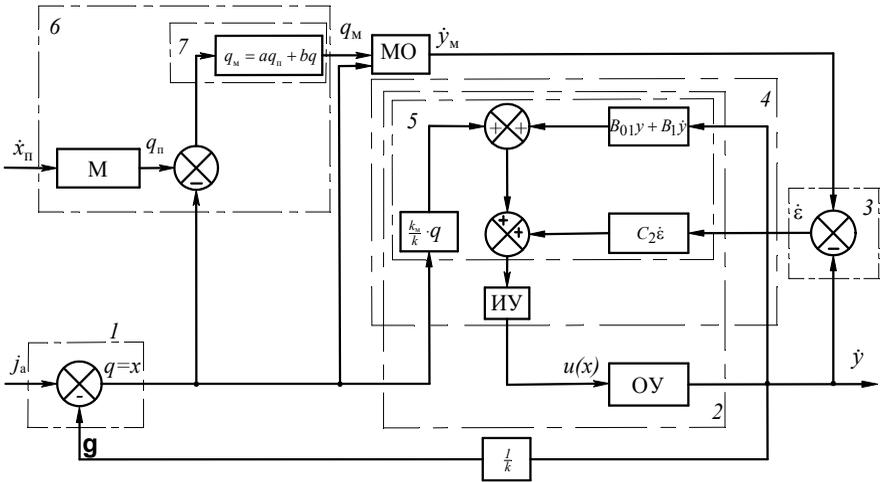


Рис. 1 – Структурная схема адаптивной автоматизированной системы управления тормозами автомобиля с перенастраиваемой моделью: 1 – водитель; 2 – основной контур управления; 3 – устройство сравнения; 4 – канал самонастройки; 5 – вычислительное устройство канала самонастройки; 6 – блок идентификации входного воздействия; 7 – блок настройки модели объекта.

Выходом блока настройки модели объекта 7 является сигнал  $q_m$ , в соответствии с которым определяется перенастраиваемый коэффициент эффективности модели  $k_m$ . Алгоритм работы блока настройки модели базируется на оценке значения задающего воздействия модели  $q_m$ , являющегося уставкой для перенастройки модели объекта,

$$q_m = a q_n + b q, \quad (3)$$

где

$$a = \begin{cases} 1, & \text{если } q \geq q_n, \\ 0, & \text{если } q < q_n; \end{cases} \quad b = \begin{cases} 1, & \text{если } q < q_n, \\ 0, & \text{если } q \geq q_n; \end{cases}$$

$q_n$  – значение порогового управляющего воздействия.

Значение порогового управляющего воздействия  $q_n$  отражает усилие на педали тормоза, определяющее экстренный характер торможения автомобиля. Следует заметить, что экстренный характер торможения определяется не только усилием на педали тормоза, но и темпом перемещения педали. Вследствие этого для определения характера торможения рационально использовать интегральный показатель – мощность, развиваемую водителем на педали тормоза. При этом значение порогового управляющего воздействия (усилия на педали тормоза) должно соответствовать пороговой мощности на педали тормоза. Пороговая мощность на педали тормоза является интегральным эргономическим параметром управления торможением автомобиля, превышение которой свидетельствует об экстренном характере формировании водителем задающего воздействия. Значение пороговой мощности определя-

ется эргономическими исследованиями и является постоянной величиной при

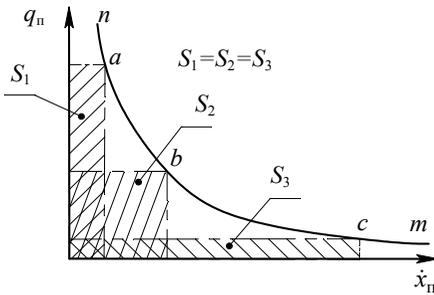


Рис. 2 – Определение порогового значения  $q_{п}$ .

заданном уровне пороговой мощности  $N_{пор}$  зависимость порогового воздействия  $q_{п}$  от скорости перемещения педали тормоза  $\dot{x}_{п}$  отражает кривая  $nm$  на рис. 2. Каждая точка кривой  $nm$  характеризует значение пороговой мощности на педали тормоза. Площади  $S_1, S_2$  и  $S_3$  одинаковые и равны значению пороговой мощности. Исходя из этого, определяем пороговое значение задающего воздействия  $q_{п}$

$$q_{п} = N_{пор} / \dot{x}_{п}, \quad (4)$$

где  $N_{пор}$  – пороговая мощность задающего воздействия;  $\dot{x}_{п}$  – скорость перемещения педали тормоза при за- тормаживании.

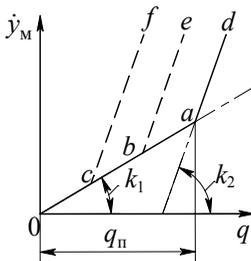


Рис. 3 – Статическая характеристика управления торможением перенастраиваемой модели автомобиля.

**Статическая характеристика управления торможением перенастраиваемой моделью.** Статическая характеристика управления торможением отражает зависимость установившегося замедления от управляющего воздействия. Для случая управления торможением перенастра-

иваемой моделью в виде луча  $0a$  (рис. 3), определяющего коэффициент эффективности при служебном торможении  $k_1$  и семейства отрезков, определяющих коэффициент эффективности в случае экстренного торможения  $k_2$ . Начало каждого из отрезка  $ad, be, cf$  соответствует достижению на педали пороговой мощности. При достижении мощности, подведенной к педали тормоза, порогового значения эффективность торможения повышается. При медленном нажатии на педаль тормоза характеристика тормозного управления модели соответствует участкам  $0-a$  и  $a-d$ . При быстром нажатии на педаль тормоза пороговое значение мощности развивается при меньшем задающем воздействии модели  $q_{м}$ . Точки  $a, b$  и  $c$  на рис. 2 соответствуют одноименным точкам на рис. 3, определяющих начало участков характеристики с большой эффективностью при различном темпе нарастания задающего воздействия. Вследствие перенастройки модели ее статическая характеристика определяется отрезком  $0a$  и семейством отрезков между участками  $ad$  и  $cf$ .

В соответствии со статической характеристикой управления торможением перенастраиваемой модели автомобиля зависимость замедления от задающего воздействия определяет уравнение

$$\dot{y}_M = (k_1 - k_2) \cdot q_M + k_2 q, \quad (5)$$

где  $k_1, k_2$  – соответственно коэффициенты эффективности соответственно при служебном и экстренном торможении.

Коэффициент эффективности тормозного управления перенастраиваемой модели является функцией задающего воздействия  $q$ . По определению его величина равна

$$k_M(q) = \frac{\dot{y}_M}{q}. \quad (6)$$

Коэффициент эффективности перенастраиваемой модели (6) с учетом выражения (5) в общем случае приобретает вид

$$k_M(q) = (k_1 - k_2) \cdot \frac{q_M}{q} + k_M \cdot q. \quad (7)$$

В случае служебного торможения сформированное водителем задающее воздействие  $q$  меньше порогового значения  $q_{\text{п}}$ , и в соответствии с зависимостью (3) в блоке настройки модели объекта формируется управляющее воздействие модели  $q_M = q$ . При этом перенастраиваемый коэффициент эффективности модели  $k_M(q)$  в соответствии с выражением (7) равен коэффициенту эффективности  $k_1$  (рис. 3).

Экстренное торможение характеризуется тем, что водитель быстро нажимает на педаль тормоза. При этом уровень порогового значения, задающего воздействия  $q_{\text{п}}$ , в соответствии с отношением (4) снижается. В этом случае задающее воздействие, формируемое водителем, превышает пороговое значение задающего воздействия  $q_{\text{п}}$ , и в блоке настройки модели объекта определяется в соответствии с зависимостью (3) управляющее воздействие модели  $q_M = q$ . В результате коэффициент эффективности тормозного управления перенастраиваемой модели принимает значение

$$k_M(q) = (k_1 - k_2) \cdot \frac{q_{\text{п}}}{q} + k_2. \quad (8)$$

В правой части выражения (8) имеет определенно- отрицательное значение и характеризует влияние на коэффициент эффективности  $k_M(q)$  темпа нарастания задающего воздействия  $q$ . Чем больше скорость перемещения педали тормоза  $\dot{x}_{\text{п}}$ , тем меньше пороговое значение задающего значения задающего воздействия  $q_{\text{п}}$ . И, следовательно, условие  $q > q_{\text{п}}$  выполняется при меньшем значении задающего воздействия  $q$ . Таким образом, коэффициент эффективности тормозного управления перенастраиваемой модели  $k_M(q)$  зависит не только от величины задающего воздействия  $q$ , но и от скорости пе-

ремещения педали тормоза во время приведения в действие тормозной системы.

**Выводы.** В данной работе предложена структурная схема адаптивной автоматизированной системы управления с перенастраиваемой моделью. Перенастройка модели тормозного управления выполняется при условии достижения мощности на педали тормоза, развиваемой водителем, своего порогового значения. Уставкой для перенастройки служит пороговое значение задающего воздействия. Предложенный метод позволяет определить пороговое значение задающего воздействия и коэффициента эффективности тормозного управления перенастраиваемой модели. Установлено, что коэффициент эффективности тормозного управления перенастраиваемой модели зависит не только от величины задающего воздействия, но и темпа его нарастания.

Статическая характеристика тормозного управления с адаптивной автоматизированной системой управления с перенастраиваемой моделью имеет расширенную рабочую область в случае экстренного торможения. В этом случае адаптивная система помогает водителю сформировать управляющее воздействие, причём как при служебных, так и при экстренных торможениях.

**Список литературы:** 1. Давыдов А.Д., Майборода О.В. Надежность управления автомобилем при торможении // Автомобильная промышленность. – 1981. – № 2. – С. 14. 2. Купе Mercedes CLK с новым аварийным тормозом Brems – Assistant // Автомобилестроение за рубежом. – 1998. – № 1. – С. 8 – 9. 3. Солодовников В.В., Шрамко Л.Ю. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями – М.: Машиностроение, 1972. – 260 с. 4. Туренко А.Н., Шуклинов С.Н., Вербицкий В.И. Оценка устойчивости системы адаптивного управления тормозами // Сб. науч. тр. ХНАДУ «Автомобильный транспорт». – Вып. 28. – Х., 2011. – С. 7 – 11. 5. Туренко А.Н., Шуклинов С.Н., Вербицкий В.И. Замедление колесной машины как параметр оценки состояния системы адаптивного тормозного управления // Сб. науч. тр. ХНАДУ «Автомобильный транспорт». – Вып. 31. – Х., 2012. – С. 7 – 12. 6. Туренко А.Н., Шуклинов С.Н., Михалеви́ч Н.Г. Электронепневматический привод тормозов с адаптивным управлением // Изв. ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы», Вып. 4: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 12(85). – С. 51 – 53. 7. Туренко А.Н., Шуклинов С.Н., Михалеви́ч Н.Г. Моделирование динамики колесной машины с адаптивным электронепневматическим приводом тормозов // Вестник ХНАДУ. – 2012. – Вып. 56. – С. 66 – 74.

**Bibliography (transliterated):** 1. Davydov, A. D., and O. V. "Majboroda Nadezhnost' upravlenija avtomobilem pri tormozhenii." *Avtomobil'naja promyshlennost'*. No. 2. 1981. Print. 2. "Kupe Mercedes CLK s novym avarijnym tormozom Brems – Assistant." *Avtomobilestroenie za rubezhom*. No. 1. 1998. 8–9. Print. 3. Solodovnikov, V. V., and L. Ju. Shramko. *Raschet i proektirovanie analiticheskikh samonastrajvajushhihsja sistem s jetalonnymi modeljami*. Moscow: Mashinostroenie, 1972. Print. 4. Turenko, A. N., S. N. Shuklinov and V. I. Verbickij. "Ocenka ustojchivosti sistemy adaptivnogo upravlenija tormozami." *Sb. nauch. trudov HNADU "Avtomobil'nyj transport"*. No. 28. Kharkov, 2011. 7–11. Print. 5. Turenko, A. N., S. N. Shuklinov and V. I. Verbickij. "Zamedlenie kolesnoj mashiny kak parametn ocenki sostojanija sistemy adaptivnogo tormoznogo upravlenija." *Sb. nauch. trudov HNADU "Avtomobil'nyj transport"*. No. 31. Kharkov, 2012. 7–12. Print. 6. Turenko, A. N., S. N. Shuklinov and N. G. Mihalevich. "Jelektropnevmaticheskij privod tormozov s adaptivnym upravleniem." *Izv. VolgGTU. Ser.: Nazemnye transportnye sistemy*. Vol. 4. No. 12 (85). Volgograd: VolgGTU, 2011. 51–53. Print. 7. Turenko, A. N., S. N. Shuklinov and N. G. Mihalevich. "Modelirovanie dinamiki kolesnoj mashiny s adaptivnym jelektropnevmaticheskim privodom tormozov." *Vestnik HNADU*. No. 56. 2012. 66–74. Print.

*Поступила (received) 03.04.2014*