

УДК 629.017:681.532.58

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

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
АВТОМОБИЛЯ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ НА ОБЛАСТЬ
УСТОЙЧИВОСТИ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТОРМОЖЕНИЕМ**

Представлены результаты анализа влияния конструктивных параметров автомобиля и параметров движения на область устойчивости адаптивной автоматической и автоматизированной системы управления торможением. Рассмотрены адаптивные тормозные системы с автоматизированным и частично автоматизированным тормозными приводами, в случае адаптивного регулятора воздействующего на основной контур управления и в случае его интегрирования в основной контур управления.

Ключевые слова: автомобиль, торможение, адаптивная система, система управления, устойчивость, замедление, ошибка управления, корректирующее воздействие.

Введение. При эксплуатации автомобиля его параметры изменяются. При этом некоторые из них, например, степень загрузки автомобиля, коэффициенты эффективности тормозных механизмов, коэффициенты эффективности тормозных контуров и другие оказывают влияние на эффективность тормозного управления. Адаптивные системы управления торможением в этом случае позволяют повысить качество управления торможением и эргономические показатели тормозного управления и как следствие – безопасность движения машин.

Данная работа посвящена определению зависимости области, определяющей устойчивость адаптивной системы управления торможением автомобиля в режиме служебного торможения от конструктивных параметров автомобиля.

Анализ публикаций. Результаты многих исследований показывают, что характеристики тормозных систем изменяются в зависимости от режима [1, 2] и климатических условий [3] эксплуатации автомобилей. В работе [4] показано, что характеристика управления торможением изменяется от степени загрузки автомобиля. Автором работы [5] исследован вопрос влияния характеристики тормозной системы на управляемость замедлением автомобиля. В этой связи для повышения качества управления замедлением автомобиля при действии возмущающих факторов авторами работ [6, 7] предложено адаптивное управление торможением автомобиля и сформирован закон изменения управляющего воздействия тормозными колесами, обеспечивающий инвариантность тормозного управления, а также обоснован параметр оценки состояния системы управления. В работе [8] представлена методика оценки устойчивости системы управления адаптивного управления тормозами. Авторы [9] предложили схему электропневматического привода тормозов с адаптивным управлением. Результаты моделирования динамики торможения автомобиля [10] подтверждают инвариантность тормозного управления с адаптивным электропневматическим приводом тормозов.

Из анализа публикаций следует, что исследования адаптивного управления торможением актуальны, так как направлены на формирование характеристики тормозного управления, соответствующей эргономическим требованиям. При этом следует отметить, что выполненные исследования не отражают анализа влияния конструктивных параметров автомобиля на область устойчивости системы управления торможением.

© С. Н. Шуклинов, 2014

Цель и постановка задачи. Целью настоящей работы является анализ влияния конструктивных параметров автомобиля и параметров движения на область устойчивости адаптивной системы управления торможением.

Структурная схема адаптивной системы управления и алгоритм настройки регулятора. Адаптивная система управления может быть частью автоматической или автоматизированной системы управления торможением. В первом случае задающее воздействие формируется автоматически на основе результатов обработки информации сигналов датчиков, оценивающих ситуацию при движении автомобиля. Во втором случае задающее воздействие формирует водитель в соответствии с определенной задачей управления. Структурная схема и алгоритм настройки регулятора определяется типом системы управления. Для адаптивной системы автоматической системы управления тормозами структурная схема имеет вид, представленный на рис. 1, а алгоритм настройки адаптивного регулятора описывается выражением (1).

$$\begin{aligned} \text{если } \dot{u}(x) > \frac{k_m}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1m} - a_1)}{k} \cdot \dot{y}, \text{ то } \xi < B_0 \cdot y + B_1 \cdot \dot{y} + C_0 \cdot \delta + C_2 \cdot \dot{\epsilon}, \\ \text{если } \dot{u}(x) = \frac{k_m}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1m} - a_1)}{k} \cdot \dot{y}, \text{ то } \xi = B_0 \cdot y + B_1 \cdot \dot{y} + C_0 \cdot \delta + C_2 \cdot \dot{\epsilon}, \\ \text{если } \dot{u}(x) < \frac{k_m}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1m} - a_1)}{k} \cdot \dot{y}, \text{ то } \xi > B_0 \cdot y + B_1 \cdot \dot{y} + C_0 \cdot \delta + C_2 \cdot \dot{\epsilon}. \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{u}(x)$ – функция скорости изменения управляющего воздействия (например, скорость изменения давления воздуха или жидкости) от задающего воздействия x ;

k, k_m – коэффициенты эффективности тормозного управления автомобиля и его эталонной модели;

\dot{q} – скорость изменения управляющего воздействия эталонной модели;

a, a_m, a_1, a_{1m} – коэффициенты, характеризующие нестационарность процесса торможения автомобиля и эталонной модели [7, 8];

y, \dot{y} – скорость и замедление автомобиля;

ξ – корректирующее воздействие регулятора;

$B_0 = \frac{a_m - a}{k \cdot \eta(x)}$; $B_1 = \frac{k_m}{k^2 \cdot \eta(x)}$; $C_0 = \frac{k_m}{k \cdot \eta(x)} - 1$; $C_2 = \frac{1}{\lambda \cdot k \cdot \eta(x)}$ – коэффициенты

алгоритма управления;

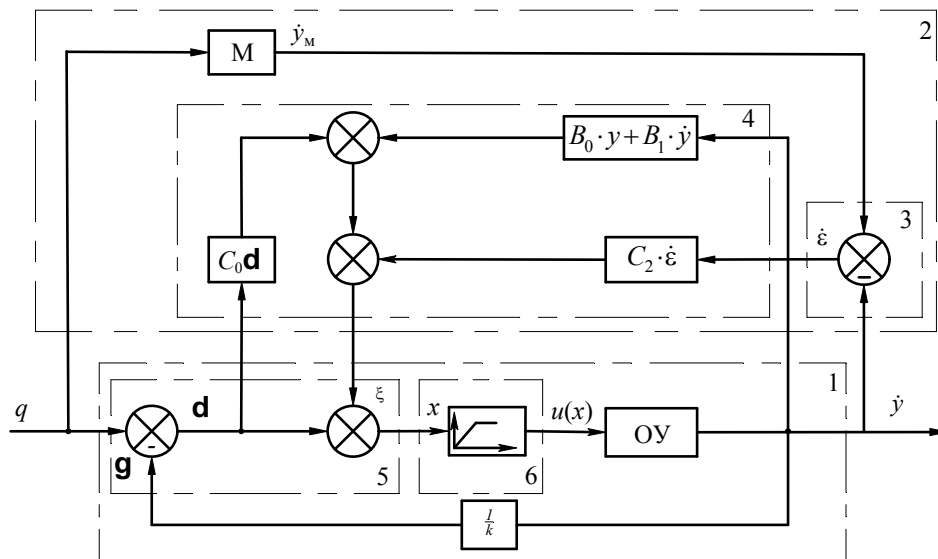
$\eta(x)$ – коэффициент передачи тормозного привода (коэффициент пропорциональности между входом и выходом функции $u(\delta + \xi)$);

δ – разница задающего сигнала и сигнала обратной связи;

$\dot{\epsilon} = \dot{y}_m - \dot{y}$ – отклонение замедления автомобиля от эталонных значений при действии возмущений (ошибка управления);

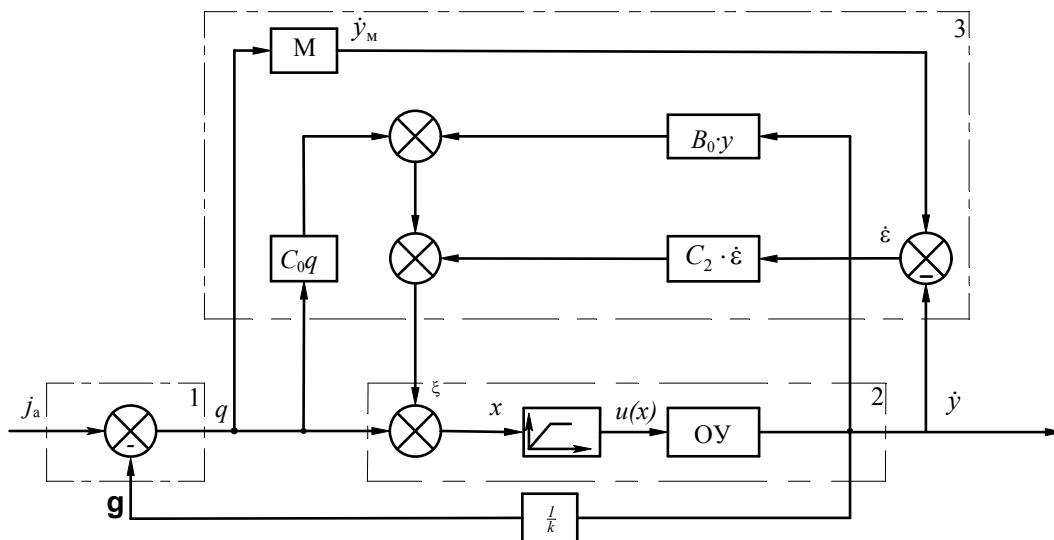
λ – постоянный положительный коэффициент.

Адаптивная автоматизированная система управления тормозами автомобиля в отличие от автоматической не имеет обратной связи в основном контуре управления (рис. 2), так как задающее воздействие формирует водитель. При этом канал самонастройки может быть выполнен в основном контуре управления (рис. 3). В этом случае вычислительное устройство 5 канала самонастройки 4 формирует управляющее воздействие $u(x)$. В такой системе управления, задающее воздействие q , формируемое водителем, не имеет энергетической составляющей в формировании управляющего воздействия $u(x)$.



1 – основной контур управления; 2 – контур коррекции; 3 – устройство сравнения; 4 – канал коррекции; 5 – регулятор; 6 – устройство управления; ОУ – объект управления (автомобиль); М – эталонная модель торможения автомобиля; $\gamma = \dot{y} \frac{1}{k}$ – сигнал обратной связи.

Рисунок 1 – Структурная схема адаптивной автоматической системы управления торможением автомобиля



1 – водитель; 2 – основной контур управления; 3 – блок самонастройки.

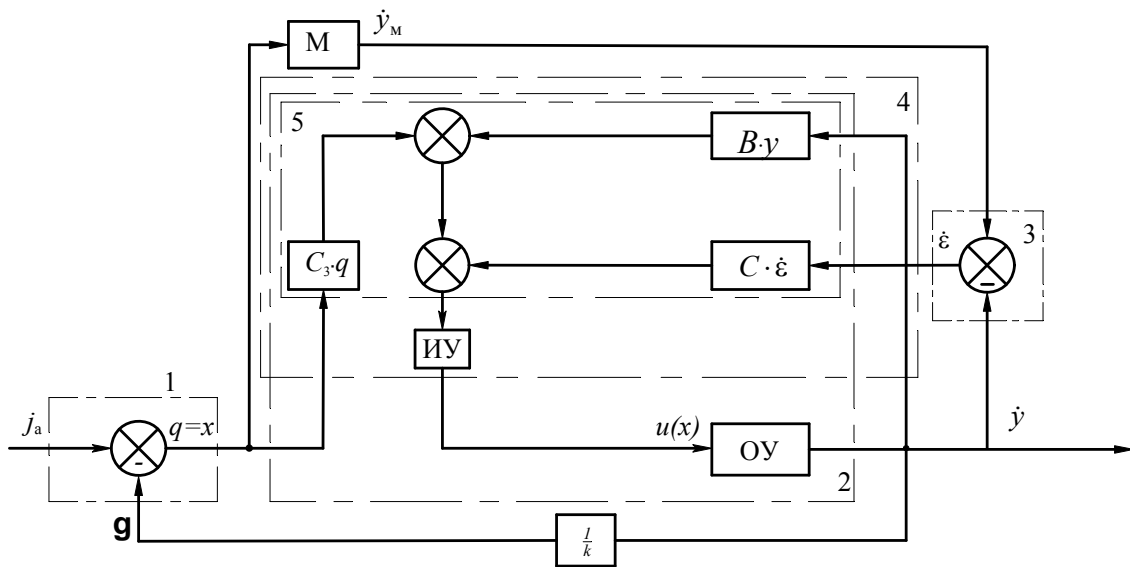
Рисунок 2 – Структурная схема адаптивной автоматизированной системы управления тормозами автомобиля без обратной связи в основном контуре

Алгоритм настройки (2) регулятора адаптивной автоматизированной системы управления тормозами определяет корректирующее воздействие ξ , которое компенсирует ошибку управления $\dot{\epsilon}$. В основном контуре управления задающее

воздействие q и корректирующее воздействие ξ формируют управляющее воздействие $u(x)$.

$$\begin{aligned} \text{если } \dot{u}(x) &> \frac{k_m}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1m} - a_1)}{k} \cdot \dot{y}, \text{ то } \xi < C_0 \cdot q + C_2 \cdot \dot{\varepsilon} + B_0 \cdot y, \\ \text{если } \dot{u}(x) &= \frac{k_m}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1m} - a_1)}{k} \cdot \dot{y}, \text{ то } \xi = C_0 \cdot q + C_2 \cdot \dot{\varepsilon} + B_0 \cdot y, \\ \text{если } \dot{u}(x) &< \frac{k_m}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1m} - a_1)}{k} \cdot \dot{y}, \text{ то } \xi > C_0 \cdot q + C_2 \cdot \dot{\varepsilon} + B_0 \cdot y. \end{aligned} \quad (2)$$

Алгоритм настройки (3) адаптивной автоматизированной системы управления тормозами с каналом самонастройки в основном контуре определяет управляющее воздействие $u(x)$.



1 – водитель; 2 – основной контур управления; 3 – устройство сравнения; 4 – канал самонастройки; 5 – вычислительное устройство канала самонастройки; ИУ – исполнительное устройство канала самонастройки.

Рисунок 3 – Структурная схема адаптивной автоматизированной системы управления тормозами автомобиля с каналом самонастройки в основном контуре

$$\begin{aligned} \text{если } \dot{u}(x) &> \frac{k_m}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1m} - a_1)}{k} \cdot \dot{y}, \text{ то } u(x) < C_3 \cdot q + B \cdot y + C \cdot \dot{\varepsilon}, \\ \text{если } \dot{u}(x) &= \frac{k_m}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1m} - a_1)}{k} \cdot \dot{y}, \text{ то } u(x) = C_3 \cdot q + B \cdot y + C \cdot \dot{\varepsilon}, \\ \text{если } \dot{u}(x) &< \frac{k_m}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1m} - a_1)}{k} \cdot \dot{y}, \text{ то } u(x) > C_3 \cdot q + B \cdot y + C \cdot \dot{\varepsilon}. \end{aligned} \quad (3)$$

где $C_3 = \frac{k_m}{k}$, $B = \frac{(a_m - a)}{k}$, $C = \frac{1}{\lambda \cdot k}$ – коэффициенты алгоритма управления.

Область устойчивости адаптивной системы управления определяется алгоритмом настройки регулятора (1), (2) и (3) для соответствующей структурной схемы (см. рис. 1, 2 и 3) и ограничениями, накладываемыми на управляющее или

корректирующее воздействие регулятора и ошибку управления – отклонение замедления машины от эталонного значения.

В случае адаптивной автоматической системы управляющее воздействие регулятора ξ зависит от ошибки управления $\dot{\varepsilon}$, величины рассогласования δ , параметров движения y, \dot{y} , конструктивных параметров автомобиля $k, k_m, \eta(x)$ и постоянного положительного коэффициента λ . Настройка регулятора адаптивной автоматизированной системы также зависит от перечисленных параметров кроме координаты оценки состояния \dot{y} , так как в основном контуре отсутствует главная обратная связь (рис. 2). Адаптивная автоматизированная система управления с каналом самонастройки в основном контуре кроме этого не зависит от коэффициента $\eta(x)$, характеризующего связь между регулятором и объектом управления.

Значение постоянного положительного коэффициента λ в алгоритме управления определяется из условия обеспечения максимально допустимой ошибки управления $[\dot{\varepsilon}]$. Если изменение замедления не превышает разностный порог различия замедления j_n [11], то водитель не различает этого изменения. Поэтому рационально в качестве максимально допустимой ошибки управления $[\dot{\varepsilon}]$ принять величину замедления не превышающую разностный порог различия замедления водителем.

В случае адаптивной автоматической системы, полагая, что предельное значение величины рассогласования δ равно задающему сигналу q , корректирующее воздействие регулятора ξ достигло максимума $\xi_{\max} = N$ и отклонение замедления $\dot{\varepsilon}$ от эталонного значения равно допустимой ошибке $[\dot{\varepsilon}]$ из алгоритма (1) после подстановки значений коэффициентов получим

$$\lambda = \frac{[\dot{\varepsilon}]}{N \cdot k \cdot \eta(x) - \frac{k_m}{k} \cdot \dot{y} - [k_m - k \cdot \eta(x)] \cdot q - (a_m - a) \cdot y}. \quad (4)$$

Соответственно для адаптивной автоматизированной системы с учетом (2) получим

$$\lambda = \frac{[\dot{\varepsilon}]}{\xi^{\max} \cdot k \cdot \eta(x) - [k_m - k \cdot \eta(x)] \cdot q - (a_m - a) \cdot y}, \quad (5)$$

где ξ^{\max} – максимальное воздействие, создаваемое исполнительным устройством цепи коррекции.

В адаптивной автоматизированной системе с каналом самонастройки в основном контуре формируется управляющий сигнал, на который накладывается ограничение $u(x) \leq u(x)^{\max}$. В этом случае постоянный положительный коэффициент λ определяется из алгоритма (3)

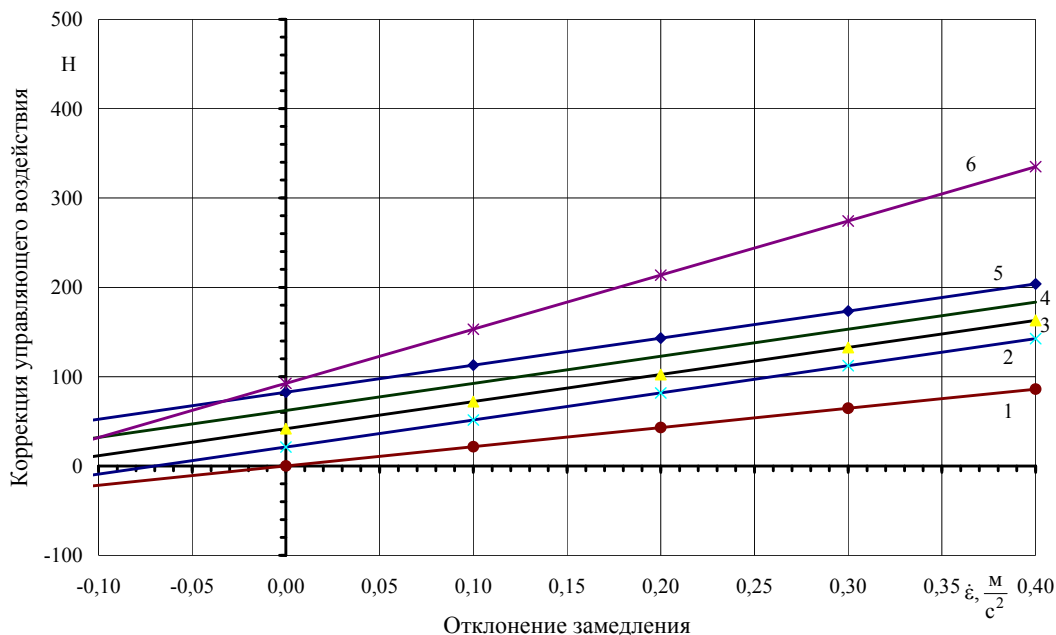
$$\lambda = \frac{[\dot{\varepsilon}]}{u(x)^{\max} \cdot k - (k_m - k) \cdot q - (a_m - a) \cdot y}. \quad (6)$$

В зависимости (1), (2), (3) входит скорость колесной машины y . При определении значения λ по указанным зависимостям следует использовать значение минимально устойчивой скорости y_{\min} , это обеспечивает минимальное значение λ и соответственно минимальное отклонение замедления машины от эталонного значения.

На рисунке 4 представлен пример изменения зоны устойчивости адаптивной системы при изменении конструктивных параметров автомобиля УАЗ-3151.

Зависимость 1 характеризует изменение корректирующего воздействия регулятора от ошибки управления для не груженого автомобиля. При отклонении замедления машины от эталонного на $0,4 \text{ м/с}^2$ адаптивный регулятор должен создавать корректирующее воздействие 86 Н . После выравнивания значений замедлений автомобиля и эталонной модели адаптивный регулятор переходит в статический режим $\xi = 0$.

Графики 2, 3, 4 и 5 (см. рис. 4) отражают зависимость корректирующего воздействия регулятора от ошибки управления. При этом торможение автомобиля с полной массой происходит при нажатии водителем на педаль с усилием соответственно 50, 100, 150 и 200 Н.



1 – граница устойчивости тормозного управления снаряженного автомобиля; 2, 3, 4, 5 – границы устойчивости тормозного управления груженого автомобиля при различных усилиях на педали, соответственно 50, 100, 150 и 200 Н; 6 – граница устойчивости тормозного управления при отказе одного тормозного контура.

Рисунок 4 – Область устойчивости адаптивной автоматической системы тормозного управления автомобиля УАЗ-3151

В этом случае даже при отсутствии ошибки управления адаптивный регулятор формирует корректирующее воздействие, так при усилии на педали 200 Н корректирующее воздействие равно $82,6 \text{ Н}$. При ошибке управления отличной от нуля корректирующее воздействие регулятора увеличивается, причем быстрее, чем для автомобиля в снаряженном состоянии.

При отказе заднего тормозного контура коэффициент эффективности тормозного управления K_s автомобиля снижается, что соответственно вызывает сужение зоны устойчивости в соответствии с графиком 6 на рисунке 4. При этом регулятор в установившемся режиме развивает корректирующее усилие $92,5 \text{ Н}$, а при отклонении замедления $0,4 \text{ м/с}^2$ должен развивать $334,9 \text{ Н}$.

Выводы. Установлено, что влияние конструктивных параметров автомобиля и параметров движения на область адаптивной системы управления торможением определяется структурой системы управления. В случае автоматической системы управления область устойчивости зависит от величины ошибки управления $\dot{\epsilon}$, конструктивных параметров автомобиля $k, k_m, \eta(x)$ и параметров движения y, \dot{y} . Следует отметить, что область устойчивости автоматизированной системы управления не зависит от замедления автомобиля, так как в основном контуре управления обратная связь осуществляется по ошибке управления $\dot{\epsilon}$, а не по замедлению. При этом, для случая формирования канала самонастройки в основном контуре управления, область устойчивости системы не зависит от коэффициента $\eta(x)$, вследствие отсутствия связи между водителем и исполнительным устройством канала самонастройки.

Установлено, что в случае адаптивной автоматизированной системы управления область устойчивости уменьшается при увеличении массы автомобиля, снижении эффективности тормозной системы и увеличении задающего воздействия.

Список литературы: 1. *Генбом Б.Б.* Исследование выходных характеристик и стабильности основных типов колодочных тормозных механизмов / *Б.Б. Генбом, А.И. Гутта* // Автомобильная промышленность. – 1979. – № 8. – С. 16 – 17. 2. *Нагиев А.М.* О влиянии нагрева тормозных колодок на параметры торможения автомобилей / *А.М. Нагиев* // Автомобильная промышленность. – 1977. – № 10. – С. 19 – 20. 3. *Филатов П.Г.* Исследование работы гидропривода к автомобильным тормозам при низких температурах / *П.Г. Филатов* // Автомобильная промышленность. – 1967. – № 5. – С. 18 – 19. 4. *Савельев Б.В.* Обоснование статической характеристики тормозной системы автомобиля: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.05.03 «Автомобили и тракторы» / *Б.В. Савельев*. – М., 1988. – 21 с. 5. *Савельев Б.В.* Влияние характеристик тормозной системы на управляемость замедлением автомобиля. Обзор / *Б.В. Савельев*. – Омск, 1981. – 30 с. – Деп. в НИИНавтопром 25.01.82, № Д688. 6. *Туренко А.Н.* Адаптивное тормозное управление колесных машин / *А. Н. Туренко, С.Н. Шуклинов* // Журнал автомобильных инженеров. – 2010. – № 5 (64). – С. 18 – 21. 7. *Туренко А.Н.* Замедление колесной машины как параметр оценки состояния системы адаптивного тормозного управления / *А. Н. Туренко, С.Н. Шуклинов, В.И. Вербицкий* // Сб. науч. тр. ХНАДУ „Автомобильный транспорт”. – Вып. 31. – Х., 2012. – С. 7 – 12. 8. *Туренко А.Н.* Оценка устойчивости системы адаптивного управления тормозами / *А.Н. Туренко, С.Н. Шуклинов, В.И. Вербицкий* // Сб. науч. тр. ХНАДУ „Автомобильный транспорт”. – Вып. 28. – Х., 2011. – С. 7 – 11. 9. *Туренко А.Н.* Электропневматический привод тормозов с адаптивным управлением / *А.Н. Туренко, С.Н. Шуклинов, Н.Г. Михалевич* // Изв. ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы», Вып. 4: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 12(85). – С. 51 – 53. 10. *Туренко А. Н.* Моделирование динамики колесной машины с адаптивным электропневматическим приводом тормозов / *Туренко А.Н., Шуклинов С.Н. Михалевич Н.Г.* // Вестник ХНАДУ. – 2012. – Вып. 56. – С. 66 – 74. 11. *Рокуэлл Т.Г.* Исследование предела выносливости человека к линейным ускорениям / *Т.Г. Рокуэлл, Д.Н. Снيدر, Д.К. Биркимер* / ЭИ ВИНТИИ Автомобилестроение, 1969, № 33 реф. 194. – С. 1 – 6.

Bibliography (transliterated): 1. *Genbu B.B.* Research output characteristics and stability of the main types of shoe brakes / *B.B. Genbu, A.I. Gutta* // Automotive industry. - 1979. - № 8. - Pp. 16 - 17. 2. *Naghiyev A.M.* On the effect of heat on the brake pad braking vehicles

parameters / *A.M. Naghiyev* // Automotive industry. - 1977. - № 10. - Pp. 19 - 20. **3.** *Filatov P.G.* The study of the hydraulic actuator to the automobile brake at low temperatures / *P.G. Filatov* // Automotive industry. - 1967. - № 5. - Pp. 18 - 19. **4.** *Savelyev B.V.* Justification of the static characteristics of a brake system of a vehicle: Author. dis. for the degree of PhD. tehn. Sciences: special. 05.05.03 "Automobiles and Tractors" / *B.V. Saveliev*. - M., 1988. - 21. **5.** *Savelyev BV* Influence of characteristics of the brake system on the handling of the car slowing down . Overview / *B.V. Saveliev*. - Omsk , 1981. - 30 . - Dep. in NIINavtoprom 25.01.82, № D688 . **6.** *AN Turenko* Adaptive brake control wheel cars / *A.N. Turenko, S.N. Shuklinov* // Journal of Automotive Engineers. - 2010. - № 5 (64). - Pp. 18 - 21. **7.** *A.N. Turenko*. Slowing wheeled vehicle as a parameter assessment of adaptive brake control / *A.N. Turenko, S.N. Shuklinov, V.I. Verbitsky* // Proc. scientific. tr. HNADU "Road Transport " . - Issue. 31. - H., 2012. - Pp. 7 - 12. **8.** *A.N. Turenko*. Estimation of stability adaptive brake control / *A.N. Turenko, S.N. Shuklinov, V.I. Verbitsky* // Proc. scientific . tr. HNADU "Road Transport " . - Issue. 28. - H., 2011. - Pp. 7 - 11. **9.** *A.N. Turenko*. Electronic Brake with adaptive control / *A.N. Turenko, S.N. Shuklinov, N.G. Mihalevitch* // Math. VSTU . Series "Land transport systems", Vol. 4: Hi. Sat scientific. Art. / VSTU. - Volgograd, 2011. - № 12 (85). - Pp. 51 - 53. **10.** *Turenko A.N.* Modeling the dynamics of wheeled vehicles with adaptive Electronic Brake / *Turenko A.N., Shuklinov S.N., Mihalevitch N.G.* // Herald HNADU. - 2012. - Issue. 56. - S. 66 - 74. **11.** *Rockwell T.G.* The study of human endurance limit to linear accelerations / *T.G. Rockwell, D.N. Snyder, D.K. Birkimer* / EI Automotive VINITI , 1969, № 33 ref. 194. - S. 1 - 6.

Надійшла (received) 04.02.2014