АВТОТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА

УДК 629.113

ЗАМЕДЛЕНИЕ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ КАК ПАРАМЕТР ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО ТОРМОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.Н. Туренко, профессор, д.т.н., С.Н. Шуклинов, доцент, к.т.н., В.И. Вербицкий, доцент, к.ф-м.н., ХНАДУ

Аннотация. *Изложена методика оценки устойчивости системы адаптивного управления с сигнальной настройкой на основе прямого метода Ляпунова, которая позволяет учесть нестационарность основной системы и нелинейность в виде ограничения на управляющее воздействие регулятора и ошибку управления.*

Ключевые слова: *система, тормозное управление, колесная машина, функция Ляпунова, устойчивость.*

УПОВІЛЬНЕННЯ КОЛІСНОЇ МАШИНИ ЯК ПАРАМЕТР ОЦІНКИ СТАНУ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО ГАЛЬМОВОГО КЕРУВАННЯ

А.М. Туренко, професор, д.т.н., С.М. Шуклінов, доцент, к.т.н., В.І. Вербицький, доцент, к.ф-м.н., ХНАДУ

Анотація. *Наведено методику оцінки стійкості системи адаптивного керування з настроюванням за сигналом на основі прямого методу Ляпунова, яка дозволяє врахувати нестаціонарність основної системи та нелінійність у вигляді обмеження на керуючу дію регулятора і помилку керування.*

Ключові слова: *система, гальмове керування, колісна машина, функція Ляпунова, стійкість.*

WHEELED VEHICLE DECELERATION AS ESTIMATION PARAMETER OF ADAPTIVE BRAKE CONTROL SYSTEM STATE

A. Turenko, Professor, Doctor of Technical Science, S. Shuklinov, Associate Professor, Candidate of Technical Science, V. Verbytsky, Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Science, KhNAHU

Abstract. *The method of stability estimation of adaptive control system with signal adjustment based on Lyapunov's direct method that allows to take into account the nonstationarity of the basic system and non-linearity in the form of limitation on control action restriction as well as error control is stated.*

Key words: *system, brake control, wheeled vehicle, Lyapunov's function, stability.*

Введение

Характеристики тормозного управления колесных машин изменяются вследствие действия ряда возмущающих факторов (изменения массы машины, коэффициентов эффективности тормозных механизмов и контуров тормозных приводов и т.д.). При этом водитель не всегда может адекватно оценить изменившиеся характеристики и сформировать соответствующее управляющее воздействие. Адаптивное тормозное управление позволяет переложить функции адаптации к изменяющимся характеристикам тормозного управления с человека (водителя) на тормозное управление колесной машины [1]. В этом случае тормозное управление выполняет функции регулятора в нестационарной системе управления объектом – колесной машиной, а водитель выполняет функции звена, определяющего параметры желаемого состояния колесной машины.

Анализ публикаций

Адаптивное управление тормозами колесных машин может реализовываться в режиме качения колеса при формировании тормозной силы, не превышающей его максимальную силу сцепления с опорной поверхностью, и в режиме качения колеса на грани юза. Вопросы адаптивного тормозного управления в режиме качения колеса на грани юза изучены достаточно глубоко [2, 3]. Режим управления торможением колесных машин при формировании на колесе тормозной силы, не превышающей его максимальную силу сцепления с опорной поверхностью, исследовался в основном в плане распределения тормозных сил [4]. Вопросы адаптации тормозного привода, направленные на стабилизацию эргономических параметров управления тормозами, рассматривались в работах [1, 4, 5]. Авторами [1] предложен закон формирования управляющего воздействия для адаптивного тормозного управления колесной машины. В работе [5] изложена методика оценки устойчивости системы адаптивного управления с сигнальной настройкой на основе прямого метода Ляпунова, которая позволяет учитывать нестационарность основной системы и нелинейность управляющего воздействия в виде ограничения. Авторами получена область устойчивости системы адаптивного управления в плоскости «корректирующее воздействие регулятора – отклонение скорости движения от эталонного значения». Однако в этом случае область устойчивого движения системы является открытой, поскольку ошибка управления не определяется, то есть не определяется допустимое отклонение скорости движения от эталонного значения.

Цель и постановка задачи

С целью определения закрытой области устойчивости адаптивного тормозного управления предлагается методика на основе прямого метода Ляпунова, в которой в качестве параметра оценки состояния системы используется замедление колесной машины. В данной методике учитывается нестационарность основной системы и нелинейность регулятора в виде ограничения на управляющее воздействие. Точность адаптивного управления определяется порогом различия замедления водителем [6].

Уравнения движения основной системы и эталонной модели

Уравнение, описывающее движение колесной машины при торможении, записывается в виде

$$\begin{aligned} & m_{\text{а}}\delta_{\text{вр}} j_{\text{т}}(t) - \kappa_{\text{в}} F_{\text{а}} \left[V_{\text{а}}(t)\right]^2 - m_{\text{а}} g \psi = \\ & = \left[p(x,t) - p_0\right] K_{\text{тк}}, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $m_{\text{а}}$ – масса колесной машины; $\delta_{\text{вр}}$ – коэффициент учета вращающихся масс колесной машины; $V_{\text{а}}(t)$ – скорость движения колесной машины; $j_{\text{т}}(t) = -\dfrac{dV_{\text{а}}(t)}{dt}$ – замедление (отрицательное ускорение) движения колесной машины; t – независимая переменная; $t \in [t_0, t_{\text{т}}]$ (t_0 – время начала процесса, $t_{\text{т}}$ – время торможения колесной машины); $\text{к}_{\text{в}}, F_{\text{а}}$ – коэффициент обтекаемости и лобовая площадь машины; g – ускорение свободного падения; ψ – коэффициент сопротивления дороги; $p(x,t)$ – управляющее воздействие тормозного привода, подведенное к тормозным колесам машины (x – задающее воздействие); p_0 – нечувствительность тормозных механизмов; $K_{\text{тк}} = \dfrac{j_{\text{т}}(t) - j_{w+\psi}(t)}{p(x,t) - p_0} m_{\text{а}}$ – коэффициент эффективности тормозных колес машины ($j_{w+\psi}(t)$ – замедление колесной машины, обусловленное силами сопротивления воздуха и дороги).

Для решения задачи уравнение (1) следует дополнить начальным условием в виде

$$V_{\text{а}}(t_0) = V_0,$$

где V_0 – скорость машины в начальный момент времени t_0.

Разрешая уравнение (1) относительно старшей производной и обозначив $\dfrac{g\psi}{\delta_{\text{вр}}} = \beta$, $\dfrac{K_{\text{тк}}}{m_{\text{а}}\delta_{\text{вр}}} = k$, $\left[p(x,t) - p_0\right] = u(x,t)$, получаем

$$-\frac{dV_а(t)}{dt}=\frac{к_в F_а}{m_а\delta_{вр}}\left[V_а(t)\right]^2+\beta+ku(x,t), \quad (2)$$

где k – коэффициент эффективности тормозного управления.

Уравнение, описывающее движение колесной машины при торможении, в котором в качестве параметра оценки характера этого движения принято замедление движения, может быть получено путем дифференцирования (2)

$$-\frac{d^2V_а(t)}{dt^2}= \\ =2\frac{к_в F_а}{m_а\delta_{вр}}V_а(t)\frac{dV_а(t)}{dt}+k\frac{d\left[u(x,t)\right]}{dt}. \quad (3)$$

Рассмотрим малый участок, на котором движение можно считать линейным. В этом случае уравнение (3) можно переписать в следующем виде

$$-\frac{d^2V_а(t)}{dt^2}=2\frac{к_в F_а V_а}{m_а\delta_{вр}}\cdot\frac{dV_а(t)}{dt}+k\frac{d\left[u(x)\right]}{dt}. \quad (4)$$

Тогда, обозначая в уравнении (4)

$$-\frac{d^2V_а(t)}{dt^2}=\ddot{y}\ ;\ 2\frac{к_в F_а V_а}{m_а\delta_{вр}}=a_1\ ;\ \frac{d\left[u(x)\right]}{dt}=\dot{u}(x),$$

получим

$$\ddot{y}=-a_1\dot{y}+k\dot{u}(x). \quad (5)$$

Управляющее воздействие тормозного привода $u(x)$ может быть представлено нелинейной функцией с насыщением, удовлетворяющей следующим условиям:

$u(x)=0$ при $x=0$;
$xu(x)>0$ при $x\neq 0$;
$u(x)=M$ при $x\geq c$; $M=\mathrm{const}$; $c=\mathrm{const}$,

где c – величина управляющего воздействия x, при которой наступает насыщение функции $u(x)$; M – значение функции $u(x)$, соответствующее режиму насыщения.

Значения переменных коэффициентов k и a_1 в уравнении (5) изменяются в пределах

$$k_{\min}\leq k\leq k_{\max};$$
$$a_{1\min}\leq a_1\leq a_{1\max},$$

где $k_{\max}=k_м=\frac{K_{тк}}{m_{ан}\delta_{вр}}$; $k_{\min}=\frac{K_{тк}}{m_{ап}\delta_{вр}}$; $a_{1\max}=a_{1м}=2\frac{k_в F_а V_а}{m_{ан}\delta_{вр}}$; $a_{1\min}=2\frac{k_в F_а V_а}{m_{ап}\delta_{вр}}$

($m_{ан}$, $m_{ап}$ – масса колесной машины, соответственно без нагрузки и с полной нагрузкой).

Уравнение движения эталонной модели представим в форме

$$\ddot{y}_м=-a_{1м}\dot{y}_м+k_м\dot{q}, \quad (6)$$

где $\dot{y}_м,\ddot{y}_м$ – соответственно замедление (параметр оценки состояния эталонной модели) и скорость изменения замедления эталонной модели; $k_м$ – коэффициент эффективности тормозного управления эталонной модели; $\dot{q}$ – функция скорости изменения управляющего воздействия в эталонной модели.

Устойчивость движения основной системы и эталонной модели

Вычитая из (6) уравнение (5), после преобразований получим уравнение ошибки

$$\ddot{\varepsilon}+a_{1м}\dot{\varepsilon}=k_м\dot{q}-k\dot{u}(x)-(a_{1м}-a_1)\dot{y}, \quad (7)$$

где $\ddot{\varepsilon}=\ddot{y}_м-\ddot{y}$ и $\dot{\varepsilon}=\dot{y}_м-\dot{y}$ – отклонение соответственно скорости изменения замедления и замедления колесной машины от эталонных значений при действии возмущений.

Представим уравнение (7) в форме

$$\ddot{\varepsilon}+a_м\dot{\varepsilon}=\dot{u}_0, \quad (8)$$

где $\dot{u}_0=k_м\dot{q}-k\dot{u}(x)-(a_{1м}-a_1)\dot{y}$.

Выберем функцию Ляпунова в виде квадратичной формы фазовой координаты $\dot{y}$ и управляющего воздействия u_0

$$V=\dot{\varepsilon}^2+\lambda u_0^2, \quad (9)$$

где λ – постоянный положительный коэффициент.

Полная производная функции Ляпунова имеет вид

$$\dot{V} = 2\dot{\varepsilon}\ddot{\varepsilon} + 2\lambda u_0 \dot{u}_0 . \quad (10)$$

Выразим из (8) вторую производную

$$\ddot{\varepsilon} = \dot{u}_0 - a_{1м}\dot{\varepsilon} , \quad (11)$$

и подставим ее в уравнение (10)

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2\dot{\varepsilon}\left(\dot{u}_0 - a_{1м}\dot{\varepsilon}\right) + 2\lambda u_0 \dot{u}_0 = \\ &= 2\dot{\varepsilon}\dot{u}_0 - 2a_{1м}\dot{\varepsilon}^2 + 2\lambda u_0 \dot{u}_0. \end{aligned} \quad (12)$$

Устойчивость движения основной системы относительно движения эталонной модели обеспечивается в случае, если производная функции Ляпунова неположительная. Это обеспечивается при условии

$$2\dot{\varepsilon}\dot{u}_0 + 2\lambda u_0 \dot{u}_0 \le 0 , \quad (13)$$

или

$$\dot{u}_0\left(\dot{\varepsilon} + \lambda u_0\right) \le 0 . \quad (14)$$

Из анализа (14) следует, что устойчивость движения основной системы относительно движения эталонной модели обеспечивается при соблюдении условий

$$\begin{aligned} &\text{если } \dot{u}_0 \ge 0, \text{ то } \Rightarrow \ \dot{\varepsilon} + \lambda u_0 \le 0; \\ &\text{если } \dot{u}_0 \le 0, \text{ то } \Rightarrow \ \dot{\varepsilon} + \lambda u_0 \ge 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Откуда очевидно, что

$$\begin{aligned} &\text{если } \dot{u}_0 \ge 0, \text{ то } \Rightarrow \ u_0 \ge -\frac{\dot{\varepsilon}}{\lambda}; \\ &\text{если } \dot{u}_0 \le 0, \text{ то } \Rightarrow u_0 \le -\frac{\dot{\varepsilon}}{\lambda}. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя в условия (16) значение u_0, в соответствии с (8), в результате получаем

$$\begin{aligned} &\text{если } \dot{u}_0 \ge 0, \\ &\text{то } \Rightarrow \ k_м q - ku\left(x\right) + \left(a_{1м} - a_1\right) y \ge -\frac{\dot{\varepsilon}}{\lambda}; \\ &\text{если } \dot{u}_0 \le 0, \\ &\text{то } \Rightarrow k_м q - ku\left(x\right) + \left(a_{1м} - a_1\right) y \le -\frac{\dot{\varepsilon}}{\lambda}. \end{aligned} \quad (17)$$

Разрешая соотношения (17) относительно $u(x)$, получим

$$\begin{aligned} &\text{если } \dot{u}_0 \ge 0, \\ &\text{то } \Rightarrow \ u\left(x\right) \le \frac{k_м}{k} q + \frac{\left(a_{1м} - a_1\right)}{k} y + \frac{\dot{\varepsilon}}{\lambda k}; \\ &\text{если } \dot{u}_0 \le 0, \\ &\text{то } \Rightarrow u\left(x\right) \ge \frac{k_м}{k} q + \frac{\left(a_{1м} - a_1\right)}{k} y + \frac{\dot{\varepsilon}}{\lambda k}. \end{aligned} \quad , (18)$$

Представим задающее воздействие в основной системе в виде

$$x = \delta + \xi \quad (19)$$

и, соответственно, управляющее воздействие в эталонной модели

$$q = \delta + \gamma , \quad (20)$$

где δ – разница задающего сигнала и сигнала обратной связи; ξ – корректирующее воздействие регулятора; $\gamma = y\frac{1}{k}$ – сигнал обратной связи.

На корректирующее воздействие регулятора ξ действует ограничение вида

$$0 \le \xi \le \xi^{\max} .$$

Соотношения (18), с учетом (19) и (20), приобретут вид

$$\begin{aligned} &\text{если } \dot{u}_0 \ge 0, \text{то} \\ &u\left(\delta + \xi\right) \le \frac{k_м}{k}\delta + \frac{k_м}{k}\gamma + \frac{\left(a_{1м} - a_1\right)}{k} y + \frac{\dot{\varepsilon}}{\lambda k}; \\ &\text{если } \dot{u}_0 \le 0, \text{ то} \\ &u\left(\delta + \xi\right) \ge \frac{k_м}{k}\delta + \frac{k_м}{k}\gamma + \frac{\left(a_{1м} - a_1\right)}{k} y + \frac{\dot{\varepsilon}}{\lambda k}. \end{aligned} \quad (21)$$

Нелинейную функцию $u(\delta + \xi)$ можно представить как произведение двух сомножителей

$$u\left(\delta + \xi\right) = \eta\left(x\right) \cdot \left(\delta + \xi\right), \quad (22)$$

где $\eta(x)$ – коэффициент передачи.

При указанных предположениях в случае ограниченных сигналов δ и ξ, выделяя из каждого неравенства в (21), с учетом (22), корректирующее воздействие регулятора ξ, получаем алгоритм настройки регулятора

$$\begin{aligned}&\text{если } \dot{u}_0 \geq 0,\\ &\text{то } \Rightarrow \xi \leq B_{01}y + B_1\dot{y} + C_0\delta + C_2\dot{\varepsilon};\\ &\text{если } \dot{u}_0 \leq 0,\\ &\text{то } \Rightarrow \xi \geq B_{01}y + B_1\dot{y} + C_0\delta + C_2\dot{\varepsilon},\end{aligned} \quad (23)$$

где $B_{01} = \dfrac{(a_{1\text{м}} - a_1)}{k\eta(x)}$; $B_1 = \dfrac{k_\text{м}}{k^2\eta(x)}$;

$C_0 = \dfrac{k_\text{м}}{k\eta(x)} - 1$; $C_2 = \dfrac{1}{\lambda k\eta(x)}$.

Полученный алгоритм настройки регулятора (23), с учетом значения $\dot{u}_0$, согласно (8), можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}&\text{если } \dot{u}(x) > \frac{k_\text{м}}{k}\dot{q} - \frac{(a_{1\text{м}} - a_1)}{k}\dot{y},\\ &\text{то } \Rightarrow \xi < B_{01}y + B_1\dot{y} + C_0\delta + C_2\dot{\varepsilon};\\ &\text{если } \dot{u}(x) = \frac{k_\text{м}}{k}\dot{q} - \frac{(a_{1\text{м}} - a_1)}{k}\dot{y},\\ &\text{то } \Rightarrow \xi = B_{01}y + B_1\dot{y} + C_0\delta + C_2\dot{\varepsilon};\\ &\text{если } \dot{u}(x) < \frac{k_\text{м}}{k}\dot{q} - \frac{(a_{1\text{м}} - a_1)}{k}\dot{y},\\ &\text{то } \Rightarrow \xi > B_{01}y + B_1\dot{y} + C_0\delta + C_2\dot{\varepsilon}.\end{aligned} \quad (24)$$

Соотношения (24) определяют область устойчивости системы. Области состояний системы, с учетом ограничений на управляющее воздействие и предельного значения ошибки управления $[\dot{\varepsilon}]$, приведены на рис. 1. Предельное значение ошибки управления $[\dot{\varepsilon}]$ не должно превышать порога различия замедления водителем [6].

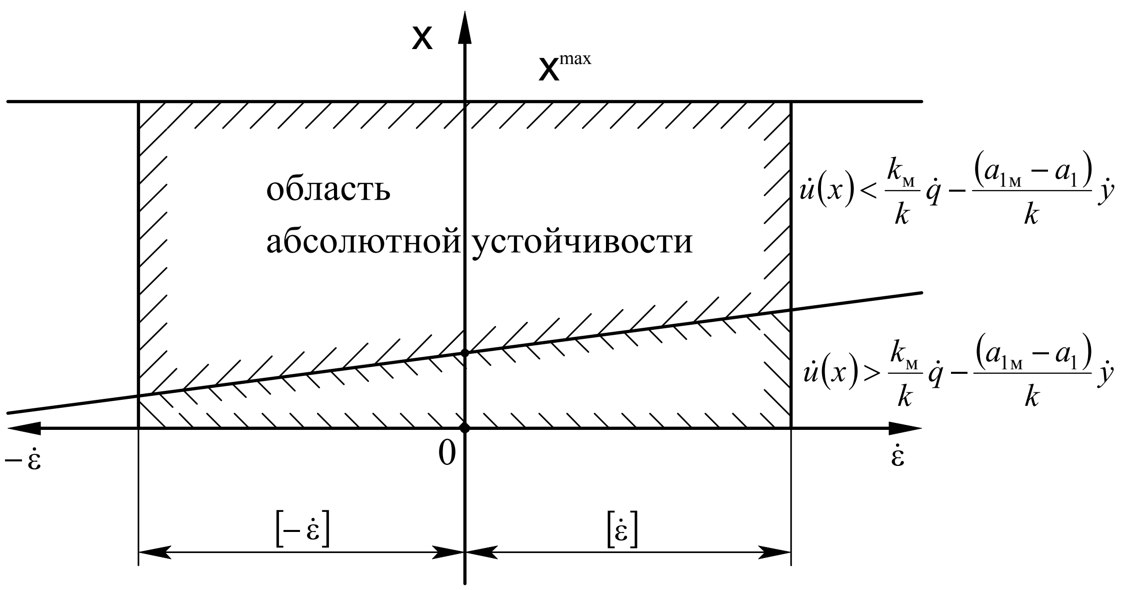

Рис. 1. Области состояния автоматической системы управления в параметрах $\dot{\varepsilon}$ и ξ

Выводы

На основе анализа полученного алгоритма управления системы можно сделать вывод, что область устойчивого состояния системы управления при нестационарности основной системы и нелинейности управляющего воздействия в виде его ограничения определяется величиной и знаком ошибки $\dot{\varepsilon}$, пределами ограничения управляющего воздействия регулятора ξ, параметрами движения $y, \dot{y}$ и конструкции a_1, k колесной машины. При этом область устойчивого состояния ограничена порогом различия замедления водителем, что определяет точность адаптивного управления.

Полученный алгоритм настройки регулятора предполагается использовать при разработке автоматической системы адаптивного тормозного управления колесной машины.

Литература

1. Туренко А.Н. Адаптивное тормозное управление колесных машин / А.Н. Ту-

ренко, С.Н. Шуклинов // Журнал автомобильных инженеров. – 2010. – №5 (64). – С. 18 – 21. ISSN 2073-9133.
2. Ревин А.А. Автомобильные автоматизированные тормозные системы: технические решения, теория, свойства : монография / А.А. Ревин. – Волгоград : Изд-во института качеств, 1995. – 160 с.
3. Ахметшин А.М. Адаптивная антиблокировочная тормозная система колесных машин : автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра техн. наук : спец. 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины» / А.М. Ахметшин. – М., 2003. – 36 с.
4. Богомолов В.А. Создание и исследование систем управления торможением автотранспортных средств: автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра техн. наук : спец. 05.22.02 «Автомобили и тракторы» / В.А. Богомолов. – Х., 2001. – 36 с.
5. Туренко А.Н. Оценка устойчивости системы адаптивного управления тормозами / А.Н. Туренко, С.Н. Шуклинов, В.И. Вербицкий // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – Вып. 28. – Х., 2011. – С. 7–11. – 100 экз. – ISSN 2219-8342.
6. Spurr R.T. Subjective assessments of brake performance / R.T. Spurr // Automobile Engineer. – 1965. – №9. – P. 393–395.

Рецензент: В.И. Клименко, профессор, к.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2012 г.