АВТОТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА

УДК 629.113

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО ТОРМОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕСНЫХ МАШИН

**А.Н. Туренко, профессор, д.т.н., С.Н. Шуклинов, доцент, к.т.н.,
В.И. Вербицкий, доцент, к.физ.-мат. н., ХНАДУ**

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

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

ОЦІНКА СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО ГАЛЬМОВОГО КЕРУВАННЯ КОЛІСНИХ МАШИН

**А.М. Туренко, професор, д.т.н., С.М. Шуклінов, доцент, к.т.н.,
В.І. Вербицький, доцент, к. фіз.-мат. н., ХНАДУ**

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

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

STABILITY EVALUATION OF WHEELED VEHICLES ADAPTABLE BRAKING CONTROL SYSTEM

**A. Turenko, Professor, Doctor of Technical Science, S. Shuklinov, Associate Professor,
Candidate of Technical Science, V. Verbytskiyi, Associate Professor,
Candidate of Physico-Mathematical Science, KhNAHU**

Abstract. *The method of stability evaluation of adaptable control system signal tuning stability on the basis of the second Lyapunov's approach that allows to take into account the nonstationarity of the basic system and nonlinearity in the form of restriction on control action is stated in the given article.*

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

Введение

Характеристики тормозного управления колесных машин изменяются вследствие действия ряда возмущающих факторов (изменение массы машины, коэффициентов эффективности тормозных механизмов и контуров тормозных приводов и т. д.). Влияние большинства возмущающих факторов водитель оценивает по замедлению только во время процесса торможения. В этом случае у водителя остается очень мало времени на оценку характера изменения и адаптацию к изменившимся характеристикам тормозного управления. Адаптивное тормозное управление позволяет переложить функции адаптации к изменяющимся условиям характеристик тормозного управления с человека (водителя) на тормозное управление колесной машины. Следует заметить, что в этом случае тормозное управление выполняет функции регулятора в нестационарной сис-

$$\Phi(x) = 0 \text{ при } x = 0;$$
$$x\Phi(x) > 0 \text{ при } x \neq 0;$$
$$\Phi(x) = M \text{ при } x \geq c;$$
$$M = \text{const}; \quad c = \text{const},$$

где c – значение воздействия x, при котором наступает насыщение функции $\Phi(x)$; M – значение функции $\Phi(x)$ при насыщении.

Значения переменных коэффициентов изменяются в пределах

$$k_{\min} \leq k \leq k_{\max};$$
$$a_{v\min} \leq a_v \leq a_{v\max},$$

где $k_{\max} = k_{\text{м}} = \dfrac{K_{\text{ТК}}}{m_{\text{сн}}\delta_{\text{вр}}}$; $k_{\min} = \dfrac{K_{\text{ТК}}}{m_{\text{н}}\delta_{\text{вр}}}$;
$a_{v\max} = a_{v\text{м}\max} = \dfrac{k_{\text{в}} F_{\text{a}} V_{\text{a}\max}}{m_{\text{сн}}\delta_{\text{вр}}}$; $a_{v\min} = \dfrac{k_{\text{в}} F_{\text{a}} V_{\text{a}w}}{m_{\text{н}}\delta_{\text{вр}}}$;
($m_{\text{сн}}$, $m_{\text{н}}$ – масса колесной машины, соответственно без нагрузки и с полной нагрузкой; $V_{a\max}, V_{aw}$ – скорость колесной машины, соответственно максимальная и минимальная).

Уравнение модели представим в форме

$$\dot{y}_{\text{м}} = a_{v\text{м}} y_{\text{м}} + \beta + k_{\text{м}} q, \tag{3}$$

где q – управляющее воздействие тормозного привода эталонной модели.

Вычитая из (3) уравнение (2), после преобразований получим уравнение ошибки

$$\dot{\varepsilon} + a_{\text{м}v}\varepsilon = (a_{v\text{м}} - a_v)y + k_{\text{м}} q - k\Phi(x), \tag{4}$$

где $\varepsilon = y - y_{\text{м}}$ и $\dot{\varepsilon} = \dot{y}_{\text{м}} - \dot{y}$ – отклонение соответственно скорости и замедления от эталонных значений при действии возмущений.

Представим уравнение (4) в форме

$$\dot{\varepsilon} + a_{v\text{м}}\varepsilon = u_0, \tag{5}$$

где $u_0 = k_{\text{м}} q - k\Phi(x) + (a_{v\text{м}} - a_v)y$.

Выберем функцию Ляпунова в виде квадратичной формы фазовой координаты

$$V = p\varepsilon^2, \tag{6}$$

где p – постоянный коэффициент.

Полная производная функции Ляпунова имеет вид

$$\dot{V} = 2p\varepsilon\dot{\varepsilon} = 2p\varepsilon(u_0 - a_{v\text{м}}\varepsilon), \tag{7}$$

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

$$2p\varepsilon(u_0 - a_{v\text{м}}\varepsilon_0) \leq 0; \tag{8}$$

или

$$\varepsilon(u_0 - a_{v\text{м}}\varepsilon) \leq 0. \tag{9}$$

Возможны два случая обеспечения условия (9)

$$\begin{array}{l} \text{если } \varepsilon < 0 \Rightarrow u_0 - a_{v\text{м}}\varepsilon \geq 0, \\ \text{если } \varepsilon > 0 \Rightarrow u_0 - a_{v\text{м}}\varepsilon \leq 0 \end{array}. \tag{10}$$

Запишем оба случая в другом виде

$$\begin{array}{l} \text{если } \varepsilon < 0 \Rightarrow u_0 \geq a_{v\text{м}}\varepsilon, \\ \text{если } \varepsilon > 0 \Rightarrow u_0 \leq a_{v\text{м}}\varepsilon \end{array}. \tag{11}$$

Раскрывая в (11) значение u_0, запишем

$$\begin{array}{l} \varepsilon < 0 \Rightarrow k_{\text{м}} q + (a_{v\text{м}} - a_v)y - k\Phi(x) \geq a_{v\text{м}}\varepsilon \\ \varepsilon > 0 \Rightarrow k_{\text{м}} q + (a_{v\text{м}} - a_v)y - k\Phi(x) \leq a_{v\text{м}}\varepsilon \end{array}. \tag{12}$$

Введем обозначения:

$$q = \delta + \gamma, \tag{13}$$

$$x = \delta + \xi, \tag{14}$$

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

На корректирующее воздействие регулятора ξ наложено ограничение вида

$$0 \leq \xi \leq \Phi(x) = M.$$

Соотношения (12) с учетом (13) и (14) приобретут вид

$$\begin{array}{l} \text{если } \varepsilon < 0, \text{ то} \\ k_{\text{м}}\delta + k_{\text{м}}\gamma + (a_{v\text{м}} - a_v)y - k\Phi(\delta + \xi) \geq a_{v\text{м}}\varepsilon \\ \text{если } \varepsilon > 0, \text{ то} \\ k_{\text{м}}\delta + k_{\text{м}}\gamma + (a_{v\text{м}} - a_v)y - k\Phi(\delta + \xi) \leq a_{v\text{м}}\varepsilon. \end{array} \tag{15}$$

Разрешим неравенства (15) относительно функции $\Phi\left(\delta+\xi\right)$

$$\begin{gathered}\text{åñëè } \varepsilon<0, \text{ òî}\\ \hat{O}\left(\delta+\xi\right) \le \frac{k_{ì}}{k}\delta+\frac{k_{ì}}{k}\gamma+\frac{(a_{vì}-a_v)}{k}y-\frac{a_{vì}}{k}\varepsilon;\\ \text{åñëè } \varepsilon>0, \text{ òî}\\ \hat{O}\left(\delta+\xi\right) \ge \frac{k_{ì}}{k}\delta+\frac{k_{ì}}{k}\gamma+\frac{(a_{vì}-a_v)}{k}y-\frac{a_{vì}}{k}\varepsilon.\end{gathered} \qquad (16)$$

Нелинейную функцию $\Phi\left(\delta+\xi\right)$ можно представить как произведение двух сомножителей

$$\Phi\left(\delta+\xi\right)=\eta\left(x\right)\cdot\left(\delta+\xi\right), \qquad (17)$$

где $\eta(x)$ – коэффициент передачи.

В этом случае при ограниченных сигналах δ и ξ условие (16), с учетом (17), можно записать в следующей форме:

$$\begin{gathered}\text{если } \varepsilon<0, \text{ то}\\ \xi \le \frac{(a_{v\text{м}}-a_v)}{k\eta\left(x\right)}y+\frac{k_{\text{м}}}{k\eta\left(x\right)}\gamma+\frac{k_{\text{м}}}{k\eta\left(x\right)}\delta-\delta-\\ -\frac{a_{v\text{м}}}{k\eta\left(x\right)}\varepsilon;\\ \text{если } \varepsilon>0, \text{ то}\\ \xi \ge \frac{(a_{v\text{м}}-a_v)}{k\eta\left(x\right)}y+\frac{k_{\text{м}}}{k\eta\left(x\right)}\gamma+\frac{k_{\text{м}}}{k\eta\left(x\right)}\delta-\delta-\\ -\frac{a_{v\text{м}}}{k\eta\left(x\right)}\varepsilon.\end{gathered} \qquad (18)$$

Выражения (18) позволяют найти алгоритм настройки регулятора

$$\begin{gathered}\varepsilon<0 \Rightarrow \xi \le B_0 y+B_1\dot{y}+C_0\delta-C_1\varepsilon\\ \varepsilon>0 \Rightarrow \xi \ge B_0 y+B_1\dot{y}+C_0\delta-C_1\varepsilon\end{gathered}, \qquad (19)$$

где $B_0=\dfrac{a_{v\text{м}}-a_v}{k\eta\left(x\right)}$; $B_1=\dfrac{k_{\text{м}}}{k^2\eta\left(x\right)}$;

$C_0=\dfrac{k_{\text{м}}}{k\eta\left(x\right)}-1$; $C_1=\dfrac{a_{v\text{м}}}{k\eta\left(x\right)}$.

Алгоритм настройки регулятора (19) можно записать с использованием функции знака

$$\begin{gathered}B_0 y+B_1\dot{y}+C_0\delta-C_1\varepsilon\cdot\operatorname{sign}\left(\varepsilon\right)\le\xi\\ \xi\le B_0 y+B_1\dot{y}+C_0\delta+C_1\varepsilon\cdot\operatorname{sign}\left(\varepsilon\right)\end{gathered}, \qquad (20)$$

где $\operatorname{sign}\left(\varepsilon\right)=\begin{cases}1 & \text{при } \varepsilon>0;\\ 0 & \text{при } \varepsilon=0;\\ -1 & \text{при } \varepsilon<0,\end{cases}$ – функция знака.

Соотношение (20) определяет область устойчивости системы. Графическое представление областей состояния системы, с учетом ограничений на управляющее воздействие и без наложения ограничений на ошибку ε, приведено на рис. 1.

Для обеспечения непрерывности решения (20) функцию знака $\operatorname{sign}\left(\varepsilon\right)$ следует заменить функцией насыщения:

$$sat\left(k_1\varepsilon\right)=\begin{cases}1 & \text{при } k_1\varepsilon>0;\\ k_1\varepsilon & \text{при } \left|k_1\varepsilon\right|\le 1;\\ -1 & \text{при } k_1\varepsilon<0,\end{cases} \qquad (21)$$

где k_1 – постоянный коэффициент, который желательно выбирать большим с целью приближения к релейному управлению.

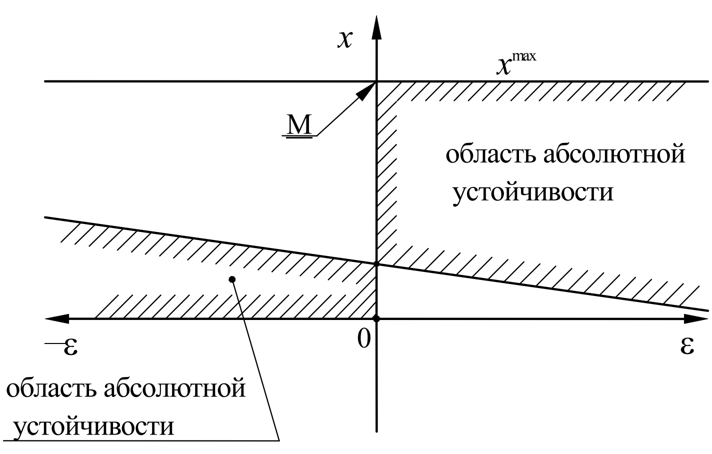

Рис. 1. Область абсолютной устойчивости автоматической системы управления системы в параметрах ε и ξ

В силу (21) выражение (20) преобразуется к виду

$$\begin{gathered}B_0 y + B_1 \dot{y} + C_0 \delta - C_1 \varepsilon \cdot sat(k_1 \varepsilon) \le \xi \\ \xi \le B_0 y + B_1 \dot{y} + C_0 \delta + C_1 \varepsilon \cdot sat(k_1 \varepsilon).\end{gathered} \qquad (22)$$

Вывод

На основе анализа полученного алгоритма управления системы установлено, что область устойчивого состояния системы управления при нестационарности основной системы и нелинейности управляющего воздействия в виде его ограничения определяется величиной и знаком ошибки ε, пределами ограничения управляющего воздействия регулятора ξ, параметрами движения $y, \dot{y}$ и конструкции a_v, k колесной машины.

Литература

1. Антонов В.Н. Адаптивные системы автоматического управления : учеб. пособие / В.Н. Антонов, А.М. Пришвин, В.А. Терехов, А.Э. Янчевский ; под ред. В.Б. Яковлева. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. – 204 с.
2. Громыко В.Д. Самонастраивающиеся системы с моделью / В.Д. Громыко, Е.А. Санковский. – М. : Энергия, 1974. – 80 с.
3. Ревин А.А. Автомобильные автоматизированные тормозные системы : технические решения, теория, свойства : монография / А.А. Ревин. – Волгоград : Изд-во института качеств, 1995. – 160 с.
4. Ахметшин А.М. Адаптивная антиблокировочная тормозная система колесных машин : автореф. дис. на соискание учен. степени докт. техн. наук : 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины» / А.М. Ахметшин. – М., 2003. – 36 с.
5. Богомолов В.А. Создание и исследование систем управления торможением автотранспортных средств: автореф. дис. на соискание учен. степени докт. техн. наук : 05.22.02 «Автомобили и тракторы» / В.А. Богомолов. – Харьков, 2001. – 36 с.
6. Туренко А.Н. Адаптивное тормозное управление колесных машин / А. Н. Туренко, С.Н. Шуклинов // Журнал автомобильных инженеров. – 2010. – №5 (64). – С. 18 – 21.

Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 11 мая 2011 г.