

УДК 681.5.01

**ЗАКОНЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ
С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ**

Елсуков Владимир Сергеевич

доктор технических наук, профессор

Лачин Вячеслав Иванович

доктор технических наук, профессор

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)

имени М.И. Платова, г. Новочеркасск

E-mail: elsvs@mail.ru

**CONTROL LAWS FOR NONLINEAR OBJECTS WITH FUNCTIONAL
UNCERTAINTIES**

Elsukov Vladimir

Doctor of technical sciences, professor

Lachin Vyacheslav

Doctor of technical sciences, professor

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk

Аннотация

Систематизированы законы управления в зависимости от класса нелинейного объекта управления с функциональными неопределенностями и неустойчивым состоянием равновесия.

Abstract

The control laws are systematized depending on the class of nonlinear control object with functional uncertainties and unstable equilibrium state.

Ключевые слова: объект управления, нелинейность, неопределенность, закон управления.

Key words: control object, nonlinearity, uncertainty, control law

В настоящей статье для разных классов нелинейных объектов управления с неустойчивым состоянием равновесия систематизированы ранее разработанные нами [1-8] законы управления. Рассматриваемые объекты управления описываются математической моделью вида:

$$\begin{matrix} \dot{z} \\ \dot{z} \\ \dot{z} \end{matrix} \quad (1)$$

где u – управляющее воздействие; x – вектор состояния, $x=[x_1, \dots, x_n]^T$; y – выходная величина; C – матрица выхода, $C=[c_1, c_2, \dots, c_l]$, причем $n>l \geq 1$, $c_1=0 \vee 1$; $b(t,x)$, $\varphi(t,x)$ – в общем случае непрерывные нестационарные дифференцируемые функции, которые подчинены следующим ограничениям:

$$b_0 \leq b(t,x) \leq b_1, \quad |db(t,x)/dt| \leq \gamma_1, \quad \dot{z} \quad (2)$$

Законы управления в зависимости от класса объекта (1) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Законы управления нелинейными объектами с функциональными неопределенностями

Класс ОУ	Матрица выхода, C	Функция $b(t,x)$	Закон управления
1	C левыми собственными значениями	$b(t,x)=b=const$	$u_1 = \frac{1}{b\tau_n} \left\{ g - \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i \hat{x}_{i+1} + u_{k1} \right\}$
2	C правыми и левыми собственными значениями		$u_{21} = \frac{1}{b\tau_n} \left\{ g - \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i \hat{x}_{i+1} + u_{k2} \right\}$
			$u_{22} = \frac{1}{b\tau_n} \left\{ g - \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i \hat{x}_{i+1} + u_{k3} \right\}$
			$u_{23} = \frac{1}{b\tau_n} \left\{ g - \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i \hat{x}_{i+1} + u_{k4} \right\}$
			$u_{24} = \frac{1}{b\tau_n} \left\{ g - \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i \hat{x}_{i+1} + u_{k5} \right\}$
3		$b(t,x)$ – нелинейная нестационарная функция	$u_6 = \frac{\hat{b}^{-1}(t)}{\tau_n} \left\{ g - \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i \hat{x}_{i+1} + u_{k5} \right\}$

В табл. 1 приняты следующие обозначения: g – сигнал задания соответствующей системы автоматического управления; \hat{x}_i ($i=\overline{1,n}$) – оценки

переменных состояния, которые могут быть получены в силу ограничений (2) с помощью достаточно быстродействующего наблюдателя преобразованного соответствующим образом объекта управления

$$\dot{\hat{x}} = A \hat{x} + K(y - C \hat{x}) + B(\dot{x}_{nT} + u_{ki}),$$

где
$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}; \quad \dot{x}_{nT} = \frac{1}{\tau_n} \left\{ g - \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i p^i \cdot x_1 \right\},$$
 причем $\tau_0=1$.

Заметим, что все законы u_1-u_6 соответствуют управлению по отклонению переменных состояния объекта, но каждый из них содержит свою дополнительную компоненту.

Закон u_1 содержит сигнал знакопеременной интегральной компенсирующей обратной связи по возмущению производной n -й переменной состояния

$$u_{k1} = \frac{1}{\sigma p} |u - \dot{\hat{x}}_n| \text{sign } \varepsilon + \varepsilon,$$

где
$$\varepsilon = \frac{1}{(\mu p + 1)^{n-l+1}} \dot{x}_{nT} - \dot{\hat{x}}_n; \quad \sigma \geq 2(n-l+1)\mu,$$
 причем в силу инерционности

объекта управления принято
$$\dot{\hat{x}}_n \approx \frac{c_l^{-1} p^{n-l+1}}{(\mu p + 1)^{n-l+1}} y.$$

Закон u_2 содержит сигнал прямой компенсирующей связи по возмущению n -й производной вектора выхода

$$u_{k2} = \frac{C(p)}{(\mu p + 1)^n B(p)} x_{1T}^{(n)} - \frac{p^n}{(\mu p + 1)^n B(p)} y,$$

где
$$B(p) = 1 + b_1 p + \dots + b_l p^l.$$

Закон u_3 содержит сигнал прямой компенсирующей связи по возмущению производной n -й переменной состояния

$$u_{k3} = \frac{1}{(1+\mu p)^n} \dot{x}_{nT} - \frac{1}{c_l} \left(\frac{p^{n-l+1}}{(1+\mu p)^n} y - \sum_{i=1}^{l-1} c_{l-i} \hat{x}_{n-i+1} \right).$$

Закон u_4 содержит сигнал прямой компенсирующей связи по возмущению вынужденного движения первой переменной состояния

$$x_{1B}(t) = \frac{1}{(\sigma p + 1) \tau_n p^n + \tau_{n-1} p^{n-1} + \dots + \tau_1 p + 1} * \frac{\tau_n p^n + \tau_{n-1} p^{n-1} + \dots + \tau_1 p + 1}{(1+\mu p)^n} g.$$

При этом

$$u_{k4} = \frac{1}{(1+\mu p)^n} g - \left(\frac{\tau_n p^{n-l+1}}{c_l (1+\mu p)^n} y + \sum_{i=1}^{l-1} \left(\tau_{n-i} - \frac{c_{l-i}}{c_l} \right) \hat{x}_{n-i+1} + \sum_{i=1}^{n-l} \tau_i \hat{x}_{i+1} + \hat{x}_1 \right).$$

Закон u_5 содержит сигнал прямой компенсирующей связи по возмущению вектора состояния замкнутой системы

$$u_{k5} = \frac{k}{\tau_n} \left(\Phi_{\mathcal{E}}(p) g - \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i \hat{x}_{i+1} \right),$$

где $\Phi_{\mathcal{E}}(p) = \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i p^i / \left(\tau_n (\sigma p + 1) p^n + \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i p^i \right)$; $k \geq 5 / \tau_n$.

Закон u_6 содержит сигнал прямой компенсирующей связи по возмущению вектора состояния и сигнал мультипликативной обратной связи, стабилизирующей коэффициент усиления прямой цепи системы,

$$\hat{b}^{-1}(t) = \frac{5}{\mu_1 p} \left| |\Phi_2(p) u| - \hat{b}^{-1}(t) |\Phi_1(p) y| \right|,$$

где $\Phi_1(p) = \frac{\mu_1 (1 - e^{-\mu_1 p}) p^n}{(1 + \mu_1 p)^n}$; $\Phi_2(p) = \frac{\mu_1 (1 - e^{-\mu_1 p}) \sum_{i=1}^l c_i p^{i-1}}{(1 + \mu_1 p)^n}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-08-00493.

Список литературы:

1. Елсуков В.С., Лачин В.И., Демидов О.Ю. Управление ограниченно неопределенными по состоянию и управлению нелинейными объектами // Инженерный вестник Дона. 2018, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5080/

2. Елсуков В.С., Лачин В.И., Липкин С.М. Синтез нелинейных систем с компенсирующей связью по вектору состояния в условиях ограниченной неопределенности // Изв. вузов. Электромеханика. 2018. Том 61, № 3. С. 37-42. DOI:10.17213/0136-3360-2018-3-37-42.

3. Елсуков В.С., Лачин В.И. Синтез нелинейных систем комбинированного управления с функциональной неопределенностью // Технические науки – от теории к практике: сб. публикаций научного журнала “Globus” по материалам XXVII Международной научно-практ. конф., г. СПб., 19 янв. 2018 г. / СПб.: “Globus”. 2018. Вып.1(21). С.17-22. <http://www.globus-science.ru>.

4. Elsukov V.S., Lachin V.I., Lipkin S.M. Controlling functionally undefined nonlinear objects with random relative order and unstable equilibrium state // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russian Federation; 16-19 May, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076172.

5. Елсуков В.С., Лачин В.И., Липкин С.М. Управление ограниченно неопределенными нелинейными объектами // Инженерный вестник Дона. 2017, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4392/

6. Елсуков В.С., Лачин В.И., Демидов О.Ю. Синтез систем управления по выходу неминимально-фазовых нелинейных объектов с неустойчивым состоянием равновесия // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. 2017, №1. С. 8-12.

7. Елсуков В.С., Лачин В.И. Синтез систем управления для нелинейных объектов с правыми собственными значениями матрицы выхода // Достижения и проблемы современной науки: сб. публикаций научного журнала “Globus” по материалам XIV Международной научно-практ. конф., г. СПб., 04 дек. 2016 г. / СПб.: “Globus”. 2016. Вып. 10(14), Т.3. С. 33-38. <http://www.globus-science.ru>

8. Елсуков В.С., Лачин В.И., Липкин С.М. Синтез систем управления для ограниченно неопределенных нелинейных объектов // Изв. вузов. Электромеханика. 2014, №1. С. 88-90.