

8. Белоглазов Д.А., Косенко Е.Ю. Анализ методов устойчивости нечетких систем управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 127-133.
9. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. - М.: Физматлит, 2003.
10. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы / Под. ред. В.М. Курейчика. – М.: Физматлит, 2006 – 320 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

**Белоглазов Денис Александрович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: d.beloglazov@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79281100343; кафедра систем автоматического управления; доцент.

**Евтушенко Валентин Юрьевич** – e-mail: val.evtushenko@gmail.com; тел.: +79281636187; кафедра систем автоматического управления; старший преподаватель.

**Beloglazov Denis Aleksandrovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: d.beloglazov@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79281100343; the department of automatic control systems; associate professor.

**Yevtushenko Valentin Yur’evich** – e-mail: val.evtushenko@gmail.com; phone: + 79281636187; the department of automatic control systems; senior lecturer.

УДК 620.9

**В.В. Соловьев, А.Я. Номерчук, М.Е. Денисенко**

### **УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ С АДАПТИВНЫМИ НЕЧЕТКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ\***

*Выполнен анализ методов оценки устойчивости для систем управления с нечеткими регуляторами. Рассмотрен метод для анализа устойчивости систем с нелинейностью, лежащей в секторе, ограниченном первым и третьим квадрантами системы координат. На примере показана неэффективность применения этого метода для адаптивного нечеткого регулятора из-за возможности дрейфа выходной характеристики адаптивного нечеткого регулятора за пределы первого и третьего квадрантов системы координат в процессе адаптации. Рассмотрена методика синтеза систем управления с адаптивным нечетким регулятором и стабилизирующим регулятором, не позволяющим выходному сигналу объекта выходить за пределы области допустимых значений. Приведена структурная схема системы, отражающая включение адаптивного и стабилизирующего регуляторов. Показана методика синтеза стабилизирующего регулятора для нелинейных объектов с параметрической неопределенностью и аддитивным управлением. Определен закон управления и функция срабатывания стабилизирующего регулятора с использованием функции Ляпунова. Показана последовательность этапов синтеза стабилизирующего регулятора. Приведен модельный эксперимент для неустойчивого объекта с параметрической неопределенностью.*

*Адаптивный нечеткий регулятор; устойчивость; стабилизирующий регулятор.*

---

\* Материалы статьи подготовлены в рамках выполнения работ по гранту Российского научного фонда № 14-19-01533

V.V. Soloviev, A.Ya. Nomerchuk, M.E. Denisenko

## STABILITY OF SYSTEMS WITH ADAPTIVE FUZZY CONTROLLERS

*In this paper is made the analysis of methods for assessing stability control systems with fuzzy controllers. The method analysis of stability systems is considered with the nonlinearity lying in sector, limited the first and third quadrants of coordinate system. On an example is shown the inefficiency of application this method for the adaptive fuzzy regulator because possibility drift the output characteristic the adaptive fuzzy regulator out of limits the first and third quadrants of coordinate system in the adaptation process. The technique of synthesis control systems is considered with the adaptive fuzzy regulator and the stabilizing regulator, not allowing an output of object to go beyond the tolerance range. The block diagram of system is provided reflecting the inclusion of adaptive and stabilizing controllers. The technique of synthesis the stabilizing regulator is shown for nonlinear objects with parametrical uncertainty and additive control. Control law and the function of stabilizing switching regulator is defined using Lyapunov function. The sequence of synthesis steps stabilizing controller is shown. Model experiment is given for unstable object with parametrical uncertainty.*

*Adaptive fuzzy control; stability; stabilizing controller.*

**Введение.** Обеспечение устойчивости одно из ключевых требований к системам автоматического управления. Эти требования наиболее жесткие к системам управления, связанным с безопасностью человека. Требование устойчивости в таких системах должно выполняться не зависимо от типа применяемого регулятора. В классической теории управления рассматривается устойчивость "в малом", "в большом" и "в целом". Система устойчива "в целом" если она возвращается в исходное состояние при любых начальных отклонениях. Система устойчива "в большом" если она возвращается в исходное состояние при начальных отклонениях принадлежащих определенной области. В случае устойчивости "в малом" известен факт наличия области устойчивости без определения ее границ. Широкое распространение получили методы оценки устойчивости: критерий Гурвица, критерий Найквиста, метод Ляпунова, метод Попова, метод гармонической линеаризации [1].

**Анализ методов оценки устойчивости.** В силу того, что нечеткий регулятор имеет нелинейную характеристику вход-выход критерии Гурвица и Найквиста не применимы. Характеристика адаптивного нечеткого регулятора в системе с неопределенностью не может быть определена с точностью до параметров, следовательно, необходимо применять методы, учитывающие данную особенность. В связи с этим для систем с нечеткими регуляторами получили распространение методы оценки и обеспечения устойчивости, базирующиеся на методе Ляпунова [2, 3] и методе Попова.

В [4] приведен метод оценки устойчивости, основанный на теореме: замкнутая система устойчивая, если произведение коэффициента передачи регулятора  $K_p$  и объекта управления  $K_{oy}$  соответствует условию  $K_p \cdot K_{oy} < 1$ .

Для использования этой теоремы необходимо определять коэффициенты передачи элементов системы и необходимо наличие априорно устойчивого объекта управления.

В работе [5] для априорно устойчивого объекта с моделью

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + bu(t), \\ y(t) &= cx(t)\end{aligned}$$

и нечеткого регулятора с характеристикой  $u(t) = f[y(t)]$  определены условия экспоненциальной устойчивости положения равновесия  $x=0$  замкнутой системы  $f(0)=0$  и  $uf(y) \geq 0, \forall y \in R$ . Требование априорно устойчивого объекта существенно ограничивает применение данного метода.

В работе [6] для обеспечения устойчивости применяется частотный круговой критерий, который можно сформулировать следующим образом. Пусть задана линейная модель объекта в переменных состояния или в виде передаточной функции  $G(s)$ . Характеристика нечеткого регулятора  $u(t)=\Phi(y)$ , является нелинейностью в секторе  $[\alpha, \beta]$ , причем  $\alpha y \leq \Phi(y) \leq \beta y$ . На комплексной плоскости определен круг  $D(\alpha, \beta)$ , с центром в точке  $-(\alpha+\beta)/(2\alpha\beta)$  и радиусом  $|\alpha-\beta|/(2|\alpha\beta|)$ . Круговой критерий гласит, что система абсолютно устойчивая, если выполняется одно из следующих условий:

- ◆ для  $0 < \alpha < \beta$ , годограф Найквиста  $G(j\omega)$  лежит вне круга  $D(\alpha, \beta)$  и охватывает его  $m$  раз против часовой стрелки, где  $m$  количество полюсов  $G(s)$  лежащих в правой полуплоскости комплексной плоскости;
- ◆ для  $0 = \alpha < \beta$ , полюсы  $G(s)$  лежат в левой полуплоскости комплексной плоскости и годограф Найквиста  $G(j\omega)$  лежит правее линии проведенной через точку  $s = -1/\beta$ ;
- ◆ для  $0 < \alpha < \beta$ , полюсы  $G(s)$  лежат в левой полуплоскости комплексной плоскости и годограф Найквиста  $G(j\omega)$  лежит в круге  $D(\alpha, \beta)$  и удаляется от его границ с ростом  $\omega$ .

Круговой критерий определяет достаточные условия устойчивости для систем с нелинейностями в секторе. Как видно, круговой критерий применим для систем с нечетким регулятором, характеристика которого лежит в секторе и объектом с линейной моделью или систем с нечетким регулятором и объектом с нелинейной моделью, в которых можно выделить линейную и приведенную нелинейную часть, причем нелинейная часть также должна лежать в секторе.

Таким образом, может быть выполнена оценка абсолютной устойчивости замкнутой системы с нелинейностью в секторе. Недостатком метода является возможность оценки устойчивости систем с априорной устойчивой линейной частью. Для системы управления с адаптивным нечетким регулятором применение частотных методов оценки устойчивости затруднительно в силу того, что невозможно обеспечить принадлежность характеристики регулятора сектору, лежащему в первом и третьем квадранте системы координат. Покажем это на примере.

Рассмотрим два шага ( $j-1$  и  $j$ ) расчета управляющего воздействия адаптивного нечеткого регулятора из работы [7]

$$u_{j-1} = \frac{\sum_{i=1}^s r_i \cdot \mu(r_i)}{\sum_{i=1}^s \mu(r_i)}, \quad u_j = \frac{\sum_{i=1}^s r_{2i} \cdot \mu(r_{2i})}{\sum_{i=1}^s \mu(r_{2i})} = \frac{\sum_{i=1}^s (r_i + \psi p_j) \cdot \mu(r_i + \psi p_j)}{\sum_{i=1}^s \mu(r_i + \psi p_j)}. \quad (1)$$

Положим, что текущее состояние системы таково, что  $\mu(r_i) = \mu(r_i + \psi p_j)$ , тогда (1) переписывается в виде

$$u_j = \frac{\sum_{i=1}^s (r_i + \psi p_j) \cdot \mu(r_i)}{\sum_{i=1}^s \mu(r_i)} = \frac{\sum_{i=1}^s r_i \cdot \mu(r_i)}{\sum_{i=1}^s \mu(r_i)} + \frac{\psi p_j \cdot \sum_{i=1}^s \mu(r_i)}{\sum_{i=1}^s \mu(r_i)} = u_{j-1} + \psi p_j. \quad (2)$$

Тогда в соответствии с (2) выполняется линейный сдвиг, а не поворот функции  $u(e, \sigma)$ , что допускает ее попадание за пределы первого и третьего квадранта системы координат, в случае даже если поверхность блока адаптации удовлетворяет условию принадлежности сектору.

**Обеспечение устойчивости со стабилизирующим регулятором.** В соответствии с вышесказанным интерес представляет подход предложенный в [8]. В этой работе устойчивость системы обеспечивается путем работы двух регуляторов: не-

четкого регулятора в прямом контуре управления и супервизорного регулятора, включающегося в работу при достижении границ области  $D_x$ . Далее супервизорный регулятор будем называть стабилизирующим (рис. 1).

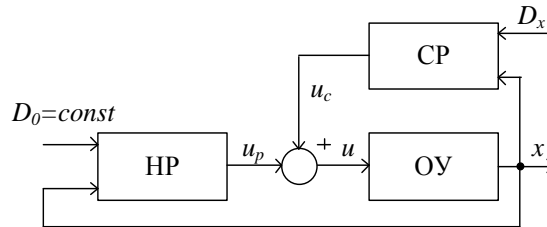


Рис. 1. Структурная схема нечеткой системы управления со стабилизирующим регулятором

В схеме стабилизирующий регулятор СР по результатам измерения или оценки состояния объекта  $x$ , определяет удаленность выходного сигнала от границ области  $D_x$ . При достижении границы области  $D_x$ , формируется сигнал  $\mu_1$ , из-за которого замыкается ключ К2. Регулятором формируется стабилизирующее управляющее воздействие  $u_c$ , для того чтобы вернуть состояние объекта в пределы допустимой области  $D_0$ . Если состояние объекта остается неудовлетворительным, то формируется сигнал  $\mu_2$  из-за которого размыкается ключ К1.

Принцип работы системы можно определить последовательностью:

- ◆ если объект удовлетворительно управляется НР в пределах допустимой области  $D_0$ , то СР работает в режиме ожидания без выдачи стабилизирующих воздействий;
- ◆ если состояние объекта выходит за границы области  $D_x$ , то СР формирует стабилизирующее воздействие, для возврата состояния ОУ в пределы области  $D_0$ .

Стабилизирующий регулятор обеспечивает устойчивость для ОУ с математическими моделями вида

$$x^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + bu, \tag{3}$$

где  $x, u$  – выход и вход объекта соответственно;  $f$  – нелинейная функция;  $b$  - константа.

Полагается, что вектор состояния  $x = [x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(n-1)}]$  можно измерить или оценить. Задана область  $D_0$ , в пределах которой состояние объекта считается безопасным и устойчивым. Входной сигнал ОУ определяется выражением

$$u = u_p + E \cdot u_c, \tag{4}$$

где  $E$  – функция инициализации стабилизирующего воздействия;  $u_p$  – управляющее воздействие НР.

Функция  $E$  определяется выражением

$$E = \begin{cases} 1, & |x| \geq D_x, \\ 0, & |x| < D_x. \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

Сигнал стабилизирующего регулятора формируется в виде

$$u_c = -\text{sgn}(x^T P b_c) \left[ \frac{1}{b_c} (f^u + |k^T x| + |u_p|) \right], \tag{6}$$

где

$$b_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ g \end{bmatrix}, g > 0. \quad (7)$$

В (6)  $P$  представляет собой симметричную положительно определенную матрицу, удовлетворяющую уравнению Ляпунова:

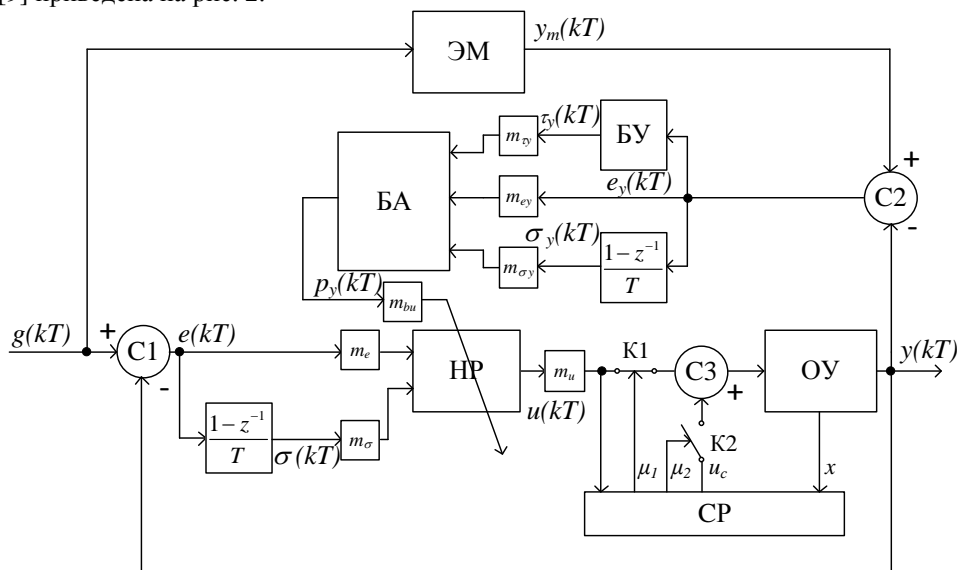
$$\Lambda_c^T P + P \Lambda_c = -Q, \quad (8)$$

где  $Q > 0$  задается на этапе проектирования системы. Матрица  $\Lambda_c$  имеет вид

$$\Lambda_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & -k_{n-2} & -k_{n-3} & \dots & -k_1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где вектор  $\mathbf{k} = (k_n, \dots, k_1)^T \in \mathbb{R}^n$  содержит такие коэффициенты  $k_i$ , что все корни  $s_i$  полинома  $s^n + k_1 s^{n-1} + \dots + k_n$  принадлежат левой полуплоскости комплексной плоскости переменной  $s$ .

Модифицированная схема системы с АНР и стабилизирующим регулятором [9] приведена на рис. 2.



СР – стабилизирующий регулятор; К1, К2 – ключи; С3 – сумматор

Рис. 2. Схема системы управления со стабилизирующим регулятором

Необходимо для объекта с математической моделью вида

$$x^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, \tilde{a}) + \tilde{b}u, \quad (10)$$

синтезировать стабилизирующий регулятор. Здесь компоненты  $\tilde{a}$ ,  $\tilde{b}$  изменяются в некоторых интервалах [10].

Рассмотрим закон управления идеального регулятора

$$u' = \left[ \frac{1}{\tilde{b}} \left( -f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, \tilde{a}) + y_m^{(n)} + k^T e \right) \right]. \quad (11)$$

Подставим (11) в (10) получим

$$e^{(n)} + k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n e = 0. \quad (12)$$

Аппроксимируем идеальный регулятор (11) с применением нечеткого регулятора.

Подставим (4) в (10) получим

$$x^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, \tilde{a}) + \tilde{b}(u_p + E \cdot u_c). \quad (13)$$

Добавим и вычтем  $\tilde{b}u'$  в (13)

$$x^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, \tilde{a}) + \tilde{b}(u_p + E \cdot u_c + u' - u').$$

Отсюда

$$x^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, \tilde{a}) + \tilde{b} \left( u_p + E \cdot u_c + \frac{1}{\tilde{b}} \left( -f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, \tilde{a}) + y_m^{(n)} + k^T e \right) - u' \right)$$

или

$$e^{(n)} = -k^T e + \tilde{b}(u' - u_p - E \cdot u_c). \quad (14)$$

Выражение (14) можно переписать в виде

$$\underline{\dot{e}} = \Lambda_c \underline{e} + \underline{\tilde{b}}(u' - u_p - E \cdot u_c). \quad (15)$$

Определим функцию Ляпунова вида

$$V = \frac{1}{2} \underline{e}^T P \underline{e}, \quad (16)$$

где  $P$  удовлетворяет уравнению (8).

Тогда используя (14) и (16) запишем производную функции Ляпунова

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{1}{2} \underline{e}^T Q \underline{e} + \underline{e}^T P \underline{\tilde{b}}(u' - u_p - E \cdot u_c) \\ &\leq -\frac{1}{2} \underline{e}^T Q \underline{e} + \left| \underline{e}^T P \underline{\tilde{b}} \right| (|u'| + |u_p|) - E \cdot \underline{e}^T P \underline{\tilde{b}} u_c. \end{aligned} \quad (17)$$

Следовательно, необходимо синтезировать управление  $u_c$  таким образом, чтобы выполнялось условие  $\dot{V} < 0$ .

Рассмотрим функцию  $f_{\max}$  и константу  $b_{\min}$ , такую что  $|f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, \tilde{a})| \leq f_{\max}$ ,  $0 < b_{\min} \leq \tilde{b}$ . Тогда можно выбрать стабилизирующее управление в виде

$$u_c = \text{sgn}(\underline{e}^T P \underline{b}_c) \left[ |u_p| + \frac{1}{b_{\min}} \left( f_{\max} + |k^T \underline{e}| + |y_m^{(n)}| \right) \right]. \quad (18)$$

В качестве функции срабатывания выберем

$$E(d_x) = \frac{1}{1 + e^{-2\alpha d_x}}, \quad (19)$$

где  $\alpha$  – определяет интенсивность нарастания  $E(d_x)$ .

Тем самым обеспечивается плавное включение стабилизирующего управляющего воздействия и предупреждается возникновение колебаний на границе  $D_x$ .

Подставим (11) и (18) в (17)

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\frac{1}{2} e^T Q e + |e^T P \tilde{b}| \left( \left[ \frac{1}{\tilde{b}} \left( |f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, \tilde{a})| + |y_m^{(n)}| + |k^T e| \right) \right] + \right. \\ & \left. + |u_p| - |u_p| - \frac{1}{b_{\min}} \left( f_{\max} + |k^T e| + |y_m^{(n)}| \right) \right) \leq -\frac{1}{2} e^T Q e \leq 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Таким образом, в соответствии с (18) и (20) стабилизирующее управление не равно нулю, в случае если значение функции Ляпунова  $V_e$  больше некоторой константы  $V'$ .

Процедуру синтеза стабилизирующего регулятора можно представить в виде последовательности этапов.

Этап 1. Сформировать вектор  $k$  коэффициентов желаемого характеристического полинома по эталонной модели.

Этап 2. Задать положительно определенную матрицу  $Q_{n \times n}$ .

Этап 3. Решить уравнение Ляпунова (8) и найти матрицу  $P$ .

Этап 4. Задать границы допустимой области  $D_x$ .

Этап 5. По модели ОУ определить  $b_{\min}$  и  $f_{\max}$ .

Этап 6. Задать функцию переключения  $E(d_x)$ .

Этап 7. Сформировать стабилизирующее управляющее воздействие  $u_s$ .

Для исследования системы управления была выбрана модель неустойчивого объекта в переменных состояния

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, \\ y &= [4 \quad 0] x, \end{aligned}$$

и модель эталонной динамики в виде

$$W_{em}(s) = \frac{1}{(0,22s + 1)(0,175s + 1)}.$$

Коэффициенту  $a_{21}$  присваивались дискретные значения -2,5 и -3,6 в случайные моменты времени, а значение коэффициента  $a_{22}$  изменялось в интервале  $[0,1; 2]$ . Значения остальных параметров задавались следующими:  $m_e=1$ ,  $m_\sigma=0,4$ ,  $m_u=7$ ,  $m_{ey}=0,6$ ,  $m_{\sigma y}=0,9$ ,  $m_{\sigma y}=0,1$ ,  $m_{bu}=1$ . Границы допустимой области определялись выражением  $D_x=0,1y_m$ .

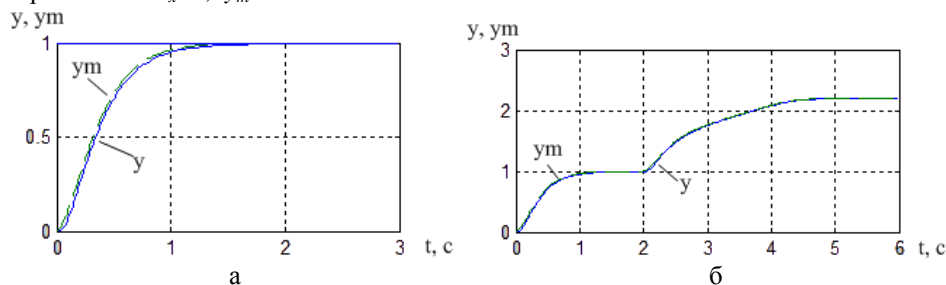


Рис. 3. Переходные процессы в замкнутой системе

Моделирование выполнялось для единичного ступенчатого воздействия (рис. 3,а) и для случая перевода объекта из одного режима в другой (рис. 3,б). Во всех случаях рассогласование сигналов эталонной модели и объекта в переходном режиме не превышало 10 %, в установившемся режиме – 3 %. Стабилизирующий регулятор не допускает опасных отклонений выходной величины неустойчивого ОУ с параметрической неопределенностью за границы области  $D_x$ .

**Выводы.** Следовательно, метод обеспечения устойчивости с адаптивным нечетким регулятором и стабилизирующим регулятором можно использовать для стабилизации объектов с параметрической неопределенностью. При этом обеспечивается высокое качество управления, без нарушения границ области допустимых состояний объекта. В дальнейшем авторами планируется расширение применения метода на более широкий класс объектов, содержащих структурные неопределенности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
2. *Min Wua, Yong Hea, Guo-Ping Liub, Jin-Hua She.* On Absolute Stability of Lur'e Control Systems with Multiple Nonlinearities // *European Journal of Control.* – 2005. – Vol. 11, № 1. – P. 19-28.
3. *Chyun-Chau Fuh, Pi-Cheng Tung.* Robust stability bounds for Lur'e systems with parametric uncertainty // *Journal of Marine Science and Technology.* – 1999. – Vol. 7, № 2. – P. 73-78.
4. *Piegai. Andrzej:* Fuzzy modeling and control. – Heidelberg; New York: Physica-VcrI. 2001.
5. *Li-Xin Wang.* Stable Fuzzy Control of Linear Systems // *IEEE Transactions on fuzzy systems.* – 1998. – Vol. 6, № 1. – P. 137-143.
6. *Lu Hongqian, Huang Xianlin, Gao X.Z., Ban Xiaojun, Yin Hang.* Stability analysis of the simplest Takagi-Sugeno fuzzy control system using circle criterion // *Journal of Systems Engineering and Electronics.* – 2007. – Vol. 18, № 2. – P. 311-319.
7. *Соловьев В.В., Финаев В.И.* Методика синтеза адаптивного нечеткого регулятора для объекта с неопределенной моделью // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2012. – № 1 (126). – С. 78-83.
8. *Wong C.-C., Chen J.-Y.* Fuzzy control of nonlinear systems using rule adjustment // *IEEE Proc.-Control Theory Appl.* – 1999. – Vol. 146, № 6. – P. 578-584.
9. *Соловьев В.В.* Синтез адаптивного нечеткого регулятора для объектов с априорной неопределенностью // *Труды 3-го международного семинара «Системный анализ, управление и обработка информации» / Под общ. ред. Р.А. Нейдорфа.* – Ростов –на-Дону: Изд. Центр Донск. Гос. Техн. ун-та, 2012. – С. 224-239.
10. *Соловьев В.В.* Методология моделирования систем с априорной неопределенностью // *Сборник трудов Всероссийской научной конференции молодых ученых студентов, аспирантов и студентов «Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и автоматика – ПАРУСА-2012».* – Геленджик: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 83-87.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

**Соловьев Виктор Владимирович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; старший преподаватель.

**Номерчук Александр Яковлевич** – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; тел.: +79054306539; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

**Денисенко Максим Евгеньевич** – e-mail: denisenko.maxim@gmail.com; тел.: +79612681265; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

**Soloviev Victor Vladimirovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; senior lecturer.



**Nomerchuk Alexandr Yakovlevich** – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; phone: +79054306539; the department of automatic control systems; assistant.

**Denisenko Maxim Evgenievich** – e-mail: denisenko.maxim@gmail.com; phone: +79612681265; the department of automatic control systems; assistant.

УДК 681.12

**А.Р. Гайдук, К.В. Бесклубова, А.С. Мельниченко**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ СТРУКТУРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ\***

*Проводится исследование влияния структурных возмущений, обусловленных неучитываемыми малыми постоянными времени, на устойчивость и другие свойства замкнутых систем управления. При этом полагается, что структурные возмущения возникают в объекте управления и приводят к повышению порядка характеристического полинома модели объекта. В рамках исследования рассматривается поведение корней характеристических полиномов систем различных порядков и с различным распределением желаемых полюсов на комплексной плоскости в зависимости от значения малых постоянных времени. Рассматриваются распределения следующих типов: кратные корни, минимальное время регулирования, не кратные корни. С целью исследования зависимости влияния структурных возмущений от желаемой степени устойчивости, рассматриваются системы с различным быстродействием. Приводятся примеры динамических систем с устройством управления, синтезированным по заданным показателям качества с применением принципа управления по выходу и воздействию. Полученные результаты представлены графиками изменения полюсов структурно возмущенной замкнутой системы.*

*Система управления; двумерное устройство управления; структурные возмущения; грубость системы.*

**A.R. Gaiduk, K.V. Besklubova, A.S. Melnichenko**

### **RESEARCH OF DINAMICAL SYSTEMS STABILITY AT STRUCTURAL DISTURBANCES**

*In this paper we study the effect of structural perturbations caused by not accounted small time constants and its influence on the stability and other properties of closed control systems. It is considered that structural perturbations appeared in plant itself and cause order of plant's characteristic polynomial to increase. In the context of the paper there is considered behavior of the roots of the systems' characteristic polynomials of various orders and with different distributions of the desired poles in the complex plane depending on the value of small time constants. The distributions of the following types are treated: multiple roots, minimal regulation, and non-multiple roots. To research how structural perturbations influence depends on desired stability degree there are investigated systems with different settling time. Here are shown examples of dynamical systems with controller synthesized from specified quality indicators using the principle of output control and influence. The results are presented by graphs of structurally perturbed closed-loop system's pole variation.*

*Control system; two-dimensional control device; structural perturbations; systems robust.*

**Введение.** В практике автоматического управления часто возникает задача обеспечения желаемого распределения корней характеристического полинома (полюсов) замкнутой системы посредством модального управления или устройства управления, синтезируемого по требуемым показателям качества. В обоих слу-

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-00249).