УДК 681.513

В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев

СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ*

Рассматривается метод синтеза робастных управлений подводными аппаратами на основе их многосвязных моделей, учитывающих нелинейности по управляющим воздействиям. Синтез производится на основе метода функций Ляпунова при ограничениях на управляющие воздействия. Предлагается процедура синтеза для систем специального вида, состоящих из одного блока. Найдено преобразование, приводящее математическую модель подводного аппарата к виду, состоящему из одного блока. Приводятся достаточные условия решения задачи синтеза.

Подводные аппараты; нелинейные многосвязные системы; робастность.

V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev

SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEMS FOR UNDERWATER VEHICLES WITH NONLINEAR ACTUATORS

This paper presents novel methods of the synthesis of a robust control systems for underwater vehicles with nonlinear actuators. The synthesis procedure is based on the method of Lyapunov. Bounds of controls are considered. A new procedure for a special form of mathematical models is developed. A transformation of the underwater vehicle model to the special form is proposed. Sufficient condition of the design problem solvability is calculated.

Underwater vehicle; nonlinear multi-connected systems; robustness.

Введение. Релейные регуляторы способны обеспечить функционирование системы управления в условиях существенной неопределенности математической модели объекта. Как известно, теория систем с переменной структурой (СПС) разработана под руководством Е.В. Емельянова [1–3]. Теория разрывных систем также исследовалась в [4–7].

Основные направления использования скользящих режимов связаны с синтезом управлений в условиях неопределенности. В работе [8] для механических систем, представленных в форме Лагранжа, решена задача синтеза релейного регулятора, с учетом ограничений на управления и получены условия асимптотической устойчивости замкнутой системы. Кроме того, в работе [9] для указанного класса систем получены условия управляемости.

В работе [10] разрабатывается блочный метод синтеза нелинейных систем с использованием скользящих режимов. Процедура синтеза основана на блочном методе [11–13], базирующемся на блочно-управляемой нелинейной форме вида

$$\begin{aligned}
\frac{d\mathbf{x}_1(t)}{dt} &= \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1,...,\mathbf{x}_r,t)+\mathbf{B}_1(\mathbf{x}_1,...,\mathbf{x}_r,t)\mathbf{u},\\
\frac{d\mathbf{x}_i(t)}{dt} &= \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i,...,\mathbf{x}_r,t)+\mathbf{B}_i(\mathbf{x}_i,...,\mathbf{x}_r,t)\mathbf{x}_{i-1},\ i=\overline{r-1,2},\\
\frac{d\mathbf{x}_r(t)}{dt} &= \mathbf{f}_r(\mathbf{x}_r,t)+\mathbf{B}_r(\mathbf{x}_r,t)\mathbf{x}_{r-1},
\end{aligned} \qquad (1)$$

* Работа поддержана грантами РФФИ № 10-08-00200-а, № 10-08-00219-а.

где $\mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i,...,\mathbf{x}_r,t),\mathbf{B}_i(\mathbf{x}_i,...,\mathbf{x}_r,t)\mathbf{x}_{i-1}$ – непрерывно дифференцируемые $i-1$ раз по всем своим аргументам функции.

Дополнительно принято условие

$$\dim\mathbf{x}_i = \dim\mathbf{B}_i(\mathbf{x}_i,...,\mathbf{x}_r,t). \tag{2}$$

При выполнении условия (2) и гладкости функций $\mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i,...,\mathbf{x}_r,t),\mathbf{B}_i(\mathbf{x}_i,...,\mathbf{x}_r,t)\mathbf{x}_{i-1}$ в [10] доказано существование преобразования в блочно-управляемую форму и существование разрывного управления, обеспечивающего скользящий режим, описываемый линейным уравнением с желаемым спектром. Для преобразования использован метод интегрального преобразования динамических систем к регулярной форме. Предложена итерационная процедура синтеза поверхности и желаемого уравнения скольжения.

Блочный подход к синтезу разрывных управлений также использован в [14]. В данной работе функции, описывающие объект управления, в качестве которого выступает электромеханическая система (манипулятор), могут быть негладкими. При этом рассматривается класс задач слежения за заданными траекториями. Также представлено соответствующее информационное обеспечение, позволяющее синтезировать и исследовать полученные робастные законы управления.

Еще одним путем синтеза релейных систем управления является синтез регуляторов на основе принципа максимума [15, 16], на основе которого получено широко известное программное кусочно-постоянное управление, оптимальное по быстродействию. В настоящее время методология принципа максимума нашла широкое применение для решения различных задач управления [17–19].

В работе [20] предложен еще один способ формирования близкого к релейному управления, который получен на основе методов структурного синтеза [21], путем устремления постоянных времени эталонных уравнений к нулю. Данный подход отличается свое простотой и удобством физической реализации.

В данной работе результаты, полученные в [18, 19, 22, 23], развиваются для класса нелинейных многосвязных систем, неаффинных по управляющим воздействиям. Рассматривается случай, когда управляющие воздействия ограничены постоянными числами, а объект представлен в специальной форме, преобразование к которой приведено в [22, 23].

Подводные аппараты (ПА) также имеют блочную структуру, однако для них характерна нелинейная зависимость сил и моментов от состояния управляющих органов, что приводит к необходимости рассматривать неаффинные модели.

Постановка задачи. Математическая модель ПА с учетом нелинейности характеристики управляющих органов может быть представлена следующими уравнениями:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}(\mathbf{x},\mathbf{u}), \tag{3}$$

где $\mathbf{x}$ – n-вектор переменных состояния размерности n; $\mathbf{u}$ – m-вектор управляющих воздействий размерности m; $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_i(\mathbf{x}))^T$, $i=\overline{1,n}$ – функциональный вектор; $\mathbf{B}(\mathbf{x}) = (\mathbf{b}_i(\mathbf{x}))^T$, $i=\overline{1,n}$ – функциональная матрица размерностью $n\times m$.

Предполагается, что на управляющие воздействия наложены ограничения вида

$$|u_j| \le u_j^{\max},\ j=\overline{1,m},. \tag{4}$$

где $u_j^{\max} > 0$ – постоянные положительные числа.

Требуется найти управляющее воздействие $\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_m \end{pmatrix}^T$ в виде векторной функции переменных состояния системы (3) при ограничениях (4), которое переводит объект управления (3) из произвольного начального состояния $\mathbf{x}_0 \neq 0$ в заданное конечное состояние $\mathbf{x}_k = 0$, обеспечивая асимптотическую устойчивость замкнутой системы и робастность к векторной функции $\mathbf{f}(\mathbf{x})$.

Кроме того, область функционирования ПА (3) ограничена следующими неравенствами:

$$\left| f_i \ (\mathbf{x}) \right| < \left| b_i \ \left(\mathbf{x}, u^{\max}\right) \right|, \ i = \overline{1, n}. \tag{5}$$

Рассматривается случай, когда модель ПА (3) приведена к одному блоку с помощью преобразования, представленного в [22].

В соответствии с [22] объект (3) состоит из одного блока, если выполнено следующее условие:

$$\left\| \mathbf{b}_i (\mathbf{x}) \right\| \neq 0, \ i = \overline{1, n}. \tag{6}$$

Синтез управления. Рассмотрим квадратичную функцию вида

$$V = 0{,}5\mathbf{x}^T \mathbf{x}. \tag{7}$$

Производная по времени от (7) в силу уравнений ПА (3) равна

$$\dot{V} = \boldsymbol{x}^T \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{x}^T \left(\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{b}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) \right). \tag{8}$$

Рассмотрим случай, когда матрица Якоби производной (8) по управлению содержит элементы, зависящие от вектора $\mathbf{u}$:

$$\frac{\partial \mathbf{b}(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{B}_{\mathbf{u}} (\mathbf{x}, \mathbf{u}). \tag{9}$$

В этом случае можно использовать необходимое условие минимума производной (9), которое заключается в равенстве нулю ее частной производной по вектору управлений $\mathbf{u}$ [24]:

$$\frac{\partial \dot{V}}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\partial \mathbf{x}^T \left(\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \right)}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{x}^T \frac{\partial \mathbf{b}(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0}. \tag{10}$$

Пусть существует некоторая функция

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1 (\mathbf{x}), \tag{11}$$

удовлетворяющая системе алгебраических уравнений (10). В этом случае управление, обеспечивающее необходимые условия минимума производной (8), определяется в соответствии со следующим выражением:

$$\mathbf{u}' = \begin{cases} \mathbf{u}_1(\mathbf{x}), \ \forall \left| \mathbf{u}_1(\mathbf{x}) \right| \leq \mathbf{u}^{\max}, \\ +\mathbf{u}^{\max}, \forall \mathbf{u}_1(\mathbf{x}) > \mathbf{u}^{\max}, \\ -\mathbf{u}^{\max}, \forall \mathbf{u}_1(\mathbf{x}) < -\mathbf{u}^{\max}. \end{cases} \tag{12}$$

Управление (12) обеспечивает только необходимые условия достижения минимума производной (8). Если существует зависящая от вектора управлений матрица вторых частных производных функции (8) по вектору $\boldsymbol{u}$:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{b}(\mathbf{x},\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}^2} = \mathbf{B}_{\mathbf{u}u}(\mathbf{x},\mathbf{u}), \tag{13}$$

то для нахождения вектора управлений, обеспечивающего минимум выражения (8), можно использовать необходимые и достаточные условия вида [24]

$$\frac{\partial^2 \dot{V}}{\partial \mathbf{u}^2} = \mathbf{x}^T \frac{\partial^2 \mathbf{b}(\mathbf{x},\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}^2} > \mathbf{0}. \tag{14}$$

Если существует векторная функция

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_2(\mathbf{x}), \tag{15}$$

удовлетворяющая системе неравенств (14), то управление, обеспечивающее необходимые и достаточные условия достижения производной (8) минимума, определяется выражением

$$\mathbf{u}' = \begin{cases} \mathbf{u}_2(\mathbf{x}),\ \forall \left|\mathbf{u}_2(\mathbf{x})\right| \le \mathbf{u}^{\max}, \\ +\mathbf{u}^{\max}, \forall \mathbf{u}_2(\mathbf{x}) > \mathbf{u}^{\max}, \\ -\mathbf{u}^{\max}, \forall \mathbf{u}_2(\mathbf{x}) < -\mathbf{u}^{\max}. \end{cases} \tag{16}$$

Предположим, что элементы векторной функции $\mathbf{b}(\mathbf{x},\mathbf{u})$ в некоторой области Ω_b удовлетворяют условиям:

$$b_i(\mathbf{x},\mathbf{u}) = b_i^x(\mathbf{x}) b_i^u(\mathbf{u}),\ i = \overline{1,n}, \tag{17}$$

$$sign\left(b^u(\mathbf{u})\right) = sign(\mathbf{u} + \mathbf{a}), \tag{18}$$

где $\mathbf{a}$ – вектор произвольных констант.

Условию (18) удовлетворяют, например, все нечетные функции. В этом случае условием отрицательной определенности выражения (8) является следующая система алгебраических неравенств:

$$\left|b_i(\mathbf{x},\mathbf{u}')\right| > \left|f_i(\mathbf{x})\right|,\ i = \overline{1,n}. \tag{19}$$

Систему неравенств (19) можно переписать в виде

$$\left|b_i(\mathbf{x},\mathbf{u}')\right| = c_i(\mathbf{x}) > \left|f_i(\mathbf{x})\right|,\ i = \overline{1,n}. \tag{20}$$

Избавляясь в (20) от знака модуля, получаем систему нелинейных относительно $\mathbf{u}'$ уравнений:

$$b_i(\mathbf{x},\mathbf{u}') = \tilde{c}_i(\mathbf{x}),\ i = \overline{1,n}. \tag{21}$$

Таким образом, условия (19) сводятся к условиям разрешимости нелинейной системы алгебраических уравнений. Отметим, что для аффинных по управлению систем условия вида (19) (условия управляемости Е.С. Пятницкого) сводятся к ранговым условиям [22, 23].

Управление рулевыми органами ПА. Рассмотрим применение изложенного метода для синтеза управления ПА. Вначале рассмотрим локальные каналы органов управления. Характерными нелинейностями, присущими гидродинамическим органам управления ПА, являются тригонометрическая зависимость создаваемых моментов и сил от положения [25] и кубическая составляющая, связанная с гидродинамическим напором. В этой связи рассмотрим пример управления гидродинамическим рулем ПА с учетом тригонометрической нелинейности.

Пусть уравнения объекта имеют вид

$$\frac{dx}{dt} = -x + \sin(u),\ |u| < 1\,. \tag{22}$$

Рассмотрим квадратичную функцию вида (7). Ее производная по времени, вычисленная в силу уравнений (22), равна

$$\dot{V} = x(-x + \sin(u)). \tag{23}$$

Вычислим вторую частную производную от выражения (23) по управлению, в результате чего получим:

$$\frac{\partial^2 \dot{V}}{\partial \dot{V}^2} = -x\sin(u)\,. \tag{24}$$

Неравенство (14), определяющее область устойчивости замкнутой системы, для объекта (22) принимает вид

$$|\sin(u)| > |x|\,. \tag{25}$$

По выражению (24) выберем управление, удовлетворяющее ограничениям (22):

$$u = \begin{cases} -\arcsin(dx), \forall |\arcsin(dx)| < 1, \\ +1, \forall \arcsin(dx) \geq 1, \\ -1, \forall \arcsin(dx) \leq 1. \end{cases} \tag{26}$$

Результаты моделирования замкнутой робастной системы управления (22), (26) представлены на рис. 1 и 2.

Путем моделирования легко убедиться, что при нарушении условия (25) система (22), (25) становится неустойчивой.

Рассмотрим теперь уравнения рулевого элемента [26] с учетом гидродинамической нелинейности вида

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= x_2, \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= u + u^3, \end{aligned} \tag{27}$$

где на переменные состояния и управление наложены следующие ограничения:

$$|x_2| < x_m^2,\quad |u| < U_{\max}, \tag{28}$$

где $x_m^2, U_{\max}$ – положительные постоянные числа

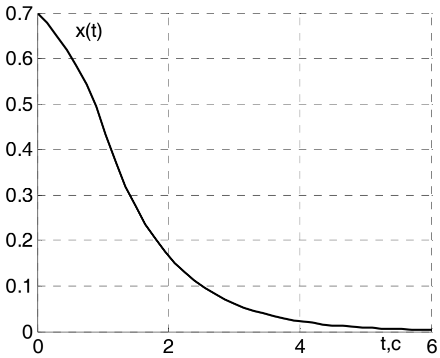

Рис. 1. Переходный процесс в системе (22), (26)

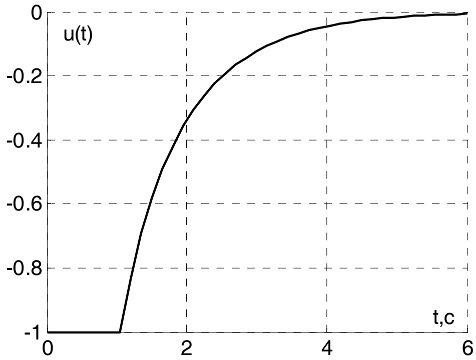

Рис. 2. Управление в системе (22), (26)

Система (27) состоит из двух блоков, т.е. она не удовлетворяет условию (6). В этом случае можно воспользоваться процедурой блочного синтеза, изложенной в [18, 19, 22, 23].

В соответствии с указанной процедурой синтеза запишем следующую частную функцию Ляпунова:

$$V^1 = 0{,}5x_1^2., \tag{29}$$

Производная по времени функции (29) в силу уравнений объекта (27) равна

$$\dot{V}^1 = x_1\dot{x}_1 = x_1x_2. \tag{30}$$

Фиктивным управлением [18, 19, 22, 23] для первого блока является переменная x_2. Запишем ее изменение, обеспечивающее минимум функции (30) с учетом ограничений (28):

$$x_2 = x_m^2 sign(-x_1). \tag{31}$$

Аналогично процедурам, изложенным в [18, 19, 22, 23], воспользуемся аппроксимацией разрывной функции (31):

$$x_2 = x_m^2 \tanh(-q_1x_1), \tag{32}$$

где q_1 – положительное число, приближающее функцию гиперболического тангенса к знаковой функции.

Выражение (32) задает цель управления в установившемся режиме для второго блока системы (27). В соответствии с (32) формируется общая функция Ляпунова вида

$$V_2 = 0{,}5\left(x_2 + x_m^2 \tanh\left(q_1x_1\right)\right)^2. \tag{33}$$

Производная по времени от функции (33) равна

$$\dot{V}_2 = \left(x_2 + x_m^2 \tanh(q_1x_1)\right)\left(u + u^3 + x_m^2\left(1 - \tanh^2(q_1x_1)\right)q_1x_2\right). \tag{34}$$

Минимум функции (34) достигается либо из необходимого и достаточного условия (14), либо на границах управлений. В данном случае неравенство (14) имеет вид

$$\frac{\partial^2 \dot{V}_2}{\partial u^2} = 4u\left(x_2 + x_m^2 \tanh\left(q_1 x_1\right)\right) > 0 . \qquad (35)$$

Из последнего неравенства получаем, например, оптимальное управление вида

$$u^1 = -x_2 + x_m^2 \tanh\left(q_1 x_1\right). \qquad (36)$$

На границах управлений максимум функции (35) достигается при следующем управляющем воздействии:

$$u^2 = -U_m sign\left(x_2 + x_m^2 \tanh\left(q_1 x_1\right)\right). \qquad (37)$$

Подставим выражения (36) и (37) в (34). В результате получим выражения для производной (34) функции Ляпунова (33) с различными управлениями, разница между которыми определяется выражением

$$y = \dot{V}_2^1 - \dot{V}_2^2 = f_1^2 + f_1^4 - f_1 U_m sign f_1 - f_1 U_m^3 sign f_1 , \qquad (38)$$

где $f_1 = x_2 + x_m^2 \tanh q_1 x_1$.

Из выражения (38) видно, что оно всегда положительно, поэтому оптимальным в данном случае является управление на ограничениях (37).

Вид функции (38) представлен на рис. 3.

Рис. 3. К определению знака выражения (38)

Подставим выражение (37) в (34):

$$\dot{V}_2 = \left(x_2 + x_m^2 \tanh\left(q_1 x_1\right)\right) \cdot$$
$$\cdot \left(-U_m sign\left(x_2 + x_m^2 \tanh\left(q_1 x_1\right)\right) - U_m^3 sign\left(x_2 + x_m^2 \tanh\left(q_1 x_1\right)\right)^3 + x_m^2\left(1 - \tanh^2\left(q_1 x_1\right)\right) q_1 x_2\right). \qquad (39)$$

Условие отрицательной определенности выражения (39), т.е. условие асимптотической устойчивости замкнутой системы, имеет вид:

$$\left|U_m + U_m^3\right| > q_1\left(x_m^2\right)^2 . \qquad (40)$$

На рис. 4–7 приведены результаты моделирования замкнутой системы управления (27), (28), (37), которое проводилось при следующих параметрах:

$$\left|x_2\right| < 1, \ \left|u\right| < 3, \ q_1 = 10 .$$

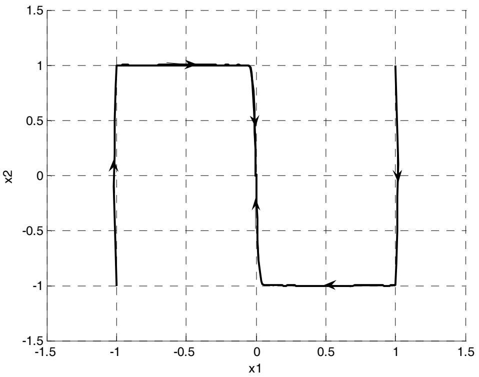

Рис. 4. Фазовый портрет системы (27), (28), (37)

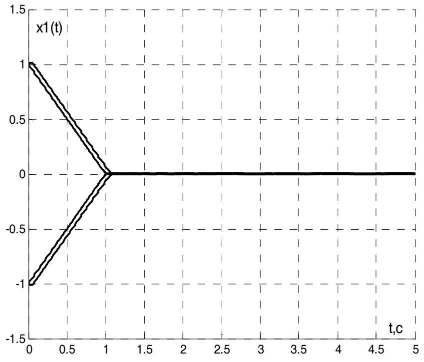

Рис. 5. Изменение переменной x_1 *системы (27), (28), (37)*

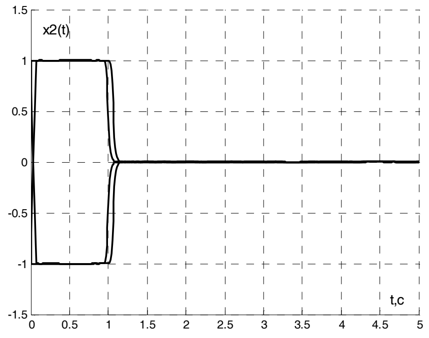

Рис. 6. Изменение переменной x_2 *системы (27), (28), (37)*

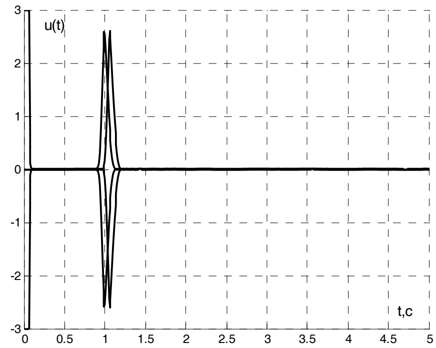

Рис. 7. Изменение управляющего воздействия системы (27), (28), (37)

На рис. 4 представлен фазовый портрет замкнутой системы управления, из которого видно, что ограничения на переменные состояния выполняются. Из рис. 5 видно, что переходный процесс по переменной x_1 завершается приблизительно за 1 секунду, что соответствует оптимальному быстродействию, так как на нее воздействует ограниченная переменная $|x_2| < 1$.

Условиями управляемости по Е.С. Пятницкому объекта (27) являются следующие неравенства:

$$x_{\max}^2 > 0, \quad U_{\max} > 0. \tag{41}$$

Заключение. Предложенные регуляторы совпадают с робастными регуляторами [18, 19], полученными на основе принципа максимума Понтрягина в задаче о быстродействии. Сравнивая результаты работ [18, 19] и настоящей статьи можно установить, что связь между робастным управлением, полученным на базе функций Ляпунова, и управлением, полученным на основе принципа максимума Понтрягина, определяется выражением

$$\frac{dV}{dt} = -H, \tag{42}$$

где H – функция Понтрягина.

Представленные теоретические результаты относятся к системам, состоящим из одного блока, преобразование к которым описано в работах [22, 23]. Однако, как видно из примера 2, при блочной структуре, для неаффинных по управлению объектов, можно применять процедуру блочного синтеза, представленную в [22, 23], которая учитывает ограничения на переменные состояния.

В отличие от линейных по управлению систем, в данном случае требуется выполнение условий, (17), (18), связывающих знак нелинейных функций со знаком управления, от которого зависят функции, входящие в правые части объекта управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Емельянов С.В., Уткин В.И.,* Применение систем автоматического регулирования с переменной структурой для управления объектами, параметры которых изменяются в широких пределах // ДАН СССР, 1963. – Вып. 152. – № 2.
2. *Петров Б.Н., Емельянов СВ., Уткин В.И.* Принцип построения инвариантных систем автоматического регулирования с переменной структурой // ДАН СССР, 1964. – Вып. 154. – № 6.
3. *Петров Б.Н., Емельянов С.В.* Принцип построения комбинированных систем автоматического регулирования с переменной структурой // ДАН СССР. – 1963. – Вып. 153. – № 5.
4. *Айзерман М.А., Пятницкий Е.С.* Основы теории разрывных систем. Ч. I, II // Автоматика и телемеханика. – 1974. – № 7. – С. 33-47. – № 8. – С. 39-61.
5. *Барбашин Е.А., Алимов Ю.И.* К теории релейных дифференциальных уравнений // Известия вузов. Сер. матем. – 1962. – № 1. – С. 3-13.
6. *Матросов В.М.* О дифференциальных уравнениях и неравенствах с разрывными правыми частями. Ч. I, II // Диф. уравн. – 1967. – Т. 3, № 3. – С. 395-409. – № 5. – С. 869-878.
7. *Филиппов А.Ф.* дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. – М.: Наука, 1985.
8. *Пятницкий Е.С.* Управление механическими системами в условиях неопределенности при отсутствии количественной информации о текущем состоянии // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 5. – С. 164-169.
9. *Пятницкий Е.С.* Управляемость классов лагранжевых систем с ограниченными управлениями // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 12. – С. 29-37.
10. *Лукьянов А.Г.* Блочный метод синтеза нелинейных систем на скользящих режимах // Автоматика и телемеханика. – 1998. – № 7. – С. 14-34.
11. *Лукьянов А.Г., Уткин В.И.* Построение оптимальных линейных систем с вырожденными критериями // Автоматика и телемеханика. – 1982. – № 7. – С. 3-12.
12. *Дракунов С.В., Изосимов Д.Б., Лукьянов А.Г., Уткин В.А., Уткин В.И.* Принцип блочного управления. Ч. I // Автоматика и телемеханика. – 1990. – № 5. – С. 3-13.
13. *Дракунов С.В., Изосимов Д.Б., Лукьянов А.Г., Уткин В.А., Уткин В.И.* Принцип блочного управления. Ч. II // Автоматика и телемеханика. – 1990. – № 6. – С. 20-31.
14. *Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В.* Блочный синтез управления механическими системами в условиях неопределенности // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2009. – № 6. – С. 41-54.
15. *Болтянский В.Г.* Математические методы оптимального управления. М.: Наука. 1969.
16. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Физматгиз, 1961.
17. *Карамзин Д.Ю.* Принцип максимума в задаче управления при ограниченных фазовых координатах // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 2. – С. 26-38.
18. *Медведев М.Ю.* Синтез замкнутых оптимальных по быстродействию управлений каскадными нелинейными динамическими системами с ограничениями на координаты // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2009. – № 7. – С. 2-6.

19. *Медведев М.Ю.* Синтез субоптимальных управлений нелинейными многосвязными динамическими системами // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2009. – № 12. – С. 2-8.
20. *Пшихопов В.Х.* Позиционное, субоптимальное по быстродействию управление мобильным роботом // Национальная академия наук Украины «Искусственный интеллект». – 2001. – № 3. – С. 490-497.
21. *Бойчук Л.М.* Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. – М.: Энергия, 1971.
22. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 187-196.
23. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Блочный синтез робастных систем при ограничениях на управления и координаты состояния (в печати) // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2011. – № 1.
24. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973.
25. *Костюков В.А., Пшихопов В.Х.* Применение программного комплекса NUMECA International для расчета аэрогидродинамических параметров математических моделей подвижных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 7 (84). – С. 82-84.
26. *Красовский А.А. Александров А.Г., Артемьев В.Н. и др.* Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит. 1987.

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

Медведев Михаил Юрьевич
Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.
E-mail: medv_mihal@rambler.ru.
347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.
Тел.: 88634371694.
Кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н., доцент.

Пшихопов Вячеслав Хасанович
E-mail: pshichop@rambler.ru.
Кафедра электротехники и мехатроники; зав. кафедрой; д.т.н.

Medvedev Mixail Yur’evich
Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.
E-mail: medv_mihal@rambler.ru.
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.
Phone: +78634371694.
The Department of Electrical Engineering and Mechatronics; Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.

Pshixopov Vyacheslav Xasanovich
E-mail: pshichop@rambler.ru.
The Department of Electrical Engineering and Mechatronics; Department Head; Dr. of Eng. Sc.