

Lyapunova Irina Arturovna – Southern Federal University; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; e-mail: ialyapunova@sfnu.ru; phone: +78634371705; cand. of eng.; sc.; associate professor.

Levchenko Marina Nikolaevna

– e-mail: mnlevchenko@sfnu.ru; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Gritsov Vladimir Vladislavovich – e-mail: gvv@sfnu.ru; 68, Alexandrovskaya street, ap. 35, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79185949373; cand. of eng.; sc.; associate professor.

УДК 681.51

DOI 10.23683/2311-3103-2018-7-143-154

А.Н. Попов

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СЛЕДЯЩИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Рассматривается применение принципов и методов синергетической теории управления для синтеза автоматических регуляторов, обеспечивающих решение задачи слежения. Следящий регулятор должен обеспечивать изменение одной из переменных объекта управления в соответствии с некоторым временным сигналом, поступающим на вход системы и являющимся априори неизвестной функцией времени. При проектировании большинства следящих систем используются частотные методы синтеза, предполагающие линейное математическое описание управляемого объекта и заключающиеся в определении структуры и параметров корректирующего звена, которое обеспечивает устойчивость системы при заданном порядке астатизма по входному воздействию. Такой подход становится малоэффективен, если динамика объекта управления является существенно нелинейной. Целью исследования является разработка аналитических процедур синтеза следящих регуляторов для общего класса нелинейных систем. В статье представлено два подхода к проведению процедуры синергетического синтеза следящих регуляторов. Первый из них предполагает вычисление производных входного сигнала по времени. Второй подход основан на идее текущей кусочно-линейной аппроксимацией входного сигнала и синтезе асимптотического наблюдателя коэффициента наклона аппроксимирующей прямой. В этом случае следящая система оперирует только с входным сигналом и его дифференцирование не требуется. Предлагаемые подходы иллюстрируются простыми примерами. Для подтверждения теоретических исследований проведено компьютерное моделирование синтезированных следящих систем при различных входных сигналах. По их результатам можно сделать вывод, что предложенные подходы позволяют синтезировать регуляторы, способные обрабатывать задающие воздействия общего класса непрерывных функций времени, и могут послужить теоретической основой для проектирования следящих систем управления нелинейными динамическими объектами.

Следящие системы автоматического управления; синергетический синтез регуляторов; синтез асимптотических наблюдателей.

A.N. Popov

SYNERGETIC SYNTHESIS OF TRACING CONTROL SYSTEMS

Paper is devoted to the usage of synergetic control theory for synthesis of automatic tracking control systems. The tracking regulator should provide change of one of control object variables according to some temporary signal arriving on an input of a system and being a priori unknown function of time. At design of the majority of the tracking control systems the frequency methods of synthesis assuming the linear mathematical description of the control object are used. These methods allow to define structure and parameters of the linear compensating element which provides stability of a system and the set astaticism number on entrance influence. Such approach becomes ineffective if dynamics of a control object is significantly nonlinear. Research objective is development of analytical procedures of synthesis of the tracking regulators for the general class

of nonlinear systems. Two approaches to holding a procedure of synergetic synthesis of the tracking regulators are presented in a paper. The first of them assumes calculation of derivatives of an entrance signal on time. The second approach is based on the idea by the current piecewise linear approximation of an entrance signal and synthesis of the asymptotic observer of coefficient of an inclination of the approximating straight line. In this case the tracking control system operates only with an entrance signal and its differentiation is not required. The offered approaches are illustrated by simple examples. For confirmation of theoretical researches computer modeling of the synthesized tracking control systems at various entrance signals is carried out. By their results it is possible to draw a conclusion that the offered approaches allow to synthesize the regulators capable to fulfill the setting influences of the general class of continuous functions of time and can form a theoretical basis for design of the tracking control systems for nonlinear dynamic objects.

Tracking control systems; synergetic feedback synthesis; asymptotic observer synthesis.

Введение. Следящие системы принято выделять в отдельный класс систем автоматического управления. В отличие от наиболее распространенных систем стабилизации, выполняющих задачу удержания управляемых переменных в заданном постоянном значении, следящие системы должны обеспечивать изменение управляемой переменной $x^{(ynp)}$ в соответствии с некоторым временным сигналом $g(t)$, поступающим на вход системы. Это входной сигнал рассматривается как задающее воздействие, являющееся априори неизвестной функцией времени. Задача следящей системы состоит в воспроизведении входного сигнала с заданной точностью: $|g(t) - x^{(ynp)}| \leq \varepsilon$.

В настоящее время при проектировании следящих систем в основном используются подходы классической теории автоматического управления, использующие линейное или линеаризованное математическое описание управляемых процессов [1–7]. Применение т.н. «частотных» методов анализа и синтеза позволяет решать задачу слежения при заданном порядке астатизма системы по входному воздействию. Однако такой подход встречает серьезные методологические затруднения в тех случаях, когда динамика управляемого объекта является существенно нелинейной. Необходимость повысить эффективность линейных следящих регуляторов обуславливает использование различных направлений современной теории управления: нечеткую логику [8–11], адаптивные регуляторы [12, 13], робастные регуляторы [14, 15], управление H_∞ [16] и др. Но общая «линейная» идеология остается доминирующей.

Синергетическая теория управления [17–20] дает эффективные методы синтеза регуляторов для управления многомерными и нелинейными объектами. Эти методы успешно применялись при проектировании систем управления объектами различной природы и назначения [21–25]. При этом, синтезированные регуляторы решали задачу стабилизации управляемой переменной, либо задачу генерации колебаний управляемой переменной. В работах [26, 27] представлено решение задачи синергетического синтеза регуляторов, обеспечивающих воспроизведение заданного временного сигнала (периодического или хаотического), и предполагающих введение генераторов эталонного сигнала в структуру замкнутой системы. При этом считалось, что характеристики временного сигнала априори определены, а его динамика может быть описана соответствующими дифференциальными уравнениями.

В этой связи, данную статью можно рассматривать как попытку использования принципов и методов синергетической теории управления для решения задачи синтеза следящих систем автоматического управления в ее общепринятой постановке. Ниже будут изложены два варианта проведения процедуры синергетического синтеза следящих регуляторов. Первый из них предполагает вычисление

производных входного сигнала по времени, во втором случае используются идея расширения пространства состояния управляемой системы и методика построения асимптотических наблюдателей.

Синтез следящего регулятора с дифференцированием входного сигнала.

Сформулируем задачу синтеза следящего регуляторов, предполагая, что объект имеет один канал управления и необходимо обеспечить слежение за одним входным сигналом.

Пусть динамика управляемого объекта описывается системой обыкновенных уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, u, g), \quad (1)$$

где \mathbf{X} – вектор переменных состояния системы, U – управляющее воздействие, $g = g(t)$ – задающее воздействие.

Требуется найти $u = u(\mathbf{x}, g)$, обеспечивающее асимптотическое схождение управляемой переменной к задающему входному сигналу: $\lim_{t \rightarrow \infty} (x^{n-p} - g(t)) = 0$.

Методы синергетического синтеза основаны на идее введения притягивающих инвариантных многообразий $\psi_i(\mathbf{x}) = 0$ в пространстве состояний управляемой системы. Закон управления в скалярном случае (один канал управления) ищется как решение функционального уравнения, записанного относительно соответствующей макропеременной Ψ_i . Это уравнение представляет собой дифференциальное уравнение, обладающее свойством асимптотической устойчивости относительно $\psi_i = 0$. Обычно используется функциональное уравнение первого порядка $T\dot{\psi}_i + \psi_i = 0$.

Таким образом, для определения управления необходимо дифференцировать макропеременную по времени в силу дифференциальных уравнений модели управляемого объекта. В структуру инвариантного многообразия всегда входит разность между текущими значениями управляемой переменной и задающего сигнала (желаемого значения управляемой переменной). В случае задачи стабилизации задающий сигнал является постоянной величиной, а его производная равна нулю. При изменении задающего сигнала во времени, характерном для задач слежения, дифференцирование макропеременных приведет к появлению производных входного сигнала в законе управления. Таким образом, на вход следящего регулятора должен поступать не только задающий сигнал, но и его производные по времени. Продемонстрируем это на простом примере.

Рассматривается объект, описываемый математической моделью следующего вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= (u - f(x_2))a_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Подобную структуру имеют модели, описывающие динамику механических систем с одной степенью свободы, где переменные x_1 и x_2 соответствуют перемещению и скорости, управление U имеет смысл внешней силы, а функция $f(x_2)$ характеризует силы, препятствующие движению.

Поставим задачу найти управление как функцию $u = u(\mathbf{x}, g)$, которое обеспечит асимптотическое схождение значения управляемой переменной x_1 к значению входного задающего сигнала, являющегося неизвестной функцией времени $g = g(t)$.

Для решения поставленной задачи введем инвариантное многообразие:

$$\psi = x_2 + k(x_1 - g(t)) = 0. \quad (3)$$

На этом многообразии динамика замкнутой системы будет описываться дифференциальным уравнением первого порядка $\dot{x}_1 = -k(x_1 - g(t))$. Очевидно, что при $k > 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} (x_1(t) - g(t)) = 0$.

Закон управления ищется как решение функционального уравнения $T\dot{\psi} + \psi = 0$ в силу уравнений модели (2):

$$\begin{aligned} T(\dot{x}_2 + k\dot{x}_1 - k\dot{g}) + x_2 + k(x_1 - g(t)) &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow T((u - f(x_2))a_1 + kx_2 - k\dot{g}) + x_2 + k(x_1 - g(t)) &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow u = f(x_2) - k(x_2 - \dot{g})/a_1 - (x_2 + k(x_1 - g(t)))/(a_1T). \end{aligned} \quad (4)$$

На рис. 1 представлены полученные в результате компьютерного моделирования замкнутой системы (2), (4) переходные процессы переменной x_1 и задающего воздействия при $f(x_2) = x_2 + x_2^3$, $a_1 = 1$, $T = 1$, $k = 10$ и задающем воздействии, описываемом функцией $g(t) = \sin(0,4t) + 0,5\sin(0,2t) + 0,25\sin(0,1t)$. Как видно из графиков, синтезированный регулятор обеспечивает асимптотическое схождение $x_1(t)$ к $g(t)$.

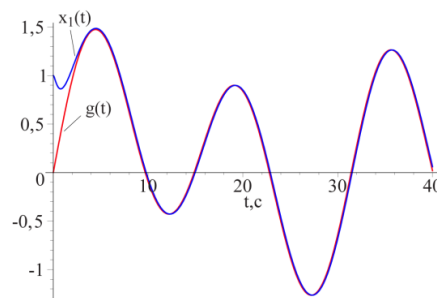


Рис. 1. Переходные процессы управляемой переменной и задающего сигнала в следящей системе (2), (4)

Необходимо отметить, что в рассматриваемом примере процедура синергетического синтеза включала в себя только один этап, а инвариантное многообразие задавалось сразу. В случае объектов высокого порядка процедура синтеза включает ряд последовательных этапов динамической декомпозиции, а инвариантное многообразие формируется в ходе этой процедуры. При синтезе следящих регуляторов это приведет к появлению в законе управления высших производных входного сигнала по времени (порядок высшей производной равен числу этапов декомпозиции). Многократное дифференцирование входного сигнала считается нежелательным с точки зрения технической реализации алгоритмов управления. В этой связи, целесообразна разработка методики синергетического синтеза следящих регуляторов, использующих информацию только о входном сигнале и не требующих его дифференцирования.

Синтез следящего регулятора с текущей кусочно-линейной аппроксимацией входного сигнала. Любая непрерывная функция с достаточной степенью точностью может быть аппроксимирована полиномом. Если степень этого полинома равна единице, имеет место линейная аппроксимация, нашедшая широкое применение на практике.

Задающий сигнал в следящей системе, являющийся неизвестной функцией времени, тоже можно рассматривать как линейный сигнал с переменным коэффициентом наклона аппроксимирующей прямой. Данные рассуждения легли в основу разработки следующей методики синергетического синтеза следящих регуляторов, которая основана на принципе расширения пространства состояний исходной системы за счет добавления дифференциальных уравнений опорного временного сигнала (линейной функции времени) и использует методику синтеза асимптотического наблюдателя коэффициента наклона аппроксимирующей прямой.

Если некоторая величина $g(t)$ изменяется линейно во времени: $g(t) = g_1 t$, то динамика этого изменения описывается дифференциальным уравнением $\dot{g} = g_1$. Тогда модель расширенной системы (модель синтеза) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{F}(\mathbf{x}, u), \\ \dot{y}_1 &= y_2, \\ \dot{y}_2 &= 0,\end{aligned}\tag{5}$$

где y_1 – переменная модели опорного сигнала, y_2 – переменная, характеризующая текущее значение коэффициента наклона аппроксимирующей прямой. Из последнего уравнения (5) следует, что y_2 – кусочно-постоянная величина, а, следовательно, y_1 является кусочно-линейной функцией времени.

Процедура синтеза включает в себя два этапа. На первом этапе проводится синтез регулятора в предположении, что все переменные модели (5) являются наблюдаемыми. На втором – проводится синтез асимптотического наблюдателя, проводящего оценку текущего значения y_2 . После этого оценка \hat{y}_2 подставляется в синтезированный закон управления.

Покажем применение данной методики на примере. Поставим задачу синтезировать следящий регулятор для объекта, описываемого моделью (2). Модель расширенной системы в этом случае принимает вид:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= (u - f(x_2))a_1 \\ \dot{y}_1 &= y_2, \\ \dot{y}_2 &= 0.\end{aligned}\tag{6}$$

Регулятор должен обеспечивать асимптотическое схождение управляемой переменной к переменной опорного сигнала: $x_1 \rightarrow y_1$. Поэтому вводится инвариантное многообразие

$$\psi = x_2 + k(x_1 - y_1) = 0.\tag{7}$$

Закон управления находится как решение функционального уравнения $T\dot{\psi} + \psi = 0$ в силу уравнений модели (6):

$$\begin{aligned}T(\dot{x}_2 + k(\dot{x}_1 - \dot{y}_1)) + x_2 + k(x_1 - y_1) &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow T((u - f(x_2))a_1 + k(x_2 - y_2)) + x_2 + k(x_1 - y_1) &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow u = f(x_2) - k(x_2 - y_2)/a_1 - (x_2 + k(x_1 - y_1))/(a_1 T).\end{aligned}\tag{8}$$

Для синтеза наблюдателя используется методика синергетического синтеза асимптотических наблюдателей [18]. Модель расширенной системы представляется в векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{g}_0(\mathbf{v}, u) + \mathbf{G}_1(\mathbf{v})\mathbf{w}; \\ \dot{\mathbf{w}} &= \mathbf{h}_0(\mathbf{v}, u) + \mathbf{H}_1(\mathbf{v})\mathbf{w},\end{aligned}\quad (9)$$

где \mathbf{v} – вектор наблюдаемых переменных, \mathbf{w} – вектор наблюдаемых переменных.

В нашем случае:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ y_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w} = y_2, \quad \mathbf{g}_0 = \begin{bmatrix} x_2 \\ (u - f(x_2))a_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{h}_0 = 0, \quad \mathbf{H}_1 = 0 \quad . \quad (10)$$

Уравнения наблюдателя находится из выражения

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{L}\mathbf{z} - \mathbf{L} \int_0^{\mathbf{v}} \Gamma(\mathbf{v}) d\mathbf{v} - \mathbf{h}_0 + \Gamma(\mathbf{v})\mathbf{g}_0, \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{w}} = \int_0^{\mathbf{v}} \Gamma(\mathbf{v}) d\mathbf{v} - \mathbf{z}.$$

где \mathbf{z} – переменные наблюдателя, \mathbf{L} – матрица, выбираемая из условия устойчивости наблюдателя (в нашем случае содержит один элемент l_1 , условие устойчивости $l_1 < 0$), матрица $\Gamma(\mathbf{v})$ вычисляется из уравнения $\mathbf{H}_1 - \mathbf{L} = \Gamma(\mathbf{v})\mathbf{G}_1$.

Подставляя (10) в (11) получим искомые уравнения наблюдателя:

$$\dot{z}_1 = l_1 z_1 + l_1^2 y_1 \quad (12)$$

и оценки коэффициента наклона аппроксимирующей прямой

$$\hat{y}_2 = -l_1 y_1 - z_1 \quad (13)$$

Следует отметить, что уравнения (12), (13) справедливы для любых объектов, описываемых моделью (1).

С учетом оценки (13) закон управления принимает окончательный вид:

$$u = f(x_2) - k(x_2 + l_1 y_1 + z_1) / a_1 - (x_2 + k(x_1 - y_1)) / (a_1 T). \quad (14)$$

Для анализа эффективности синтезированного следящего регулятора было проведено компьютерное моделирование замкнутой системы (6), (12)–(14) при таких же параметрах объекта и регулятора и различных входных воздействиях. На вход следящей системы в реальных условиях работы поступает не опорный кусочно-линейный сигнал y_1 , а задающий сигнал $g(t)$, изменяющийся во времени произвольным образом. Поэтому для корректного моделирования системы нужно произвести замену $y_1 = g(t)$ в уравнениях (12)–(14). Функция $f(x_2)$ задавалась как $f(x_2) = x_2 + x_2^3$.

На рис. 2 представлены графики входящего воздействия $g(t) = 2 + t$ и переходного процесса управляемой переменной x_1 .

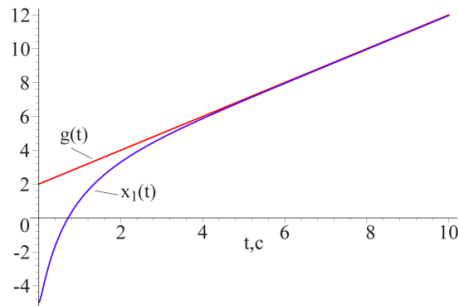


Рис. 2. Переходные процессы управляемой переменной и задающего сигнала в следящей системе (6), (12)-(14) при $g(t) = 2 + t$

На рис. 3 показано изменение во времени оценки коэффициента наклона аппроксимирующей прямой. Видно, что оценка стремится к значению 1, которое соответствует коэффициенту перед t в функции $g(t)$.

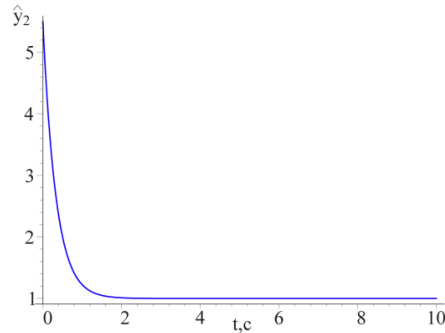


Рис. 3. Оценка коэффициента наклона аппроксимирующей прямой при $g(t) = 2 + t$

На рис. 4 представлены результаты моделирования следящей системы (6), (12)–(14) при входном сигнале $g(t) = 1 + 0,5t - 0,1t^2$. Из рис. 5, показывающим изменение оценки коэффициента наклона аппроксимирующей прямой во времени, видно, что этот коэффициент меняется линейно, что соответствует кусочно-линейной аппроксимации параболической функции.

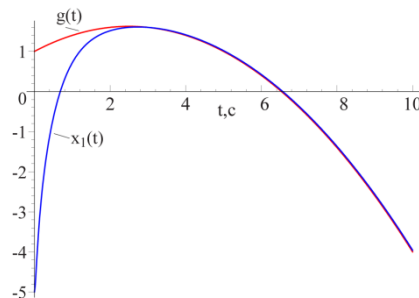


Рис. 4. Переходные процессы управляемой переменной и задающего сигнала в следящей системе (6), (12)-(14) при $g(t) = 1 + 0,5t - 0,1t^2$

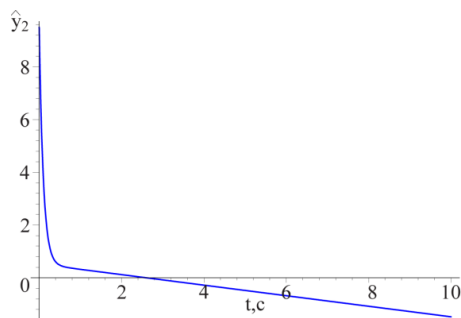


Рис. 5. Оценка коэффициента наклона аппроксимирующей прямой при $g(t) = 1 + 0,5t - 0,1t^2$

На рис. 6-7 представлены результаты моделирования следящей системы при входном сигнале $g(t) = 5\sin(0,5t)$, демонстрирующие эффективность предложенного алгоритма для воспроизведения гармонических функций времени.

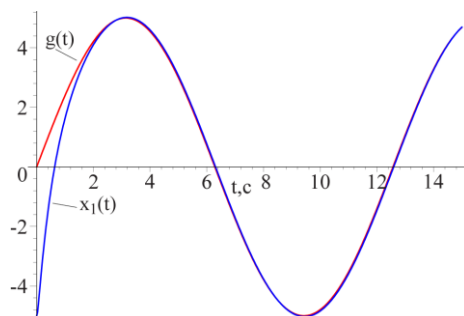


Рис. 6. Переходные процессы управляемой переменной и задающего сигнала в следящей системе (6), (12)-(14) при $g(t) = 5\sin(0,5t)$

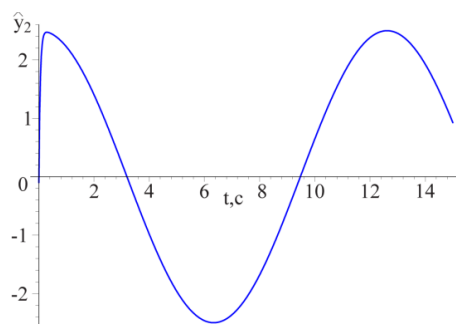


Рис. 7. Оценка коэффициента наклона аппроксимирующей прямой при $g(t) = 5\sin(0,5t)$

Заключение. Оценивая результаты компьютерного моделирования, можно сделать вывод, что предложенный подход позволяет синтезировать регуляторы, способные обрабатывать задающие воздействия общего класса непрерывных функций времени, и может послужить теоретической основой для проектирования следящих систем управления нелинейными динамическими объектами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ахметжанов А. А., Кочемасов А. В.* Следящие системы и регуляторы. учеб. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 286 с.
2. *Барский А.Г.* Оптико-электронные следящие системы: учеб. пособие. – М.: Университетская книга; Логос, 2009. – 200 с.
3. *Шубладзе А.М., Попадысо В.Е., Кузнецов С.И., Кротов А.В., Гуляев С.В., Ольшеванг В.Р., Малахов В.А.* Быстродействующие следящие ПИ-системы максимальной степени устойчивости для управления технологическими объектами нефтегазовой отрасли // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 8. – С. 3-6.
4. *Никифоров В.О., Лукьянова Г.В.* Следящая система комбинированного управления // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 6 (76). – С. 39-43.
5. *Иванчура В.И., Прокопьев А.П.* Оптимизация следящей системы автоматического управления // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 5 (38). – С. 44-49.
6. *Шапран А.А., Устюгова А.А.* Синтез системы управления следящим приводом повышенной точности // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 3 (19). – С. 45-49.
7. *Лысов В.Е., Саранцев С.С.* Синтез корректирующего звена следящего электропривода подачи координатно-расточного станка для компенсации нелинейности типа «клюфт» в кинематической цепи // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 1 (33). – С. 148-155.
8. *Bo Xiao, H.K. Lam, Ge Song, Hongyi Li* Output-Feedback Tracking Control for Interval Type-2 Polynomial Fuzzy-Model-Based Control Systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60, № 12. – P. 5830-5840.
9. *Chang, Yeong-Chan.* Robust tracking control for nonlinear MIMO systems via fuzzy approaches // Automatica. – 2010. – Vol. 36, No. 10. – P. 1535-1545.
10. *Иванчура В.И., Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т.* Модель следящей системы автоматического управления с нечетким регулятором // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2012. – № 3 (43). – С. 15-20.
11. *Путов В.В., Зунг Ч.А., Куанг Ф.К.* Адаптивная электромеханическая следящая система с двух- и трехмассовыми нелинейными упругими объектами и нейронечетким управлением // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – № 5. – С. 21-24.
12. *Решетникова Г.Н.* Следящая система адаптивного управления с прогнозирующей моделью пониженного порядка // Вестник Томского государственного университета. – 2006. – № 290. – С. 237-240.
13. *Мальцев Г.Н., Афонин Г.И.* Оптимизация параметров адаптивного контура следящей системы автоматического управления на основе анализа частотной характеристики // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 7. – С. 26-31.
14. *Celentano L.* Pseudo-PID robust tracking design method for a significant class of uncertain MIMO systems // in IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, No. 1. – P. 1545-1552.
15. *Celentano L., Basin M.V.* An Approach to Design Robust Tracking Controllers for Nonlinear Uncertain Systems // in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems (Early Access). – 2018. DOI: 10.1109/TSMC.2018.2834908.
16. *Kim S.H.* H_∞ Output-Feedback Tracking Control for Networked Control Systems // Mathematical Problems in Engineering. – Vol. 2015. Article ID 724389. – 10 p. – <http://dx.doi.org/10.1155/2015/724389>.
17. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
18. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. Ч. 2. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 344 с.
19. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития // Известия ТРТУ. – 2001. – № 5 (23). – С. 7-27.
20. *Колесников А.А.* Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия ТРТУ. – 2006. – № 6 (51). – С. 10-38.
21. *Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников Ал.А., Топчиев Б.В., Мушленко А.С., Кобзев В.А.* Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – 2-е изд.. – М.: Либроком, 2013. – 304 с.

22. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А., Погорелов М.Е., Кондратьев И.В. Синергетические методы управления сложными системами: Энергетические системы. – 2-е изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 248 с.
23. Веселов Г.Е., Попов А.Н., Радионов И.А. Энергосберегающее управление асинхронным тяговым двигателем: синергетический подход // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 2. – С. 18-22.
24. Веселов Г.Е., Попов А.Н., Радионов И.А. Синергетическое управление асинхронным тяговым электроприводом локомотивов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 166-180.
25. Popov A.N., Radionov I.A., Mushenko A.S. Synergetic Design of Autopiloting Systems with Complex Optimization of Train Traction // Proceedings of 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON 2015), June 24-26, 2015, Saint Petersburg, Russia. – P. 467-472.
26. Попов А.Н. Синергетический синтез регуляторов для задач генерации колебательных режимов в технических системах // Известия ЮФУ. Технические науки, 2012. – № 4 (129). – С. 156-162.
27. Попов А.Н. Синергетический синтез автопилотов для задач формирования эталонных траекторий движения в горизонтальной плоскости // Современная наука и инновации. – 2016. – № 4. – С. 29-36.

REFERENCES

1. Akhmetzhanov A. A., Kochemasov A.V. Sledyashchie sistemy i regulatory. ucheb. posobie [Tracking systems and regulators. textbook]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 286 p.
2. Barskiy A.G. Optiko-elektronnye sledyashchie sistemy: ucheb. posobie [Opto-electronic tracking systems: a tutorial]. Moscow: Universitetskaya kniga; Logos, 2009, 200 p.
3. Shubludze A.M., Popadyso V.E., Kuznetsov S.I., Krotov A.V., Gulyaev S.V., Ol'shvang V.R., Malakhov V.A. Bystrodeystvuyushchie sledyashchie PI-sistemy maksimal'noy stepeni ustoychivosti dlya upravleniya tekhnologicheskimi ob"ektami neftegazovoy otrasli [High-speed tracking PI-systems of maximum degree of stability for control of technological objects of oil and gas industry], *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in the oil industry], 2011, No. 8, pp. 3-6.
4. Nikiforov V.O., Luk'yanova G.V. Sledyashchaya sistema kombinirovannogo upravleniya [Tracking system of combined control], *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Journal scientific and technical of St. Petersburg state University of information technologies, mechanics and optics], 2011, No. 6 (76), pp. 39-43.
5. Ivanchura V.I., Prokop'ev A.P. Optimizatsiya sledyashchey sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Optimization of the tracking system of automatic control], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian state aerospace University. academician M. F. Reshetnev], 2011, No. 5 (38), pp. 44-49.
6. Shapran A.A., Ustyugova A.A. Sintez sistemy upravleniya sledyashchim privodom povyshennoy tochnosti [Synthesis of control system of the tracking drive of the increased accuracy], *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural state University of railway engineering], 2013, No. 3 (19), pp. 45-49.
7. Lysov V.E., Sarantsev S.S. Sintez korrektruyushchego zvena sledyashchego elektroprivoda podachi koordinatno-rastochnogo stanka dlya kompensatsii nelineynosti tipa «lyuft» v kinemacheskoy tsepi [Synthesis of the corrective link of the tracking electric drive of the coordinate boring machine for compensation of nonlinearity of the "backlash" type in the kinematic chain], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Samara state technical University. Series: Technical Sciences], 2012, No. 1 (33), pp. 148-155.
8. Bo Xiao, H.K. Lam, Ge Song, Hongyi Li Output-Feedback Tracking Control for Interval Type-2 Polynomial Fuzzy-Model-Based Control Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics.*, 2013, Vol. 60, No. 12, pp. 5830-5840.

9. *Chang, Yeong-Chan*. Robust tracking control for nonlinear MIMO systems via fuzzy approaches, *Automatica*, 2010, Vol. 36, No. 10, pp. 1535-1545.
10. *Ivanchura V.I., Prokop'ev A.P., Emel'yanov R.T.* Model' sledyashchey sistemy avtomaticheskogo upravleniya s nechetkim regulyatorom [Model of the tracking system of automatic control with fuzzy controller], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian state aerospace University. academician M. F. Reshetnev], 2012, No. 3 (43), pp. 15-20.
11. *Putov V.V., Zung Ch.A., Kuang F.K.* Adaptivnaya elektromekhanicheskaya sledyashchaya sistema s dvukh- i trekhmassovymi nelineynymi uprugimi ob'ektami i neyronechetkim upravleniem [Adaptive Electromechanical tracking system with two- and three-mass nonlinear elastic objects and neuro-fuzzy control], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestiya Etu "LETI"], 2018, No. 5, pp. 21-24.
12. *Reshetnikova G.N.* Sledyashchaya sistema adaptivnogo upravleniya s prognoziruuyushchey model'yu ponizhennogo poryadka [Tracking system of adaptive control with predictive mode of reduced order], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk state University], 2006, No. 290, pp. 237-240.
13. *Mal'tsev G.N., Afonin G.I.* Optimizatsiya parametrov adaptivnogo kontura sledyashchey sistemy avtomaticheskogo upravleniya na osnove analiza chastotnoy kharakteristiki [Optimization of parameters of the adaptive circuit of the automatic control tracking system based on the analysis of the frequency response], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [News of higher educational institutions. Instrument making], 2014, Vol. 57, No. 7, pp. 26-31.
14. *Celentano L.* Pseudo-PID robust tracking design method for a significant class of uncertain MIMO systems, in *IFAC-PapersOnLine*, 2017, Vol. 50, No. 1, pp. 1545-1552.
15. *Celentano L., Basin M.V.* An Approach to Design Robust Tracking Controllers for Nonlinear Uncertain Systems, in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems (Early Access)*, 2018. DOI: 10.1109/TSMC.2018.2834908.
16. *Kim S.H.* H_∞ Output-Feedback Tracking Control for Networked Control Systems, *Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2015. Article ID 724389, 10 p. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/724389>.
17. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 344 p.
18. *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya: Sinergeticheskiy podkhod v teorii upravleniya* [Modern applied control theory: Synergetic approach in control theory], ed. by A.A. Kolesnikova. Part 2. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 344 p.
19. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskaya teoriya upravleniya: konceptsii, metody, tendencii razvitiya [Synergetic control theory: concepts, methods, and tendencies of development], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2001, No. 5 (23), pp. 7-27.
20. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskaya konceptsiya sistemnogo sinteza: edinstvo processov samoorganizatsii i upravleniya [Synergetic concept of system synthesis: unity of processes of self-organization and management] *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 6 (51), pp. 10-38.
21. *Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N., Kolesnikov A.A., Topchiev B.V., Mushenko A.S., Kobzev V.A.* Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: mekhanicheskie i ehlektromekhanicheskie sistemy [Synergetic methods of control of complex systems: mechanical and Electromechanical systems]. 2nd ed. Moscow: Librokom, 2013, 304 p.
22. *Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N., Kuz'menko A.A., Pogorelov M.E., Kondrat'ev I.V.* Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: Ehnergeticheskie sistemy [Synergetic methods of management of complex systems: Energy systems]. 2nd ed. Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2013, 248 p.
23. *Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A.* Ehnergoberegayushchee upravlenie asinhronnym tyagovym dvigatelem: sinergeticheskiy podkhod [Energy-saving control of asynchronous traction motor: synergetic approach], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2013, No. 2, pp. 18-22.
24. *Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A.* Sinergeticheskoe upravlenie asinkhronnym tyagovym elektroprivodom lokomotivov [Synergetic control of asynchronous traction electric drive of locomotives], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2014, No. 4, pp. 166-180.

25. *Popov A.N., Radionov I.A., Mushenko A.S. Synergetic Design of Autopiloting Systems with Complex Optimization of Train Traction, Proceedings of 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON 2015), June 24-26, 2015, Saint Petersburg, Russia, pp. 467-472.*
26. *Popov A.N. Sinergeticheskiy sintez regulyatorov dlya zadach generatsii kolebatel'nykh rezhimov v tekhnicheskikh sistemakh [Synergetic synthesis of controllers for the task of generation of oscillatory modes in engineering systems], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 4 (129), pp. 156-162.*
27. *Popov A.N. Sinergeticheskiy sintez avtopilotov dlya zadach formirovaniya etalonnykh traektoriy dvizheniya v gorizonta'noy ploskosti [Sovremennaya nauka i innovatsii], 2016, No. 4, pp. 29-36.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Б. Чернышев.

Попов Андрей Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: anpopov@sfedu.ru; 347922, Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +78634360707; кафедра синергетики и процессов управления; зав. кафедрой; к.т.н.

Popov Andrey Nickolaevitch – South Federal University; e-mail: anpopov@sfedu.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360707; the department of synergetics and control processes; head of department; cand. of eng. sc.