

5. *Pinder S.D.* Aircraft Takeoff Performance Monitoring in Far-Northern Regions: An Application of the Global Positioning System. Ph.D. thesis. – University of Saskatchewan. – 2002.
6. *Павлов Б.В., Шевченко А.М.* Средства информационной поддержки пилота на этапах взлета и посадки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3 (116). – С. 206-214.
7. *Kurdjukov A.P., Nachinkina G.N., Shevtchenko A.M.* Energy approach to flight control // AIAA Conf. Navigation, Guidance & Control. AIAA. – Boston, 1998. – P. 98-4211.
8. *Павлов Б.В., Шевченко А.М., Начинкина Г.Н.* Энергетический подход и его использование для проектирования систем управления полетом // Российско-американский научный журнал «Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем». – 2003. – Вып. 2 (16). – Т. 8. – С. 24-43.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Н. Афанасьев.

**Шевченко Андрей Михайлович** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; e-mail: anshev@ipu.ru; 117997, г. Москва, Профсоюзная, 65; тел.: +74953349039; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; к.т.н.; с.н.с.

**Павлов Борис Викторович** – e-mail: pavlov@ipu.ru; тел.: 84953349351; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; гл.н.с.; д.т.н.

**Начинкина Галина Николаевна** – e-mail: vicabo@ipu.ru; тел.: +74953349039; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; научный сотрудник.

**Shevchenko Andrei Mihailovich** – Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: anshev@ipu.ru; 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; phone: +74953349039; laboratory of dynamic information\control systems; cand. of eng. sc.; senior scientist.

**Pavlov Boris Viktorovich** – e-mail: pavlov@ipu.ru; phone: +74953349351; laboratory of dynamic information/control Systems; chief researcher; dr. of eng. sc.

**Nachinkina Galina Nikolaevna** – e-mail: vicabo@ipu.ru; phone: +74953349039; laboratory of dynamic information\control systems; scientist.

УДК 681.51.013; 516.32

**А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов**

### **О ПРОБЛЕМАТИКЕ СИНТЕЗА КООРДИНИРУЮЩИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ\***

*Обсуждается проблематика координирующего управления. Излагается метод синтеза координирующих автоматических систем, цель управления которых формулируется в виде задания управляющих соотношений между переменными состояниями многоканального объекта или группы объектов. Исследуется задача координации в иной постановке по сравнению с работами основоположника данного направления Л.М. Бойчука. Процессы управления формируются посредством двух многомерных контуров: контура агрегатного управления динамикой объекта в целом и контура регулирования межкоординатных соотношений. В предлагаемых решениях ключевую роль играет автономизация данного контура; процедуры расчета контуров управления базируются на аппарате передаточных матриц.*

*Системы координирующего управления; принцип разделения движений; отдельные каналы регулирования; контур регулирования соотношений; компенсация возмущений; автономизация.*

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 10-08-01139.

A.B. Filimonov, N.B. Filimonov

**CONCERNING THE PROBLEMS OF SYNTHESIS OF COORDINATED SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL**

*The problems of coordinated control is discussed. The method of synthesis of coordinated automatic systems is explained. The purpose of these systems is formed as the task of controlling relation between variables of state of multi-channel object or the group of objects. The task of coordination in the other formulation in comparison with the works of the founder of the given direction of L.M. Boychuk is researched. The processes of control are formed by means of two many-dimensional loops: the loop of assembly control by dynamics of object on the whole and the loop of regulation of intercoordinate relations. The autonomization of the given loop plays the key part in the suggested decisions. The processes of calculation of control contours are based on apparatus of transfer matrices.*

*Systems of coordinated control; principle of movement separation; separate channels of regulation; loop of regulation of relations; compensation of disturbances; autonomization.*

Специальный класс задач автоматического управления составляют задачи координации управляемых величин в автоматических системах. Системы координирующего управления (СКУ) широко применяются в различных областях техники и производства. Развитие технических средств автоматики, базирующееся на достижениях в области электроники, приборостроения, вычислительной техники и мехатроники, создает предпосылки для совершенствования автоматических систем различного типа, в том числе координирующих систем. Однако кроме этого необходима соответствующая теоретическая база, которая слабо развивалась в последнее двадцатилетие.

Цель настоящей работы – осветить проблемные аспекты координирующего управления и изложить ряд соображений авторов по методологии синтеза СКУ.

**Проблема координирующего управления.** Проблема координирующего управления имеет давнюю историю. Существенный вклад в ее исследование внесли работы М.Б. Игнатъева (1963), В.А. Романова (1964), Л.М. Бойчука (1969–1991) и др. отечественных ученых (см. обсуждение в [1–2]). В них показана важность проблемы синтеза систем координирующего управления (СКУ), а также широта и разнообразие сферы их применения.

Вкратце остановимся на базовых положениях координирующего управления, опираясь в основном на материалы работы Л.М. Бойчука [2].

Координация наряду со стабилизацией и следящим регулированием является одним из основных способов автоматического управления.

Под *координацией* переменных понимается автоматическое соблюдение заданных соотношений между ними в процессе функционирования системы.

Цель управления координирующего типа формулируется в виде задания регулируемых соотношений между переменными состояниями многоканального объекта или группы объектов. Сюда относятся задачи согласованного изменения регулируемых величин, стабилизации соотношений между переменными, синхронизации управляемых движений и т.п. Заданные соотношения между управляемыми переменными должны выполняться как в установившемся, так и переходном режимах.

Заметим, что близкое смысловое содержание вкладывают в понятия *функционального регулирования* [1, 4, 7] и *согласованного управления* [5, 6].

Координирующие системы можно разделить на два типа: технологические и траекторные [2].

Примеры *технологических* задач координирующего управления: регулирование отношения топливо-воздух в энергоустановках; регулирование частоты вращения исполнительных приводов в многодвигательных технологических линиях; синхронное управление агрегатами (например, электрическими генераторами,

включенными на общую сеть, электрическими двигателями, имеющими общую нагрузку, и т.д.); распределение нагрузок генераторов и двигателей; стабилизация зависимости между напряжением и током электродвигателя; автоматическое дозирование веществ (реагентов) в химических технологиях и др.

Примеры *траекторных* задач координирующего управления: программное управление станками (перемещения исполнительных органов в СЧПУ согласно форме обрабатываемой детали); управление движением объектов или группой объектов по пространственным траекториям; управление взаимоположением (строем) подвижных объектов; точное пространственное ориентирование многокомпонентных механических систем (например, элементов антенны радиотелескопа, кинематических звеньев робота и т.п.).

Отметим отличительные особенности предлагаемых в [2] решений.

Совокупность координируемых связей между выходными переменными объекта задает *координационное целевое многообразие* (КЦМ) в пространстве переменных. Задача координации заключается в локализации управляемой траектории движения на данном многообразии.

Функционирование СКУ подчинено двум связанным целям: отработке внешнего задающего воздействия и координации переменных. В связи с этим задача координирующего управления декомпозируется на две подзадачи, порождаемые указанными целями. Для их решения в [2] вектор управляющих переменных раскладывается на две компоненты – стабилизирующую и варьирующую: первая обуславливает движение к КЦМ, а вторая – движение по КЦМ в процессе отработки задания. При этом реализуется *принцип разделения движений* [3]: стабилизация КЦМ осуществляется в режиме «быстрых движений», а последующая отработка заданий по выходу осуществляется в режиме «медленных движений». Медленные движения для составного объекта интерпретируются как усредненная динамика образующих его простых объектов.

Согласно [2] синтезируемая СКУ включает два блока – *блок однотипных стандартных регуляторов* (ПИД-регуляторов) и *блок координирующих связей* (либо на входе, либо на выходе) блока регуляторов.

Еще одна ограничительная особенность предлагаемых решений в [2] – стационарность целевого установившегося режима.

В настоящей работе задача координации исследуется в иной постановке по сравнению с [2]. Во-первых, рассматриваются объекты управления общего вида, для которых предлагаемые в [2] проекционные преобразования вектора управления лишены смысла. Во-вторых, структура синтезируемой СКУ не является надстройкой над матрицей однотипных стандартных регуляторов. В-третьих, внешние задания для СКУ могут изменяться произвольным образом, т.е. рассматриваются процессы следящего регулирования. В-четвертых, процедуры расчета контуров регулирования базируются на аппарате передаточных матриц. В-пятых, принцип разделения движений реализуется схемами автономного регулирования.

**Структура СКУ.** Будем рассматривать задачу синтеза линейных стационарных СКУ.

Объект управления представлен уравнениями:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx}, \quad (2)$$

где  $t \geq 0$ ,  $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^r$  – вход,  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$  – состояние,  $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^m$  – управляемый выход  $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ ,  $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times r}$ ,  $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{m \times n}$  – постоянные коэффициентные матрицы системы.

Далее полагаем  $r \geq m > 1$ .

Координирующее управление подчинено двум целям. Главная цель – отработка внешнего задания – произвольных командных сигналов  $\mathbf{y}^*(t)$ :

$$\mathbf{y} \approx \mathbf{y}^*(t). \quad (3)$$

Подчиненная цель – соблюдение заданных соотношений между выходными переменными объекта:

$$\Phi_i(\mathbf{y}) = 0, \quad i = \overline{1, q}, \quad (4)$$

где  $\Phi_i(\mathbf{y})$  – некоторые функции, причем  $q < m$ . Эти функциональные связи будем именовать *регулируемыми соотношениями* (РС).

Отметим, что функции  $\Phi_i(\mathbf{y})$  можно трактовать как *инварианты* идеального процесса координирующего управления.

Если воспользоваться вектор-функцией

$$\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_q],$$

то равенства (4) переписутся в векторной форме:

$$\Phi(\mathbf{y}) = 0. \quad (5)$$

Введем также *вектор невязок* для регулируемых соотношений  $\xi \in \mathbf{R}^q$ :

$$\xi = \Phi(\mathbf{y}).$$

Тогда требованиям (5) отвечает координационная цель регулирования

$$\xi \approx \xi^* = 0. \quad (6)$$

Далее будем полагать, что вектор-функция  $\Phi(\mathbf{y})$  является линейной:

$$\Phi(\mathbf{y}) = \mathbf{Q}\mathbf{y}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^{q \times m}$ , причем  $\text{rank } \mathbf{Q} = q$ .

Итак, рассматриваемая задача управления складывается из двух взаимосвязанных подзадач – отработки командных сигналов и отработки регулируемых соотношений. Для решения этих подзадач будем формировать соответствующие многомерные контуры регулирования.

С этой целью вход и выход объекта расщепляются на две компоненты:

$$\mathbf{u} = \mathbf{H}_1 \mathbf{v} + \mathbf{H}_2 \boldsymbol{\eta}, \quad (8)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{P}\mathbf{y}, \quad (9)$$

$$\xi = \mathbf{Q}\mathbf{y}. \quad (10)$$

Здесь  $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^{r_1}$ ,  $\boldsymbol{\eta} \in \mathbf{R}^{r_2}$ ,  $\mathbf{z} \in \mathbf{R}^p$ ,  $\mathbf{H}_1 \in \mathbf{R}^{r \times r_1}$ ,  $\mathbf{H}_2 \in \mathbf{R}^{r \times r_2}$ ,  $\mathbf{P} \in \mathbf{R}^{p \times m}$ ,  $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^{q \times m}$ , причем,

$$m = p + q, \quad r = r_1 + r_2, \quad r_1 \geq m_1, \quad r_2 \geq m_2.$$

Посредством управляющего входа  $\boldsymbol{\eta}$  будем осуществлять координационную стабилизацию (6), а посредством управляющего входа  $\mathbf{v}$  – отработку задающих воздействий (3). Для этого формируются *сепаратные* каналы регулирования переменных  $\mathbf{z}$  и  $\xi$ .

Векторная переменная  $\mathbf{z}$  имеет меньшую размерность по сравнению с выходом  $\mathbf{y}$  ( $p < m$ ) и по отношению к нему играет роль управляемого *агрегата* (т.е. укрупненной информации о выходе), посредством которого замыкается контур регулирования выхода.

Двухканальную структуру управления воплощает схема СКУ, представленная на рис. 1. Здесь выделены канал *агрегатного управления* динамикой объекта в целом и канал *регулирования соотношений* между выходными переменными. Со-

ответствующие им управляющие блоки в структуре регулятора будем называть АУ-блоком и РС-блоком. Выделенные каналы образуют два многомерных контура управления: АУ-контур и РС-контур. Поскольку соотношения (4) должны устанавливаться и поддерживаться в процессе отработки командного сигнала (3), то второй контур должен быть более быстродействующим по сравнению с первым.

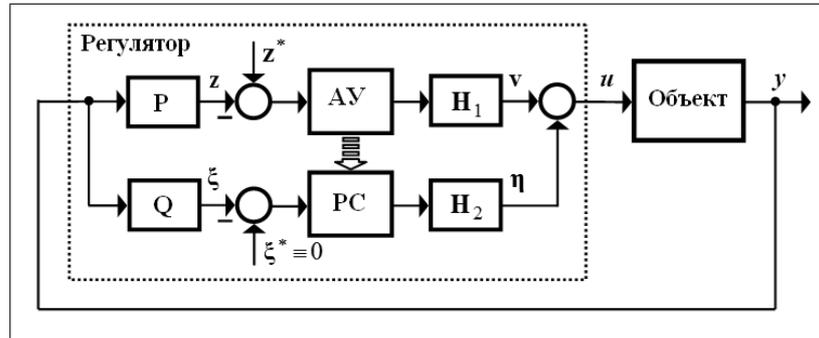


Рис. 1

**Формирование каналов регулирования.** Структура (рис. 1) сформированных каналов регулирования определяется матрицами  $\mathbf{H}_1$ ,  $\mathbf{H}_2$  и  $\mathbf{P}$ , при выборе которых необходимо соблюдение условий:

$$\text{rank}[\mathbf{H}_1 \mid \mathbf{H}_2] = r, \quad \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = m.$$

Построим матрицы  $\mathbf{G}_1 \in \mathbf{R}^{r_1 \times r}$ ,  $\mathbf{G}_2 \in \mathbf{R}^{r_2 \times r}$ ,  $\mathbf{L} \in \mathbf{R}^{m \times p}$ ,  $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{m \times q}$ , удовлетворяющие равенствам

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{G}_2 \end{bmatrix} [\mathbf{H}_1 \mid \mathbf{H}_2] = \mathbf{E}_r, \quad [\mathbf{L} \mid \mathbf{M}] \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{E}_m. \quad (11)$$

Здесь  $\mathbf{E}_k$  – единичная матрица  $k$ -го порядка.

В силу (8) – (11) выполняются соотношения

$$\mathbf{v} = \mathbf{G}_1 \mathbf{u}, \quad \boldsymbol{\eta} = \mathbf{G}_2 \mathbf{u}, \\ \mathbf{y} = \mathbf{Lz} + \mathbf{M}\boldsymbol{\xi}.$$

Из последнего равенства при выполнении условия (6) получаем

$$\mathbf{y} \cong \mathbf{Lz}.$$

Следовательно, регулируемый процесс  $\mathbf{z}(t)$  определяет реакцию выхода объекта  $\mathbf{y}(t)$ .

Задающее воздействие  $\mathbf{y}^*$  должно отвечать требованию (5), так что в соответствии с (7) будет выполняться условие

$$\mathbf{Qy}^* = 0.$$

Отсюда согласно (9) получаем задание для АУ-контура

$$\mathbf{z}^* = \mathbf{P}\mathbf{y}^*.$$

**Примечание.** Уравнения связей (4) определяют КЦМ. В линейном случае (7) это многообразие является гиперплоскостью. Целевое значение выхода должно подразумевать локализацию соответствующего целевого состояния объекта на

этой гиперплоскости, так что в процессе координирующего управления траектория движения объекта должна притягиваться к ней.

**Автономизация РС-контура.** Основная идея предлагаемого метода синтеза СКУ заключается в *автономизации* РС-контура по отношению к АУ-контур, для воплощения которой могут использоваться точная или приближенная компенсация возмущений, либо схемы больших коэффициентов усиления.

Для описания процессов управления прибежем к формализму операционного исчисления. Условимся буквенные обозначения оригиналов переносить на их лаплас-образы. Далее  $S$  – комплексная частота.

Построенные сепаратные каналы регулирования в предположении нулевых начальных условий описываются уравнениями

$$\mathbf{z}(s) = \mathbf{W}_{zv}(s)\mathbf{v}(s) + \mathbf{W}_{z\eta}(s)\boldsymbol{\eta}(s), \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\xi}(s) = \mathbf{W}_{\xi v}(s)\mathbf{v}(s) + \mathbf{W}_{\xi\eta}(s)\boldsymbol{\eta}(s). \quad (13)$$

Здесь лаплас-образы выходных сигналов  $\mathbf{z}(s)$  и  $\boldsymbol{\xi}(s)$  выражены через лаплас-образы входных сигналов  $\mathbf{v}(s)$  и  $\boldsymbol{\eta}(s)$ . Передаточные матрицы объекта  $\mathbf{W}_{zv}(s)$ ,  $\mathbf{W}_{z\eta}(s)$ ,  $\mathbf{W}_{\xi v}(s)$ ,  $\mathbf{W}_{\xi\eta}(s)$  в соответствии с (1), (2), (8)-(10) равны

$$\mathbf{W}_{zv}(s) = \mathbf{PC}(\mathbf{E}_n s - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \mathbf{H}_1, \quad \mathbf{W}_{z\eta}(s) = \mathbf{PC}(\mathbf{E}_n s - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \mathbf{H}_2,$$

$$\mathbf{W}_{\xi v}(s) = \mathbf{QC}(\mathbf{E}_n s - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \mathbf{H}_1, \quad \mathbf{W}_{\xi\eta}(s) = \mathbf{QC}(\mathbf{E}_n s - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \mathbf{H}_2.$$

Пусть блоки АУ- и РС-регулятора реализуют законы управления

$$\mathbf{v}(s) = \mathbf{R}_1(s)(\mathbf{z}^* - \mathbf{z}(s)), \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\eta}(s) = \mathbf{R}_2(s)(\boldsymbol{\xi}^* - \boldsymbol{\xi}(s)) + \mathbf{R}_{21}(s)\mathbf{v}(s). \quad (15)$$

Таким образом, этими блоками формируются регулирующие обратные связи, описываемые передаточными матрицами  $\mathbf{R}_1(s)$  и  $\mathbf{R}_2(s)$ . Кроме этого в РС-блоке предусмотрена цепь компенсации влияния АУ-контура на РС-контур – ее действие определяется вторым слагаемым в (15), т.е. описывается передаточной матрицей  $\mathbf{R}_{21}(s)$ .

Подстановка (14), (15) в (12), (13) дает уравнения для рассматриваемых контуров регулирования:

$$\begin{aligned} (\mathbf{E}_p + \mathbf{W}_{zv}(s)\mathbf{R}_1(s))\mathbf{z}(s) &= \mathbf{W}_{zv}(s)\mathbf{R}_1(s)\mathbf{z}^*(s) + \boldsymbol{\psi}_1(s), \\ (\mathbf{E}_q + \mathbf{W}_{\xi\eta}(s)\mathbf{R}_2(s))\boldsymbol{\xi}(s) &= \mathbf{W}_{\xi\eta}(s)\mathbf{R}_2(s)\boldsymbol{\xi}^*(s) + \boldsymbol{\psi}_2(s), \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_1(s) &= \mathbf{W}_{z\eta}(s)\boldsymbol{\eta}(s), \\ \boldsymbol{\psi}_2(s) &= (\mathbf{W}_{\xi v}(s) + \mathbf{W}_{\xi\eta}(s)\mathbf{R}_{21}(s))\mathbf{v}(s). \end{aligned} \quad (17)$$

Функции  $\boldsymbol{\psi}_1(s)$  и  $\boldsymbol{\psi}_2(s)$  описывают взаимовлияние контуров регулирования.

Процессы регулирования в контурах определяются выбором передаточных матриц  $\mathbf{R}_1(s)$ ,  $\mathbf{R}_2(s)$  и  $\mathbf{R}_{21}(s)$ .

Если  $\mathbf{R}_{21}(s)$  обеспечивает равенство

$$\mathbf{W}_{\xi v}(s) + \mathbf{W}_{\xi\eta}(s)\mathbf{R}_{21}(s) = 0, \quad (18)$$

то согласно (17) будет осуществляться полная компенсация возмущений РС-контура:

$$\Psi_2(s) \equiv 0.$$

Однако обращение или псевдообращение рациональной матрицы  $\mathbf{W}_{\xi\eta}(s)$  для достижения условия (18) порождает две проблемы: во-первых, это физическая нереализуемость компенсационных цепей РС-блока и, во-вторых, трансформация правых передаточных нулей матрицы  $\mathbf{W}_{\xi\eta}(s)$  в неустойчивые полюса в данных цепях.

Другой способ автономизации РС-контура основан на включении в него больших коэффициентов усиления, посредством чего удастся его возмущения со стороны АУ-контура ослабить до приемлемого уровня. Поясним это соображение.

Из (16) получаем

$$\xi(s) = \mathbf{W}_{\xi\xi^*}(s)\xi^*(s) + \mathbf{W}_{\xi\Psi_2}(s)\Psi_2(s), \quad (19)$$

где

$$\mathbf{W}_{\xi\xi^*}(s) = (\mathbf{E}_q + \mathbf{W}_{\xi\eta}(s)\mathbf{R}_2(s))^{-1}\mathbf{W}_{\xi\eta}(s)\mathbf{R}_2(s),$$

$$\mathbf{W}_{\xi\Psi_2}(s) = (\mathbf{E}_q + \mathbf{W}_{\xi\eta}(s)\mathbf{R}_2(s))^{-1}.$$

Согласно (19) уровень возмущения регулируемого процесса  $\xi(t)$  в результате воздействия  $\Psi_2(t)$  можно определить нормой передаточной матрицы  $\mathbf{W}_{\xi\Psi_2}(s)$  в пространстве Харди  $H_\infty$  [8]. Эта норма будет уменьшаться в результате увеличения коэффициентов передачи в структуре передаточной матрицы  $\mathbf{R}_2(s)$  РС-блока.

Поскольку в результате настройки регулятора РС-контур должен быть существенно более быстродействующим по сравнению с АУ-контуром, то это требование хорошо согласуется с механизмом больших коэффициентов усиления. При синтезе данных контуров может также использоваться методология модального управления.

**Пример.** Обратимся к примеру из [2. С. 29]. Положим:  $m=n=r=2$  и объект описывается уравнениями

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ 3 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{x}.$$

В процессе регулирования необходимо поддерживать соотношение между выходными переменными:  $x_1/x_2 = 2$ . Ему отвечает линейное РС

$$\Phi(y_1, y_2) = y_1 - 2y_2 = 0.$$

Введем невязку РС:

$$\xi = y_1 - 2y_2.$$

В качестве агрегата выхода возьмем среднюю арифметическую выходных переменных:

$$z = (y_1 + y_2)/2. \quad (20)$$

Пологая  $v = u_2$ ,  $\eta = u_1$ , получим уравнения каналов регулирования

$$\dot{z} = -1,5v + 2\eta, \quad \dot{\xi} = -5\eta.$$

Выберем следующие передаточные функции регулятора:

$$R_1(s) = -\frac{8}{3}\left(1 + \frac{1}{s}\right), \quad R_2(s) = -3, \quad R_{21}(s) = 0.$$

В итоге автономность РС-контура будет обеспечена без дополнительных ухищрений, причем полюсы АУ- и РС-контуров соответственно равны  $\{-2, -2\}$  и  $-15$ , т.е. существенно разнятся величиной затухания.

На рис. 2 представлены переходные процессы в СКУ для начального состояния объекта

$$\mathbf{x}(0) = \text{col}(0, 2)$$

и задания

$$\mathbf{y}^* = \text{col}(2, 1). \quad (21)$$

Согласно (20) и (21), уставка для РС-контура равна  $z^* = 1,5$ .

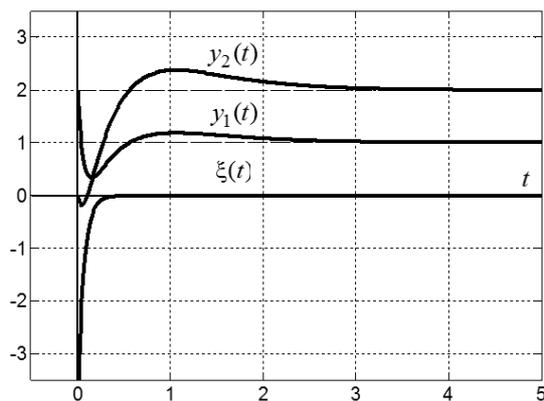


Рис. 2

На рис. 3 представлена соответствующая траектория процесса регулирования в пространстве выходных переменных.

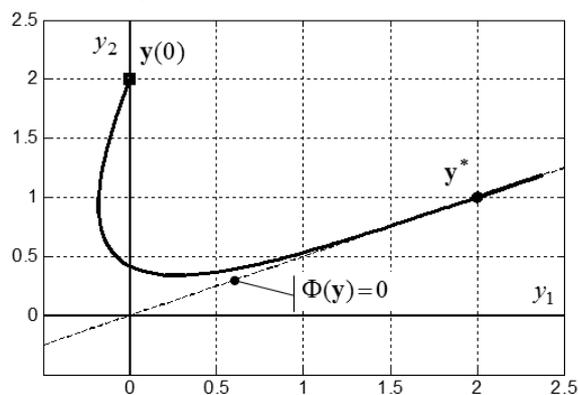


Рис. 3

Рис. 4 иллюстрирует обработку СКУ командного сигнала (его скалярные компоненты представлены пунктиром на рисунке)

$$\mathbf{y}^* = (y_1^*, y_2^*) = \text{col}(2, 1)(1,5 + 0,5 \sin(2\pi t / 10))$$

при нулевых начальных условиях.

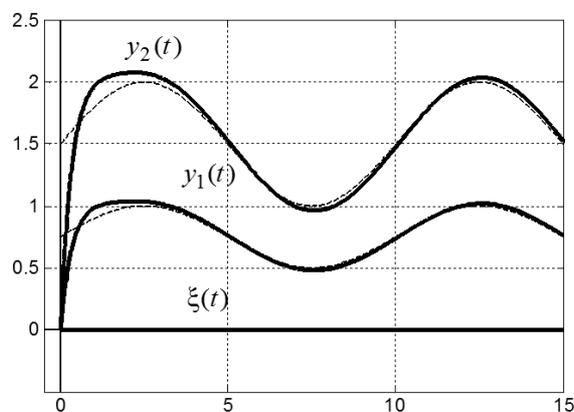


Рис. 4

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза систем функционального регулирования одного класса // Автоматика. – 1969. – № 4. – С. 41-48.
2. Бойчук Л.М. Синтез координирующих систем автоматического управления. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
3. Геращенко Е.И., Геращенко С.М. Метод разделения движений и оптимизация нелинейных систем. – М.: Наука, 1975. – 296 с.
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
5. Мирошник, И. В. Согласованное управление многоканальными системами. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 127 с.
6. Мирошник И.В., Ушаков А.В. Синтез алгоритма синхронного управления квазиднотипных объектов // Автоматика и телемеханика. – 1977. – № 11. – С. 22-29.
7. Пухов Г.Е., Жук К.Д. Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов. – Киев: Наукова думка, 1966. – 218 с.
8. Francis B.A. A Course in in H-infinity Control Theory. Lecture Notes in Control and Information Science. Berlin: Springer-Verlag, 1987. – Vol. 88. – 155 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Ф. Чебурахин.

**Филимонов Александр Борисович** – Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; e-mail: filimon\_ab@mail.ru; 101990, г. Москва, М. Харитоньевский пер., 4; тел.: 84991353534; факс: 84991353256; г.н.с.; д.т.н.; профессор.

**Филимонов Николай Борисович** – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; e-mail: nbfilimonov@mail.ru; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65; тел.: 84992695510; факс: 84992695510; главный научный сотрудник; д.т.н.; профессор.

**Filimonov Aleksandr Borisovich** – A.A. Blagonravov Mechanical Engineering Institute RAS; e-mail: filimon\_ab@mail.ru; 4, M. Khariton'evskii per., Moscow, 101990, Russia; phone: +74991353534; fax: +74991353256; dr.of eng. sc.; high sc. exp; professor.

**Filimonov Nikolaj Borisovich** – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences; e-mail: nbfilimonov@mail.ru; 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; phone: +74992695510; fax: +74992695510; dr.of eng. sc.; high sc. exp; professor.