

Математическое обеспечение АСУ

С.С. МИХАЛЕВИЧ,
С.А. БАЙДАЛИ,
Ю.А. ЧУРСИН
(ФГБОУ ВПО НИ ТПУ)

S.S. MIHALEVICH,
S.A. BAYDALI,
Y.A. CHURSIN

Моделирование систем автоматического управления методом пространства состояний

В статье представлен математический аппарат, позволяющий моделировать методом пространства состояний линейные динамические системы, представляемые в виде произвольных комбинаций динамических звеньев. Описан метод моделирования системы автоматического управления методом пространства состояний. Проведена верификация разработанного математического аппарата и доказана возможность его применения для одноконтурных систем автоматического управления наравне с современными пакетами математического моделирования.

Ключевые слова: система автоматического управления, моделирование, пространство состояний.

Введение

На протяжении длительного времени в области автоматического управления уделяется большое внимание описанию динамических систем методами пространства состояний. Аналогичную тенденцию можно наблюдать и в других областях применения теории систем. Методы управления, основанные на частотном анализе, алгебре передаточных функций, преобразовании Лапласа и z -преобразовании, которые можно считать классическими, играют значительную роль в развитии и применении теории управления и в различных областях автоматизации. Вследствие их простоты и ясной связи с физической реальностью они, видимому, и в будущем сохранят свое место среди современных методов описания динамических систем. Однако классические методы не могут сохранить свои позиции при решении задач многомерных и сложных систем, где они часто оказываются несостоятельными исключительно из-за вычислительных трудностей, так как методы пространства состояний позволяют осуществить четкую формализацию и автоматизацию вычислительных процедур [1].

Из преимуществ метода пространства состояний следует отметить единую формулировку и возможность простого решения задач управления в многомерных системах, задач асинхронного и периодического повторения.

Описание систем в пространстве состояний позволяет обнаружить и исследовать такие свойства, которые

Simulate the Automatic Control System with State Space Method

There is the mathematical description of the state space method for linear dynamic systems, which appear as random combinations of dynamic elements. Authors described the procedure for compiling the system description in state space. The process of verification developed mathematical description was shown and ability of apply this approach for automatic control single-loop systems were proved.

Keywords: regulator, state space, automatic control system, object.

при использовании классических методов частотного анализа и описания в терминах "вход-выход" остались бы скрытыми. Матричная форма записи, применяемая в методе пространства состояний, имеет неоспоримое преимущество при численном решении, а ясность математических формулировок и самих решений не ухудшается даже для многомерных систем, описывающих поведение сложных производственных комплексов [2].

Движение системы в пространстве состояний отражает изменение всех ее состояний во времени. Благодаря данному свойству, работу системы можно анализировать не только по состоянию вход-выход, но и по изменению отдельных состояний.

Для описания поведения объекта в пространстве состояний создается модель динамической системы, включающая набор переменных входа, выхода и состояния, связанных между собой дифференциальными уравнениями первого порядка, которые записываются в матричной форме. В отличие от описания в виде передаточной функции и других методов, область применения метода пространства состояний не ограничена только линейными системами [3] и нулевыми начальными условиями.

В статье представлен математический аппарат метода пространства состояний и приведена последовательность математического представления дифференциальных уравнений, описывающих движение объекта, а также этапы программной реализации полученного математического аппарата для исследования конкретной системы управления.

Метод пространства состояний позволяет представлять систему управления в виде схемы, приведенной на рисунке 1, и системы уравнений [1]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot u(t), \\ y(t) = C(t) \cdot x(t) + D(t) \cdot u(t), \end{cases} \quad (1)$$

где: $x(t)$ – вектор состояния; $y(t)$ – вектор выхода; $u(t)$ – вектор управления; $A(t)$ – матрица системы; $B(t)$ – матрица управления; $C(t)$ – матрица выхода; $D(t)$ – матрица прямой связи.

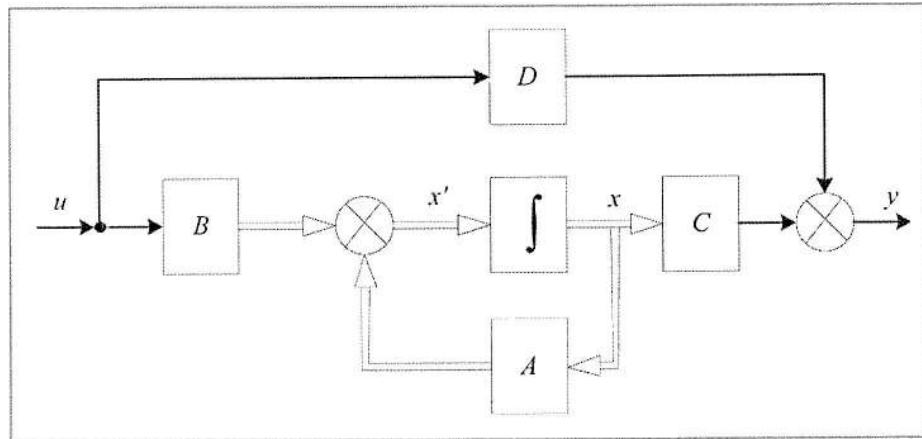


Рис. 1. Структурная схема линейной системы

Рассмотрим линейную систему с постоянными параметрами, одним входом и одним выходом, представляемую в виде [4, 5]:

$$\begin{aligned} & (p^n + \alpha_{n-1}p^{n-1} + \dots + \alpha_1 p + \alpha_0)y = \\ & = (\beta_n p^n + \beta_{n-1}p^{n-1} + \dots + \beta_1 p + \beta_0)u, \end{aligned} \quad (2)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования.

В качестве переменных состояния выбираются, как правило, выходы интеграторов (переменная x на рис. 1). Тогда матрицы A , B , C , D уравнения (1) определяются из выражений [1]:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\alpha_0 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots & -\alpha_{n-1} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} D \\ B \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{n-1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{n-2} & \alpha_{n-1} & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \alpha_0 & \alpha_1 & \dots & \alpha_{n-1} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \beta_n \\ \beta_{n-1} \\ \beta_{n-2} \\ \vdots \\ \beta_0 \end{bmatrix}, \quad (3) \\ C &= [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0], \\ D &= b_0 = \beta_n. \end{aligned}$$

Приведенные уравнения состояния (3) соответствуют, так называемому, стандартному виду системы [1].

Зачастую, составляющие систему управления объекты, представлены в виде динамических звеньев, описываемых дифференциальными уравнениями или передаточными функциями, содержащими запаздывание.

На практике, звено, содержащее запаздывание, можно разделить на два: звено запаздывания и звено, описываемое дифференциальным уравнением или передаточной функцией без запаздывания. Для расчета звена запаздывания была использована аппроксимация Паде.

В случае разложения функции вида e^z данная процедура может быть выражена следующим образом [6]:

$$\begin{aligned} R_{rq}(z) &= D_{rq}(z)^{-1} N_{rq}(z), \\ N_{rq}(z) &= \sum_{k=0}^r \frac{(r+q-k)! p!}{(r+q)! k! (r-k)!} z^k, \\ D_{rq}(z) &= \sum_{k=0}^q \frac{(r+q-k)! q!}{(r+q)! k! (r-k)!} (-z)^k. \end{aligned}$$

где r и q – порядки разложения. Следует отметить, что при $q = 0$, функции R_{rq} и N_{rq} представляют собой ряд Тейлора порядка r .

Соединение звеньев системы

В зависимости от способа получения требуемых характеристик и технической реализации звенья, из которых состоит система, могут быть соединены в различные комбинации. Самым употребляемым и широко известным методом представления системы управления является представление в виде структурной схемы, представляющей собой графическое отображение математической модели. В любой структурной схеме всегда можно выделить три типовых соединения звеньев: параллельное; последовательное; соединение с обратной связью. В отличие от соединения с обратной связью, параллельное и последовательное соединения звеньев подробно рассмотрены в литературе [7].

На рисунке 2 представлено параллельное соединение подсистем S_i ($i = 1, 2$), которые описываются уравнениями состояния:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i(t) \cdot x_i(t) + B_i(t) \cdot u_i(t), \\ y_i(t) = C_i(t) \cdot x_i(t) + D_i(t) \cdot u_i(t). \end{cases}$$

Матрицы $A_i(t)$, $B_i(t)$, $C_i(t)$ имеют размеры, соответственно, $n_i \times n_i$, $n_i \times m_i$, $l_i \times m_i$. Тогда при объединении систем S_1 и S_2 в общее уравнение (1) получим [7]:

ответствующим звеньевым связями
издывания уравнений функция. Для выявления троекси-

и функционально-следую-

$\frac{1}{j!} z^k$,
 $\frac{1}{(-z)^k}$.

метить, г собой

буемых ния, из-за в раз- широко правле- схемы, вложение в схеме звено- ся с обратной связью . соединения уравнений

ответственности

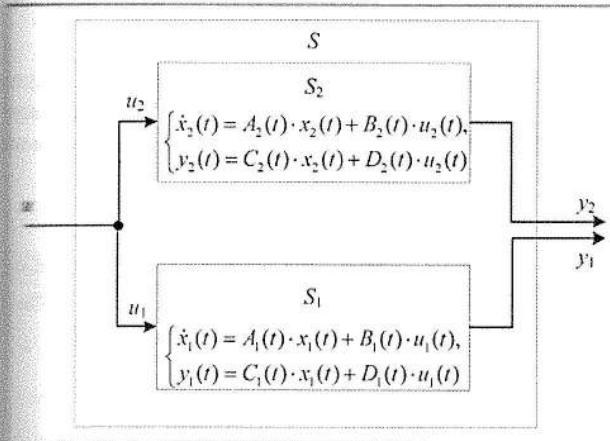


Рис. 2. Параллельное соединение подсистем

$$\begin{aligned} A(t) &= \begin{bmatrix} A_1(t) & 0_{n_1 \times n_2} \\ 0_{n_2 \times n_1} & A_2(t) \end{bmatrix}, & B(t) &= \begin{bmatrix} B_1(t) & 0_{n_2 \times m_1} \\ 0_{n_1 \times m_2} & B_2(t) \end{bmatrix}, \\ C(t) &= \begin{bmatrix} C_1(t) & 0_{l_1 \times n_1} \\ 0_{l_2 \times n_2} & C_2(t) \end{bmatrix}, & D(t) &= D_1 + D_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Для реализации последовательного соединения подсистем рассмотрим систему \$S\$. Пусть входом системы \$S\$ является вход подсистемы \$S_1\$, \$u(t) \equiv u_1(t)\$; выходом системы \$S_1\$ является выходом подсистемы \$S_2\$, \$y(t) \equiv y_2(t)\$ и выходом какой подсистемы \$S_1\$ поступает на вход подсистемы \$S_2\$ то что их размерности совпадают, \$l_1 = m_2\$ и \$u_2(t) = y_1(t)\$ размерности матриц \$A_i(t)\$, \$B_i(t)\$, \$C_i(t)\$ равны, соответственно, \$n_i \times n_i\$, \$n_i \times m_i\$, \$l_i \times m_i\$.

Тогда при сведении уравнений к общему уравнению состояния (1) получим [7]:

$$\begin{aligned} A(t) &= \begin{bmatrix} A_1(t) & 0_{n_1 \times n_2} \\ B_2(t) \cdot C_1(t) & A_2(t) \end{bmatrix}, & B(t) &= \begin{bmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \cdot D_1(t) \end{bmatrix}, \\ C(t) &= [D_2(t) \cdot C_1(t) \quad C_2(t)], & D(t) &= D_1(t) \cdot D_2(t). \end{aligned} \quad (5)$$

В литературе имеется описание для случаев соединения систем с обратной связью [7, 8], но оно не является полным, т. к. не учитывается прямая связь входа системы с его выходом. Иными словами, во втором

уравнении системы (1) отсутствует второе слагаемое, что может привести к недостоверному результату. Для устранения данного недостатка, система с обратной связью, структура которой показана на рисунке 3, была представлена в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= A_1(t) \cdot x_1(t) + B_1(t) \cdot (u(t) \pm y_2(t)), \\ y_1(t) &= C_1(t) \cdot x_1(t) + D_1(t) \cdot (u(t) \pm y_2(t)), \\ \dot{x}_2(t) &= A_2(t) \cdot x_2(t) + B_2(t) \cdot y_1(t), \\ y_2(t) &= C_2(t) \cdot x_2(t) + D_2(t) \cdot y_1(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Пусть подсистемы \$S_1\$ и \$S_2\$ соединены обратной связью (размерности матриц \$A_i(t)\$, \$B_i(t)\$, \$C_i(t)\$ подсистем \$S_1\$ и \$S_2\$ равны, соответственно, \$n_i \times n_i\$, \$n_i \times m_i\$, \$l_i \times m_i\$), т. е. выход подсистемы \$S_2\$ суммируется (или вычитается) с входом всей системы \$S\$ и поступает на вход подсистемы \$S_1\$. В качестве выхода системы \$S\$ был использован выход подсистемы \$S_1\$. При этом считалось, что \$m_1 = l_2\$, \$m_2 = l_1\$, \$m = m_1\$, \$l = l_2\$, \$n = n_1 + n_2\$, \$u_i(t) = u(t) \pm y_2(t)\$, \$u_2(t) = y_1(t)\$.

Подставив выражение \$y_1(t)\$ системы (6) в последнее уравнение этой же системы, и разрешив его относительно \$y_2(t)\$, получим:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= A_1(t) \cdot x_1(t) + B_1(t) \cdot u(t) \pm \left(\frac{B_1(t) \cdot C_2(t) \cdot x_2(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{B_1(t) \cdot D_2(t) \cdot C_1(t) \cdot x_1(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} + \frac{B_1(t) \cdot D_1(t) \cdot D_2(t) \cdot u(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} \right), \\ y_1(t) &= C_1(t) \cdot x_1(t) + D_1(t) \cdot u(t) \pm \left(\frac{D_1(t) \cdot C_2(t) \cdot x_2(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{D_1(t) \cdot D_2(t) \cdot C_1(t) \cdot x_1(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} + \frac{D_1^2(t) \cdot D_2(t) \cdot u(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} \right), \\ \dot{x}_2(t) &= A_2(t) \cdot x_2(t) + B_2(t) \cdot C_1(t) \cdot x_1(t) + B_2(t) \cdot D_1(t) \cdot u(t) \pm \\ &\quad \pm \left(\frac{B_2(t) \cdot D_1(t) \cdot C_1(t) \cdot x_1(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} + \frac{B_2(t) \cdot D_1(t) \cdot D_2(t) \cdot C_1(t) \cdot x_1(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{B_2(t) \cdot D_1^2(t) \cdot D_2(t) \cdot u(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} \right), \\ y_2(t) &= \frac{C_2(t) \cdot x_2(t) + D_2(t) \cdot C_1(t) \cdot x_1(t) + D_2(t) \cdot D_1(t) \cdot u(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)}. \end{aligned} \quad (7)$$

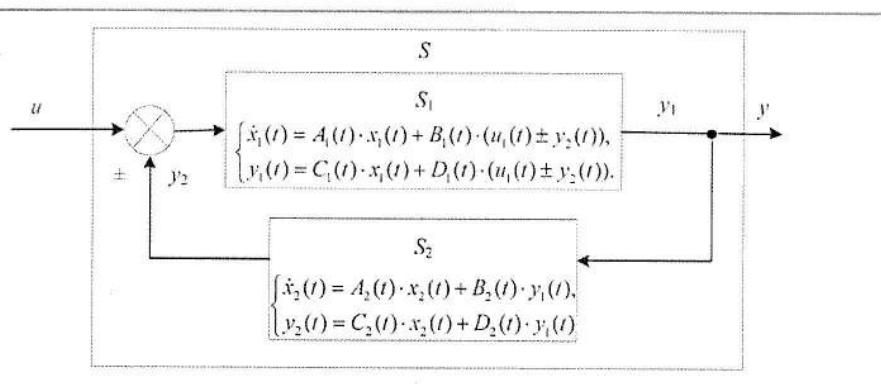


Рис. 3. Соединение с обратной связью

Тогда после сведения уравнений (7) к общему уравнению состояния (1) имеем:

$$A(t) = \begin{bmatrix} A_1(t) \pm \frac{B_1(t) \cdot D_2(t) \cdot C_1(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} & \pm \frac{B_1(t) \cdot C_2(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} \\ B_2(t) \cdot C_1(t) \pm \frac{B_2(t) \cdot D_1(t) \cdot D_2(t) \cdot C_1(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} & A_2(t) \pm \frac{B_2(t) \cdot D_1(t) \cdot C_2(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} \end{bmatrix},$$

$$B(t) = \begin{bmatrix} B_1(t) \pm \frac{B_1(t) \cdot D_1(t) \cdot D_2(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} \\ B_2(t) \cdot D_1(t) \pm \frac{B_2(t) \cdot D_1(t) \cdot D_1(t) \cdot D_2(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} \end{bmatrix},$$

$$C(t) = \begin{bmatrix} C_1(t) \pm \frac{D_1(t) \cdot D_2(t) \cdot C_1(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} & \pm \frac{D_1(t) \cdot C_2(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)} \end{bmatrix},$$

$$D(t) = D_1(t) \pm \frac{D_1(t) \cdot D_1(t) \cdot D_2(t)}{1 \mp D_1(t) \cdot D_2(t)}. \quad (8)$$

Далее, если представить функцию (9) в виде (1), то по формулам (3) можно получить матрицы A, B, C, D :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -N \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -Kr \cdot Td \cdot N^2 + Kr \\ Kr \cdot Td \cdot N^3 \end{bmatrix}.$$

$$C = [1 \ 0], \quad D = Kr \cdot Td \cdot N + Kr.$$

Моделирование ПИД регулятора

Неотъемлемой частью системы управления является регулятор. В системах управления уже долгое время находят применение линейные законы управления. Наиболее известен ПИД закон (пропорционально-интегрально-дифференциальный закон) регулирования.

Ввиду невозможности реализации идеального дифференцирования, в том числе с применением численных методов, ПИД регулятор моделировался в виде, представленном на рисунке 4 [4, 7]. В данном представлении для осуществления дифференцирования, близкого к идеальному, необходимо обеспечить порядок цифрового фильтра (N) равным бесконечности.

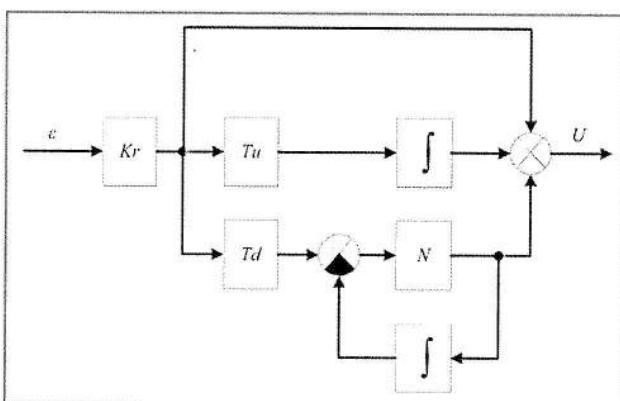


Рис. 4. Структурная схема ПИД регулятора: ε – сигнал рассогласования; U – управляющее воздействие; Kr – коэффициент пропорциональности; Tu – время изодрома, с; Td – время предварения, с; N – порядок цифрового фильтра

Схема, представленная на рисунке 4, соответствует передаточной функции вида:

$$W_{per}(s) = \frac{(Kr \cdot Td \cdot N + Kr)s^2 + (Kr \cdot N + \frac{Kr}{Tu})s + \frac{Kr \cdot N}{Tu}}{s^2 + Ns}. \quad (9)$$

Следует отметить, что зная методику представления ПИД регулятора, можно составить уравнения как для простых П и И законов регулирования, так и для ПИ, ПДД и других широко используемых линейных законов.

Исследование системы

Для проверки приведенного математического аппарата представления и исследования объектов и систем управления методом пространства состояний была рассмотрена система, структурная схема которой представлена на рисунке 5.

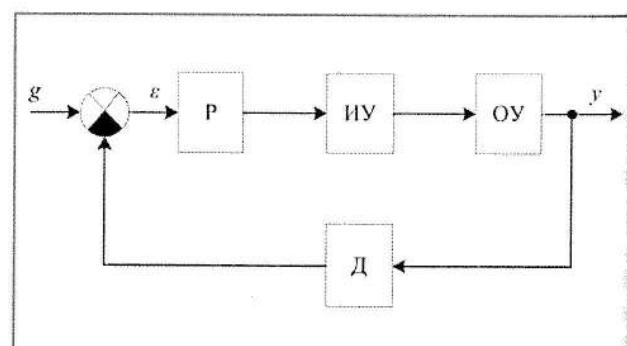


Рис. 5. Структурная схема системы: ε – сигнал рассогласования; g – задающее воздействие; u – выход объекта управления; P – регулятор; ИУ – исполнительное устройство; ОУ – объект управления; D – датчик

Было разработано специальное программное обеспечение (ПО), выполняющее моделирование системы, представленной на рисунке 5, на основе расчетов, приведенных в разделах 1–3. Для сходящейся системы итоговые матрицы системы, управления, выхода и матрица прямой связи (в случае подсистемы, представленной на рисунке 5, это просто число) примут вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -8,3 \cdot 10^{-4} & -0,0583 & 0,0083 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -5 \cdot 10^{-4} & 0,06 & 0,01 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,01 & 0 & 1,1 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & -0,033 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -4,5 & 0 & 0,0495 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 4,44 & 0 & -0,0488 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -3,195 & 0 & 0,0351 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0094 & -0,0945 & -0,42 & -1,05 & -1,5 & 1,7559 & 0 & -0,0193 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -100 & -10 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1,1 \cdot 10^{-4} \\ 0,033 \\ -0,495 \\ 0,0488 \\ -0,0351 \\ 0,0193 \\ -0,1 \\ 10 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], D = 0.$$

Для проверки адекватности результатов, полученных при помощи разработанного ПО, была разработана система в пакете MATLAB и его расширении Simulink (рис. 6). Модель состоит из ПИД регулятора 1, блока управления 2 ($\tau = 20$ с), двух последовательно включенных объектов, описываемых инерционными звеньями второго порядка (в качестве первого объекта

выступает модель исполнительного устройства 3, второго – модель объекта управления 4) и инерционного звена первого порядка с единичным коэффициентом передачи в отрицательной обратной связи 5.

Результатом расчетов являются два переходных процесса (рис. 7) с различными параметрами настройки ПИД регулятора. В расходящейся системе коэффициент

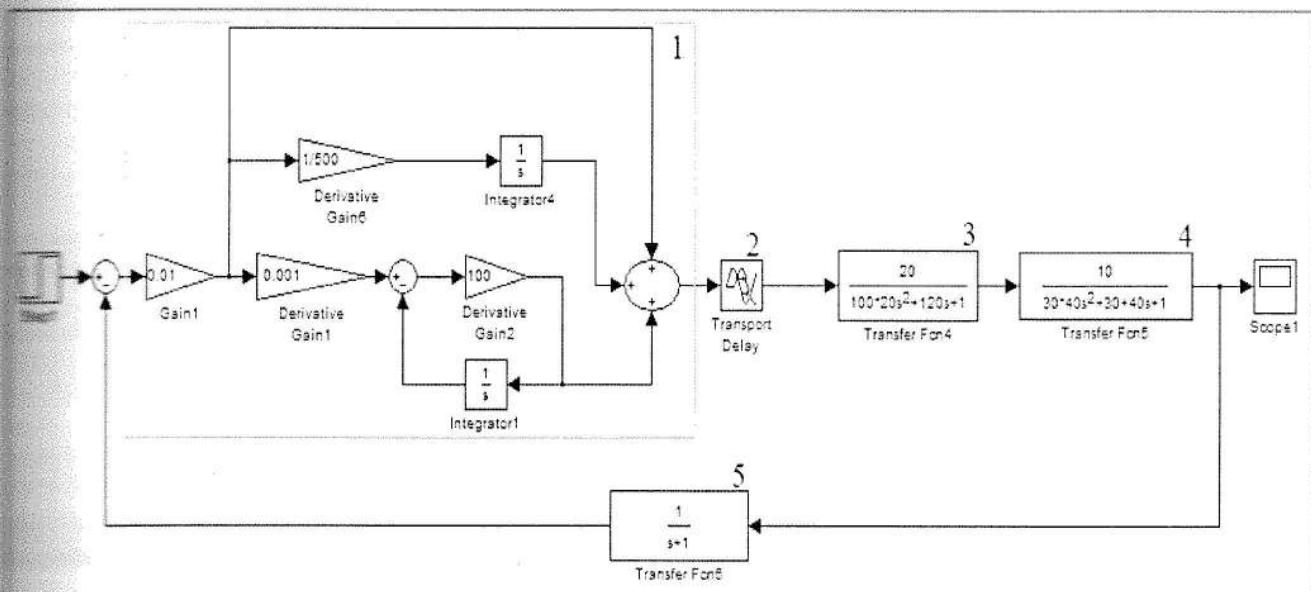


Рис. 6. Вид реализованной в пакете MATLAB/Simulink сходящейся модели

передачи регулятора и время изодрома те же (рис. 6), а время предварения больше в 10 раз. Данный эксперимент был проведен с целью демонстрирования возможности исследования системы в различных режимах работы.

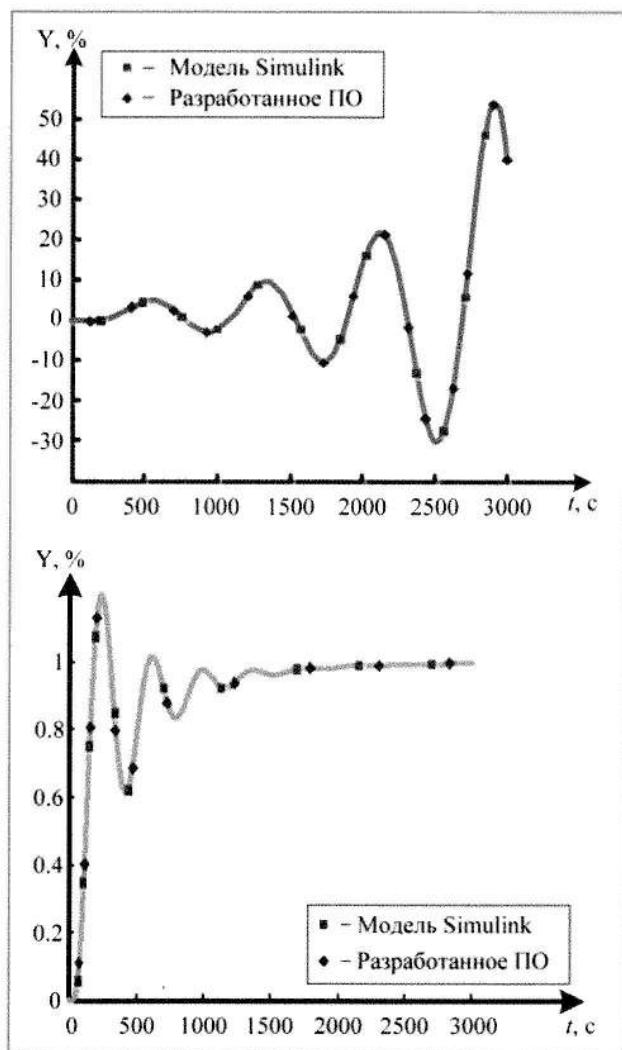


Рис. 7. Сравнение результатов моделирования на разработанном ПО и модели Simulink

Полученное среднеквадратическое отклонение выхода объекта незначительно (менее 0,1 %). Наличие погрешности в данном случае обусловлено различием методов численного интегрирования.

Таким образом, показано, что метод пространства состояний позволяет описывать как сходящиеся, так и расходящиеся процессы в системах управления, и, несомненно, служит мощным инструментом при исследовании и анализе САУ.

Заключение

В результате работы разработан математический аппарат и программное обеспечение, позволяющее моделировать методом пространства состояний линейные динамические системы, представляемые в виде произвольных комбинаций динамических звеньев,

описанных в статье. Проведена верификация модели системы, построенной на основе математических выражений, представленных в статье, с моделью, реализованной в одном из наиболее популярных пакетов моделирования – MATLAB/Simulink. Среднеквадратическое отклонение полученных результатов составило менее 0,1 %, что говорит о состоятельности приведенного математического аппарата и возможности его использования для моделирования САУ, не прибегая к дорогостоящему программному обеспечению. Составлен порядок описания системы методом пространства состояний:

- каждое звено представить в виде дифференциального уравнения (2);
- получить системы уравнений пространства состояний для каждого звена, т. е. используя формулы (3), представить каждое звено в виде (1);
- произвести соединение подсистем: используя формулы (4), (5), (8), получить полное уравнение системы в пространстве состояний (в случае линейных систем управления, обязательно с нулевыми начальными условиями).

Результаты работы планируется использовать в дальнейших исследованиях, посвященных автоматическому синтезу и анализу систем управления.

Работа выполнена в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

Список литературы

1. Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч. Пространство состояний в теории управления (для инженеров). – М.: Наука, 1970.
2. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / Перевод с англ. под редакцией Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1985.
3. Vincent Verdult. Nonlinear System Identification: A State-Space Approach, Twente University Press, Enschede, 2002.
4. Дядик В.Ф., Байдали С.А., Криницын Н.С. Теория автоматического управления: учебное пособие.– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011.
5. Ротач В.Я. Теория автоматического управления.– М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
6. Golub G. H. and Van C. F. Loan Matrix Computations, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1989.
7. Андреевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 2000.
8. Bakshi U.A., Bakshi M.V. Modern control theory, Technical Publications Pune, 2008.

Сергей Сергеевич Михайлович – инженер-программист,
Сергей Анатольевич Байдали – канд. техн. наук, доцент
e-mail: basab@tut.ru
Юрий Александрович Чирин – канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «Томский государственный политехнический
Томский политехнический университет»