

Научная статья
УДК 681.51
doi: 10.34822/1999-7604-2022-4-59-68

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ ДЛЯ ОБОБЩЕННОЙ СИСТЕМЫ ТИПА «ОДИН ВХОД – ОДИН ВЫХОД»

Инна Васильевна Музылева^{1✉}, Любовь Николаевна Языкова²,
Виктор Николаевич Мещеряков³

^{1, 2, 3} Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

¹ lstu-miv2010@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-5958-5144>

² yaln29@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6035-5263>

³ mesherek@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>

Аннотация. Объектом исследования являются аналитические и топологические методы расчета систем автоматического управления. Целью работы является построение практико-ориентированного способа применения метода пространства состояний раздела неметрической математики для исследования систем типа «один вход – один выход». Исследована обобщенная система n -го порядка в виде «вход – выход», разработана структурная схема ее моделирования согласно методу пространства состояний, апробированная на примере системы второго порядка с проверкой методом контрольного моделирования. Исследуемая система n -го порядка преобразована к виду «вход – внутреннее состояние – выход», разработана структурная схема ее моделирования по методу пространства состояний в различных системах визуальной симуляции, апробированная на примере системы третьего порядка с проверкой методом контрольного моделирования. Критерием правильности является тождественность графиков выходных сигналов исследуемой системы, полученных методом пространства состояний, методом структурного моделирования и заданием передаточной функции. Разработанный универсальный математический инструментальный позволяет проводить исследование систем типа «один вход – один выход» любой степени сложности.

Ключевые слова: пространство состояний, переменные состояния, SISO-система, структурный анализ, моделирование

Для цитирования: Музылева И. В., Языкова Л. Н., Мещеряков В. Н. Применение метода пространства состояний для обобщенной системы типа «один вход – один выход» // Вестник кибернетики. 2022. № 4 (48). С. 59–68. DOI 10.34822/1999-7604-2022-4-59-68.

Original article

APPLICATION OF THE STATE SPACE METHOD FOR A GENERALIZED SINGLE INPUT SINGLE OUTPUT SYSTEM

Inna V. Muzyleva^{1✉}, Lyubov N. Yazykova², Viktor N. Meshcheryakov³

^{1, 2, 3} Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

¹ lstu-miv2010@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-5958-5144>

² yaln29@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6035-5263>

³ mesherek@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>

Abstract. The object of the study is analytical and topological methods for automatic control systems engineering. The aim of the study is to build a practice-oriented approach for applying the state space method, which is part of nonmetric mathematics, to analyze the single input single output systems. A generalized n^{th} -order input output system is investigated. A structural scheme for such system modeling is developed according to the state space method. The scheme was tested on the example of the second order system using verification of the control modeling method. The n^{th} -order system is transformed into “input – internal state – output” type. The structural scheme of its modeling is developed according to the state space method in various visual

simulation systems and tested on the example of the third order system using verification of the control modeling method. The criterion of correctness is equality of graphs of output signals of the system analyzed, which were obtained by the state space method, the structural modeling method and the assignment of the transfer function. The developed universal mathematical tools make it possible to study single input single output systems of any complexity.

Keywords: state space, state variables, SISO system, structural analysis, modeling

For citation: Muzyleva I. V., Yazykova L. N., Meshcheryakov V. N. Application of the State Space Method for a Generalized Single Input Single Output System // Proceedings in Cybernetics. 2022. No. 4 (48). P. 59–68. DOI 10.34822/1999-7604-2022-4-59-68.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование систем автоматического управления во временном домене [1] с помощью пространства состояний очень удобна по нескольким причинам. С одной стороны, по методическим соображениям, система характеризуется с помощью понятия «состояние системы», которому соответствует точка в определенном евклидовом пространстве, а поведение системы во временной области – это траектория этой точки [2]. С другой стороны, матрично-векторное описание системы компактно и наглядно, что позволяет работать с линейными и нелинейными системами с помощью одного и того же математического инструментария.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обобщенная система автоматического управления (САУ) типа SISO (single input single output) может быть представлена как «черный ящик» (рис. 1). Связь между входным и выходным сигналами этой системы в виде

«вход – выход» описывается дифференциальным уравнением, у которого в левой части размещается сумма всех производных выходного сигнала $x_{\text{ВЫХ}}(t)$, а в правой части – сумма всех производных входного сигнала $x_{\text{ВХ}}(t)$ [3, 4]:

$$a_n \frac{d^n x_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + a_0 x_{\text{ВЫХ}}(t) = b_m \frac{d^m x_{\text{ВХ}}(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x_{\text{ВХ}}(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx_{\text{ВХ}}(t)}{dt} + b_0 x_{\text{ВХ}}(t). \quad (1)$$

Здесь $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0, b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$ – параметры, определяющие динамические свойства системы (параметры САУ). В том случае, когда параметры являются константами, САУ является линейной. Если хотя бы один параметр является нелинейным (например, изменяется во времени по релейному закону), САУ является нелинейной. Поэтому решение классической задачи теории автоматического управления – нахождение $x_{\text{ВЫХ}}(t)$ при задании $x_{\text{ВХ}}(t)$ путем решения дифференциального уравнения представляется затруднительным.

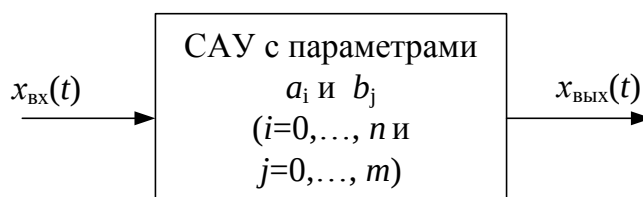


Рис. 1. Структурная схема обобщенной системы автоматического управления

Примечание: составлено авторами.

Универсальным математическим приемом, позволяющим решать указанную задачу, является метод пространства состояний [5]. Математическое уравнение системы можно представить в виде функциональной схемы, состоящей из элементарных динамических звеньев – идеальных интеграторов и сумматоров.

Введем обозначения, являющиеся традиционными для метода пространства состояний:

$$y_n = \frac{d^n x_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^n}; y_{n-1} = \frac{d^{n-1} x_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^{n-1}}; \dots y_1 = \frac{dx_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt}; y_0 = x_{\text{ВЫХ}}(t); \quad (2)$$

$$g_m = \frac{d^m x_{\text{ВХ}}(t)}{dt^m}; g_{m-1} = \frac{d^{m-1} x_{\text{ВХ}}(t)}{dt^{m-1}}; \dots g_1 = \frac{dx_{\text{ВХ}}(t)}{dt}; g_0 = x_{\text{ВХ}}(t).$$

С учетом принятых обозначений, дифференциальное уравнение (1) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} a_n y_n + a_{n-1} y_{n-1} + \dots + a_1 y_1 + a_0 y_0 = \\ = b_m g_m + b_{m-1} g_{m-1} + \dots + b_1 g_1 + b_0 g_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь g_0 и y_0 – входной и выходной сигнал обобщенной САУ. Соответственно методу пространства состояний:

$$\begin{cases} g_m = \frac{1}{b_m} \left[\sum_{i=1}^n a_i y_i - \sum_{i=1}^{m-1} b_i g_i \right], \\ y_n = \frac{1}{a_n} \left[\sum_{i=1}^m b_i g_i - \sum_{i=1}^{n-1} a_i y_i \right]. \end{cases} \quad (4)$$

После выделения общих для обоих уравнений компонентов:

$$\Xi_1 = \sum_{i=1}^{m-1} b_i g_i, \quad \Xi_2 = \sum_{i=1}^{n-1} a_i y_i \quad (5)$$

получается:

$$\begin{cases} g_m = \frac{1}{b_m} (a_n y_n + \Xi_2 - \Xi_1), \\ y_n = \frac{1}{a_n} (b_m g_m + \Xi_1 - \Xi_2). \end{cases} \quad (6)$$

Соответствующая структура представлена на рис. 2.

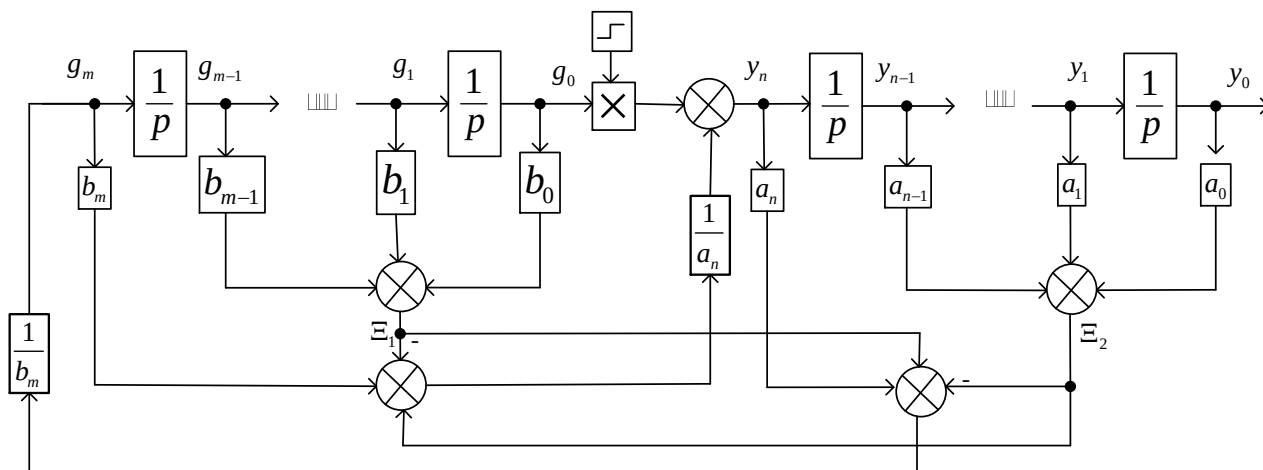


Рис. 2. Структурная модель пространства состояний вида «вход – выход» для системы автоматического управления n -го порядка

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Данная методика легко применима к системам любого порядка, но с $m = 0$. Численный пример рассмотрен для системы второго порядка, описываемой дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} a_2 \frac{d^2 x_{\text{вых}}(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx_{\text{вых}}(t)}{dt} + \\ + a_0 x_{\text{вых}}(t) = b_0 x_{\text{вх}}(t). \end{aligned}$$

И, соответственно, передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}.$$

Правильность расчета проверяется методом контрольного моделирования [6]. На два

входа плоттера подается два способа моделирования системы (рис. 3): структурная модель пространства состояний и передаточная функция. Графики совпадают, что подтверждает правильность схемы структурного моделирования. Поскольку в программе визуального моделирования VisSim блок «Передаточная функция» относится к группе «Линейные системы», параметры в данном примере представляют собой числовые значения. Этого достаточно для проверки правильности предлагаемой структуры. В дальнейшем параметры a_i можно задать в виде формул и применять предлагаемую структуру для исследования нелинейных систем.

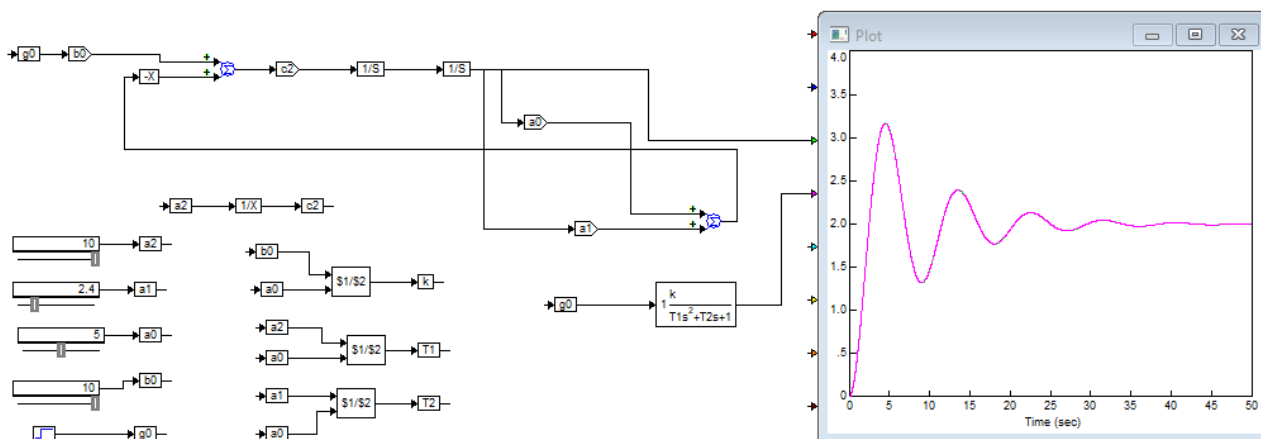


Рис. 3. Пример структурной модели системы второго порядка с $m = 0$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Более универсальным является метод комбинирования производных [7], когда исследуется система «вход – внутреннее состояние – выход». Прежде всего, выполним приведение дифференциального уравнения (1) к виду, чтобы коэффициент при старшей производной выходного сигнала был равен 1, входной сигнал приведенной системы – это управляющее воздействие $u(t)$, выходной сигнал – $y(t)$:

$$\begin{aligned} \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1}' \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1' \frac{dy(t)}{dt} + a_0' y(t) = \\ = b_m' \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1}' \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1' \frac{du(t)}{dt} + b_0' u(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где $a_{i-1}' = \frac{a_{i-1}}{a_n}$, $b_j' = \frac{b_j}{a_n}$ – параметры обобщенной системы n -го порядка, приведенной к стандартному виду. Здесь $i = 1, \dots, n$, $j = 0, \dots, m$, причем $m < n$.

В операторной форме уравнение (7) принимает вид:

$$\begin{aligned} p^n Y(p) + a_{n-1}' p^{n-1} Y(p) + \dots + a_1' p Y(p) + a_0' Y(p) = \\ = b_m' p^m U(p) + b_{m-1}' p^{m-1} U(p) + \dots + b_1' p U(p) + b_0' U(p) \end{aligned}$$

или:

$$K(p)Y(p) = L(p)U(p), \quad (8)$$

где p – комплексная переменная, используемая в преобразовании Лапласа, $X(p)$ и $Y(p)$ – изображения входного $x_{\text{вх}}(t)$ и выходного $x_{\text{вых}}(t)$ сигналов системы (рис. 1):

$$K(p) = p^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i' p^i \text{ и } L(p) = \sum_{i=0}^m b_i' p^i.$$

Выражение (8) можно записать в виде равенства дробей:

$$\frac{Y(p)}{L(p)} = \frac{U(p)}{K(p)}. \quad (9)$$

Введем переменную внутреннего состояния системы $x(t)$ (рис. 4) – такую, что ее изображение $X(p)$ определяется как:

$$X(p) = \frac{Y(p)}{L(p)} = \frac{U(p)}{K(p)}. \quad (10)$$

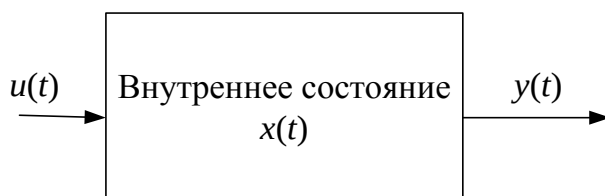


Рис. 4. Структура «вход – состояние – выход» для обобщенной системы автоматического управления

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Тогда для управляющего воздействия получается изображение:

$$U(p) = K(p) \cdot X(p)$$

и, соответственно, оригинал:

$$u(t) = \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_{n-1}' \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1' \frac{dx(t)}{dt} + a_0' x(t). \quad (11)$$

А для выходного сигнала системы получается изображение:

$$Y(p) = L(p) \cdot X(p)$$

и, соответственно, оригинал:

$$y(t) = b_m' \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1}' \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1' \frac{dx(t)}{dt} + b_0' x(t). \quad (12)$$

Уравнения (11) и (12) являются основой для построения структурной модели приведенной обобщенной системы (рис. 5).

После ввода обычных для метода пространства состояний обозначений:

$$\begin{cases} x_1(t) = x(t) \\ x_2(t) = \frac{dx_1(t)}{dt} = \frac{dx(t)}{dt} \\ x_3(t) = \frac{dx_2(t)}{dt} = \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \\ \dots \\ x_n(t) = \frac{dx_{n-1}(t)}{dt} = \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} \end{cases}$$

получается система уравнений для производных первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = 0 \cdot x_1(t) + 1 \cdot x_2(t) + 0 \cdot x_3(t) + \dots + 0 \cdot x_{n-1}(t) + 0 \cdot x_n(t) + 0 \cdot u(t) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = 0 \cdot x_1(t) + 0 \cdot x_2(t) + 1 \cdot x_3(t) + \dots + 0 \cdot x_{n-1}(t) + 0 \cdot x_n(t) + 0 \cdot u(t) \\ \dots \\ \frac{dx_{n-1}(t)}{dt} = 0 \cdot x_1(t) + 0 \cdot x_2(t) + 0 \cdot x_3(t) + \dots + 0 \cdot x_{n-1}(t) + 1 \cdot x_n(t) + 0 \cdot u(t) \\ \frac{dx_n(t)}{dt} = -a_0' \cdot x_1(t) - a_1' \cdot x_2(t) - a_2' \cdot x_3(t) - \dots - a_{n-1}' \cdot x_n(t) - a_n' \cdot u(t) \\ y(t) = b_0' \cdot x_1(t) + b_1' \cdot x_2(t) + \dots + b_m' \cdot x_{m+1}(t) + 0 \cdot x_{m+2}(t) + \dots + 0 \cdot x_n(t) + 0 \cdot u(t). \end{cases}$$

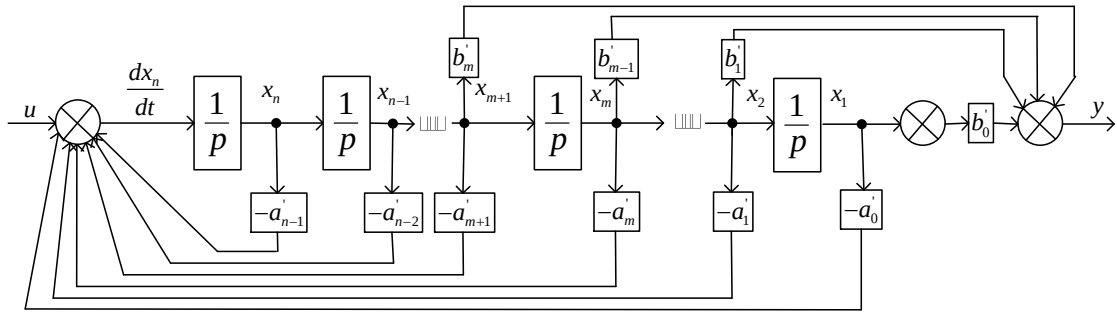


Рис. 5. Структурная модель обобщенной системы автоматического управления n -го порядка в форме «вход – внутреннее состояние – выход»

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

В матричной форме она запишется в виде:

$$\frac{dX_{\text{сост}}(t)}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0' & -a_1' & -a_2' & \dots & -a_{n-2}' & -a_{n-1}' \end{bmatrix} \cdot X_{\text{сост}}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot u(t) \quad (13)$$

$$Y(t) = [b_0' \ b_1' \ \dots \ b_m' \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \cdot X_{\text{сост}}(t) + 0 \cdot u(t).$$

ной приведенной САУ n -го порядка в пространстве состояний [7] для нулевых начальных условий:

$$\begin{cases} \frac{dX_{\text{сост}}(t)}{dt} = A(t) \cdot X_{\text{сост}}(t) + B(t) \cdot u(t) \\ Y(t) = C(t) \cdot X_{\text{сост}}(t) + D(t) \cdot u(t) \end{cases} \quad (14)$$

Таким образом, получена стандартная форма записи уравнения динамики обобщен-

Здесь $\frac{dX_{cocc}(t)}{dt}$ – n -мерная матрица – столбец первых производных переменных состояний:

$$\frac{dX_{cocc}(t)}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{dx_1(t)}{dt} \\ \frac{dx_2(t)}{dt} \\ \dots \\ \frac{dx_{n-1}(t)}{dt} \\ \frac{dx_n(t)}{dt} \end{bmatrix},$$

$X_{cocc}(t)$ – n -мерная матрица – столбец переменных состояний:

$$X_{cocc}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{bmatrix},$$

$A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$ – это матрицы пространства состояний обобщенной системы, параметры которой в общем случае зависят от времени:

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0' & -a_1' & -a_2' & \dots & -a_{n-2}' & a_{n-1}' \end{bmatrix}, B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C(t) = [b_0' \ b_1' \ \dots \ b_m' \ 0 \ \dots \ 0 \ 0], D(t) = [0].$$

$A(t)$ – квадратная матрица n -го порядка, которая показывает порядок системы, параметры входящих в нее элементов и их взаимные связи. Для ее составления необходимо в n -й строке поставить параметры из левой части приведенного дифференциального уравнения. Заполнение всех остальных строк неизменно.

$B(t)$ – матрица – столбец n -го порядка, которая показывает связь управляющего воздействия с переменными состояниями. Последняя строка этой матрицы равна 1, остальные – нулю.

$C(t)$ – матрица – строка n -го порядка, формирующая выходные переменные из переменных состояний. Она состоит из коэффициентов правой части приведенного дифференциального уравнения (m параметров), дополненных нулями до размера матрицы n .

$D(t)$ – матрица обхода системы, представляющая собой нулевую матрицу размера 1×1 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве численного эксперимента проведено исследование линейной системы третьего порядка ($n = 3$, $m = 1$), описываемой уравнением:

$$0,01 \frac{d^3 x_{\text{вых}}(t)}{dt^3} + 0,5 \frac{d^2 x_{\text{вых}}(t)}{dt^2} + \frac{dx_{\text{вых}}(t)}{dt} + x_{\text{вых}}(t) = 0,5 \frac{dx_{\text{вх}}(t)}{dt} + x_{\text{вх}}(t)$$

и, соответственно, передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{0,5p + 1}{0,01p^3 + 0,5p^2 + p + 1}.$$

Приведенное уравнение этой системы:

$$\frac{d^3 x_{\text{вых}}(t)}{dt^3} + 50 \frac{d^2 x_{\text{вых}}(t)}{dt^2} + 100 \frac{dx_{\text{вых}}(t)}{dt} + 100 x_{\text{вых}}(t) = 50 \frac{dx_{\text{вх}}(t)}{dt} + 100 x_{\text{вх}}(t).$$

Матрицы для пространства состояний:

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -100 & -100 & -50 \end{bmatrix}, B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C(t) = [100 \ 50 \ 0], D(t) = [0].$$

Результаты проверочного моделирования, проведенного по методике [3], и соответствующих m -файл приведены на рис. 6–11 в программах VisSim, MatLab/Simulink и SimInTech. Правильность расчетов подтверждается совпадением графиков переходных процессов, полученных при задании системы тремя способами:

- 1) через пространство состояний;
- 2) через передаточную функцию;
- 3) путем структурного моделирования.

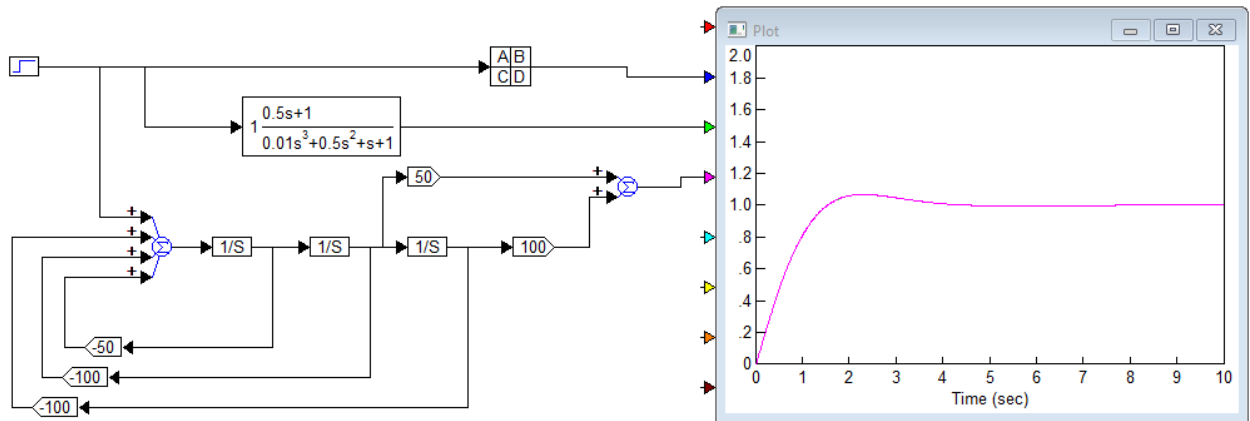


Рис. 6. Пример структурной модели системы третьего порядка с $m = 1$ в VisSim
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

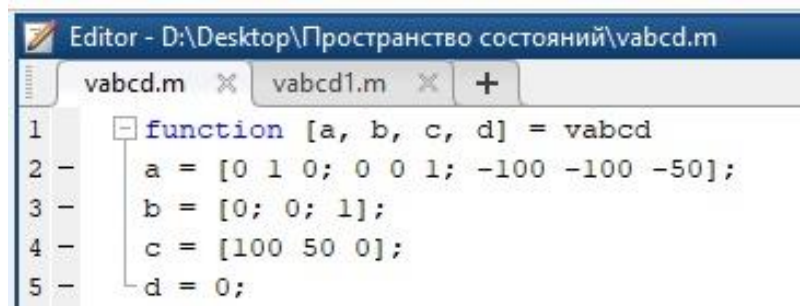


Рис. 7. Задание матриц пространства состояний в .m-файле
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

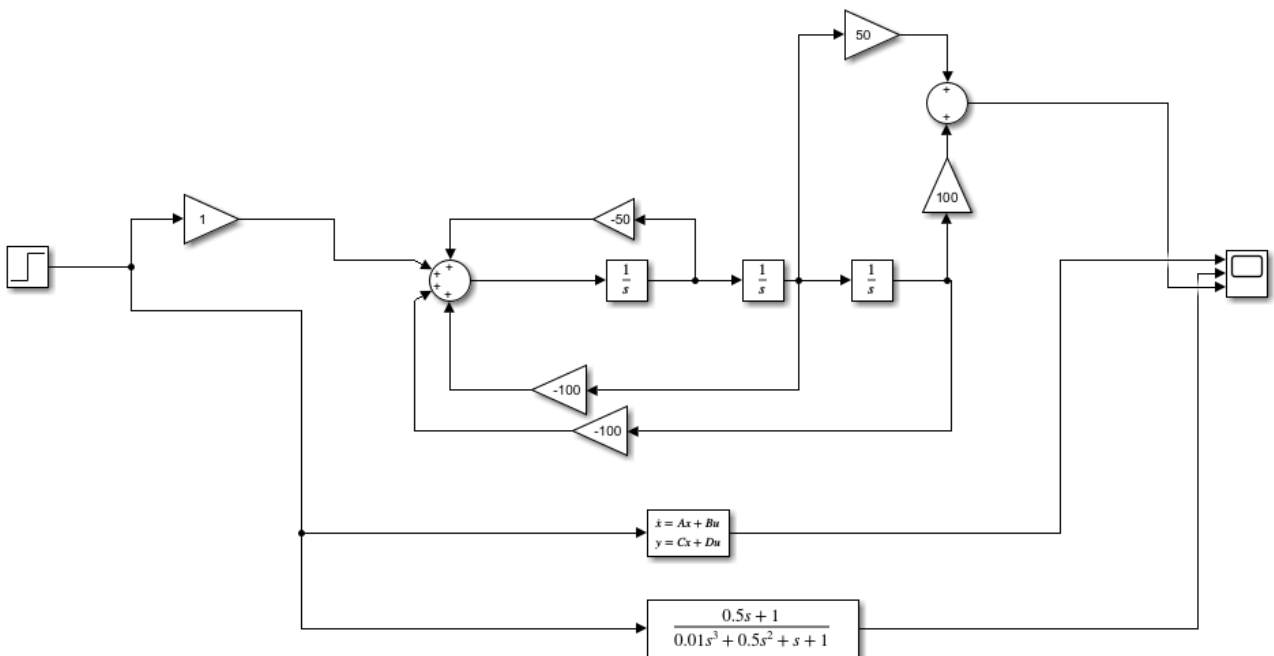


Рис. 8. Структурное моделирование рассматриваемой системы в Matlab/Simulink
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

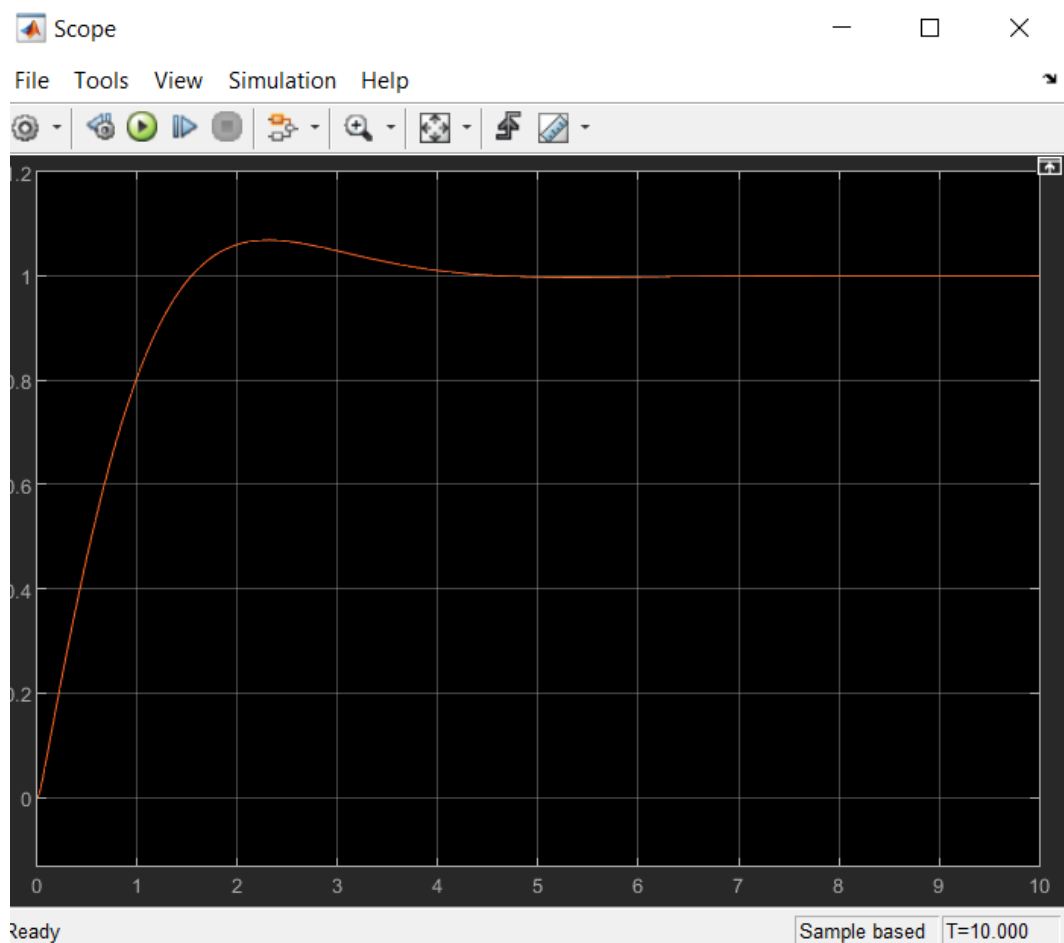


Рис. 9. Переходный процесс, полученный в результате структурного моделирования рассматриваемой системы в Matlab/Simulink

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

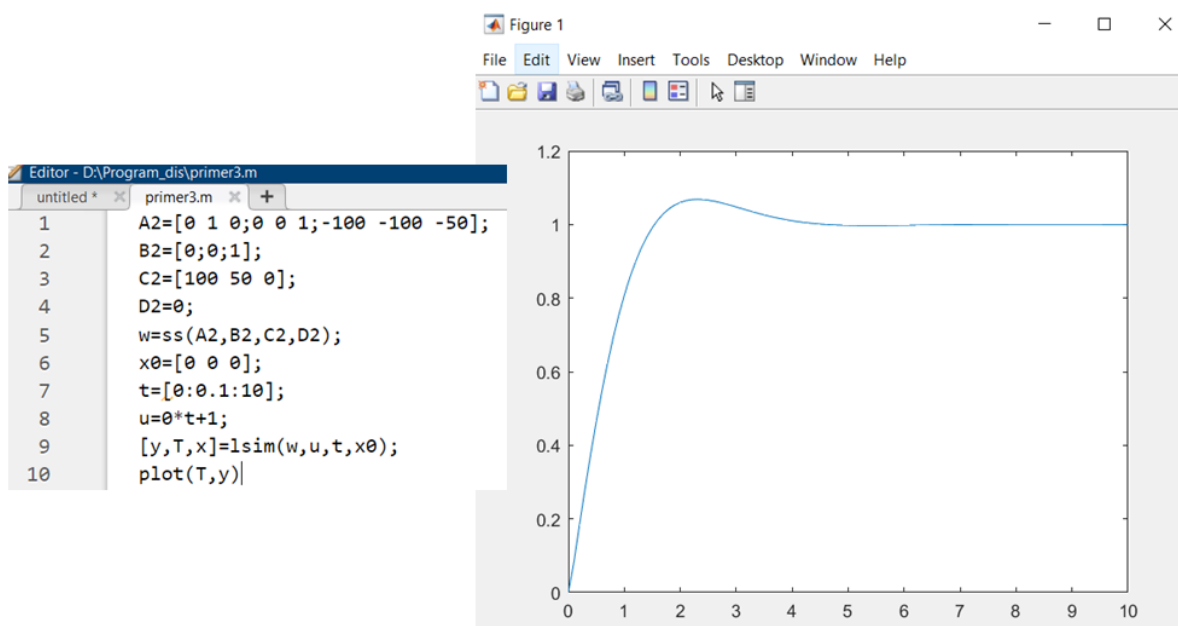
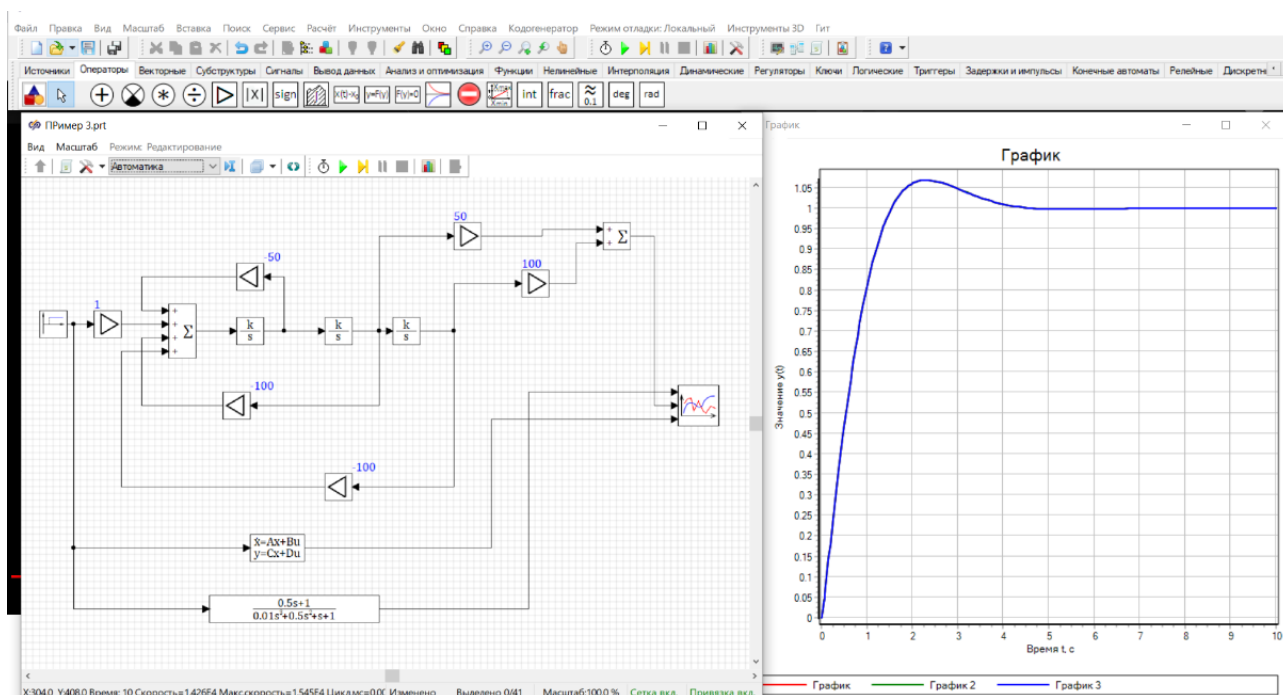


Рис. 10. Скрипт Matlab и результат расчетов для рассматриваемого примера

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.



**Рис. 11. Функциональная схема и результаты моделирования
для численного примера в SimInTech**

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показанная методика составления матриц пространства состояний применима для линейных и нелинейных SISO-систем, поскольку в таком виде можно записать уравнения динамики любой степени сложности [8], а осуществление преобразований над матрицами $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ и $D(t)$ возможно в любом

доступном пакете симуляции (VisSim, Matlab/Simulink, SimInTech и т. п.), что существенно облегчает процесс решения прямой задачи теории автоматического управления, заключающейся в определении реакции системы с известным математическим описанием.

Список источников

1. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. СПб. : Профессия, 2004. 752 с.
2. Калиева С. Т., Панченко В. Н., Иванов В. В. Рациональное распределение парка локомотивов и анализ их надежности в эксплуатации // Вестн. транспорта Поволжья. 2019. № 6 (78). С. 13–18.
3. Музылева И. В. Элементарная теория линейных систем в задачах и упражнениях. СПб. : Лань, 2022. 428 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/-209948> (дата обращения: 28.10.2022).
4. Прошина Р. Д. Математическое моделирование технических систем в нормальной форме пространства состояний // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2011. № 1–3. URL: <https://cyberleninka.ru/> (дата обращения: 07.12.2022).
5. Деруссо П. М., Рой Р. Дж., Клоуз Ч. М. Пространство состояний в теории управления: для инженеров. М. : Наука, 1970. 620 с.

References

1. Besekersky V. A., Popov E. P. Teoriia sistem avtomaticheskogo upravleniia. St. Petersburg : Professiia, 2004. 752 p. (In Russian).
2. Kalieva S. T., Panchenko V. N., Ivanov V. V. Rational Distribution of Locomotive Fleet and Analysis of Its Operation Reliability // Vestn. transporta Povolzhia. 2019. No. 6 (78). P. 13–18. (In Russian).
3. Muzyleva I. V. Elementarnaia teoriia lineinykh sistem v zadachakh i uprazhneniiakh. St. Petersburg : Lan, 2022. 428 p. URL: <https://e.lanbook.com/book/209948> (accessed: 28.10.2022). (In Russian).
4. Proshina R. D. Mathematical Modeling of Technical Systems in Normal Form of State Space // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2011. No. 1–3. URL: <https://cyberleninka.ru/> (accessed: 07.12.2022). (In Russian).
5. Derusso P. M., Roy R. J., Close C. M. State Variables for Engineers. Moscow : Nauka, 1970. 620 p. (In Russian).

6. Музылева И. В., Языкова Л. Н., Мещеряков В. Н. Метод контрольного моделирования для проверки передаточной функции сложноструктурированной системы // Вестник кибернетики. 2022. № 2 (46). С. 46–54. DOI 10.34822/1999-7604-2022-2-46-54.
7. Мейер А., Сю Д. Современная теория автоматического управления и ее применение / под ред. Ю. И. Толчеева. М. : Машиностроение, 1972. 544 с.
8. Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб. : Наука, 2000. 475 с.
6. Muzyleva I. V., Yazykova L. N., Meshcheryakov V. N. Method of Control Modeling for Testing Transfer Function of a Highly Structured System // Proceedings in Cybernetics. 2022. No. 2 (46). P. 46–54. DOI 10.34822/1999-7604-2022-2-46-54. (In Russian).
7. Meyer A. U., Hsu J. C. Modern Control Principles and Applications / Ed. Yu. I. Tolcheeva. Moscow : Mashinostroenie, 1972. 544 p. (In Russian).
8. Andrievsky B. R., Fradkov A. L. Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniia s primerami na iazyke MATLAB. St. Petersburg : Nauka, 2000. 475 p. (In Russian).

Информация об авторах

И. В. Музылева – кандидат технических наук, доцент.

Л. Н. Языкова – старший преподаватель.

В. Н. Мещеряков – доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

I. V. Muzyleva – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor.

L. N. Yazykova – Senior Lecturer.

V. N. Meshcheryakov – Doctor of Sciences (Engineering), Professor.