

Научная статья
УДК 004.94
doi: 10.34822/1999-7604-2022-2-46-54

МЕТОД КОНТРОЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ СЛОЖНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Инна Васильевна Музылева^{1✉}, *Любовь Николаевна Языкова*²,
*Виктор Николаевич Мещеряков*³

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

¹*lstu-miv2010@yandex.ru*[✉], <http://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 сложноструктурированных схем с перекрестными связями. Цель работы – обоснование метода контрольного моделирования для оценки правильности передаточной функции сложноструктурированной системы. В основе исследования лежит раздел неметрической математики, в которой заложен топологический подход к изучению сложноструктурированных систем. Исследована система, состоящая из десяти звеньев, охваченных многочисленными перекрестными связями. Смоделирована функциональная схема, состоящая из двух ветвей: исходной структуры системы и найденной по правилу Мейсона передаточной функции. На обе ветви модели подана единичная функция в качестве входного сигнала. Критерием правильности нахождения передаточной функции системы является тождественность графиков выходных сигналов двух ветвей модели. Предлагаемый метод позволяет повысить степень достоверности исследования сложноструктурированных систем.

Ключевые слова: передаточная функция, правило Мейсона, сложноструктурированная система, структурный анализ, моделирование

Для цитирования: 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.

Original article

METHOD OF CONTROL MODELING FOR TESTING TRANSFER FUNCTION OF A HIGHLY STRUCTURED SYSTEM

Inna V. Muzyleva^{1✉}, *Lyubov N. Yazykova*², *Viktor N. Meshcheryakov*³

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

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

²*yaln29@yandex.ru*, <http://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 of calculation of highly structured schemes with cross-couplings. The aim of the study is to substantiate the method of control modeling for assessment of correctness of transfer function of a highly structured system. The study is based on the branch of nonmetric mathematics that is focused on the topological approach to studying highly structured systems. A system of ten components covered with cross-couplings is analyzed. A functional scheme of two branches, the initial structure of a system and transfer function found with the Mason's rule, is simulated. A unit function is applied to both branches as an input signal. Correct finding of a transfer function is performed by using such criterion as equality of output signals graphs of a model's two branches. The method proposed increases the level of validity of studying highly structured systems.

Keywords: transfer function, Mason's rule, highly structured system, structural analysis, modeling

For citation: 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.

ВВЕДЕНИЕ

Описание объектов различной физической природы осуществляется с помощью энергоинформационных моделей, представленных в виде структурных схем. Структурная схема является наглядной и универсальной формой математического описания сложноструктурированных систем. Такое описание облегчает рассмотрение динамических процессов, упрощает применение графического и частотного методов, а также методов численного моделирования [1]. Применение всех перечисленных методов базируется на формуле передаточной функции системы. Для сложноструктурированной системы с многочисленными перекрестными связями нахождение и проверка правильности передаточной функции могут быть весьма затруднительными. При этом методика нахождения передаточной функции не вызывает сомнений и подробно излагается в классической теории автоматического управления, а вот методике проверки правильности передаточной функции внимания не уделяется, хотя при исследовании реальных объектов и соответствующем моделировании на адекватности нахождения передаточной функции базируется все исследование.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье предлагается метод контрольного моделирования, позволяющий без дополнительных аналитических выкладок оценить правильность найденной передаточной функции сложноструктурированной системы с многочисленными перекрестными связями. Предлагается осуществлять данную проверку согласно структуре, представленной на рис. 1. Структурная схема метода состоит из двух частей: первая – это исходная структура сложноструктурированной системы; вторая представлена блоком, в котором реализована проверяемая передаточная функция, найденная для исходной системы. На обе части предлагаемой структуры подается один и тот же типовой сигнал, например единичная функция. Выходной сигнал исходной сложноструктурированной системы с перекрестными связями подается на один вход устройства отображения графиков, выходной сигнал блока с полученной передаточной функцией – на другой. Тождественность графиков выходных сигналов говорит о правильном нахождении передаточной функции сложноструктурированной системы.

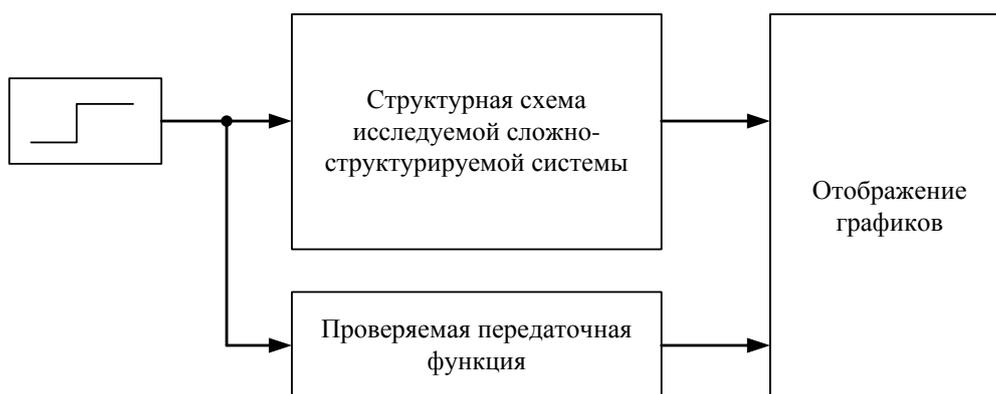


Рис. 1. Структура метода контрольного моделирования
Примечание: составлено авторами.

Структурная схема системы любой степени сложности может быть представлена как совокупность последовательного, параллельного соединения звеньев и соединения с об-

ратной связью звеньев с известными передаточными функциями. В общем случае i -е звено описывается дифференциальным уравнением вида [2]:

$$\begin{aligned}
 & a_{n_i} \frac{d^n x_{\text{ВЫХ}_i}(t)}{dt^n} + a_{(n-1)_i} \frac{d^{n-1} x_{\text{ВЫХ}_i}(t)}{dt^{n-1}} + \dots + \\
 & \dots + a_{1_i} \frac{dx_{\text{ВЫХ}_i}(t)}{dt} + a_{0_i} x_{\text{ВЫХ}_i}(t) = \\
 & = b_{m_i} \frac{d^m x_{\text{ВХ}_i}(t)}{dt^m} + b_{(m-1)_i} \frac{d^{m-1} x_{\text{ВХ}_i}(t)}{dt^{m-1}} + \dots + \\
 & \dots + b_{1_i} \frac{dx_{\text{ВХ}_i}(t)}{dt} + b_{0_i} x_{\text{ВХ}_i}(t),
 \end{aligned}$$

Здесь $a_{n_i}, a_{(n-1)_i}, a_{1_i}, a_{0_i}, b_{m_i}, b_{(m-1)_i}, b_{1_i}, b_{0_i}$, – константы, определяющие динамические свойства i -го звена системы.

При прохождении через звено входной сигнал $x_{\text{ВХ}_i}(t)$ преобразуется в выходной сигнал $x_{\text{ВЫХ}_i}(t)$. В операторной форме влияние i -го звена на вид сигнала полностью определяется его передаточной функцией:

$$\begin{aligned}
 W_i(p) &= \frac{x_{\text{ВЫХ}_i}(p)}{x_{\text{ВХ}_i}(p)} = \\
 &= \frac{b_{m_i} p^m + b_{(m-1)_i} p^{m-1} + \dots + b_{1_i} p + b_{0_i}}{a_{n_i} p^n + a_{(n-1)_i} p^{n-1} + \dots + a_{1_i} p + a_{0_i}}.
 \end{aligned}$$

Оценка динамических характеристик системы осуществляется на основе передаточной функции всей системы $W(p)$, определяемой по структурной схеме в операторной форме. Нахождение передаточной функции системы можно осуществить несколькими методами [3].

Первый метод заключается в том, что осуществляется постепенное упрощение структуры за счет нахождения передаточных функций элементарных соединений (последовательное, параллельное, с обратной связью). Недостаток данного метода заключается в проблематичности его применения для упрощения сложноструктурированных систем, для которых характерны многочисленные перекрестные связи. В этом случае возникает необходимость применять правила эквивалентного преобразования структурных схем (переносы узлов, сумматоров и звеньев) [1], требующие чрезвычайно высокой квалификации исследователя. Проверка эквивалентности преобразований становится проблематичной даже для небольшой системы, содержащей порядка 10 звеньев, охваченных перекрестными связями, например такой, которая показана на рис. 2.

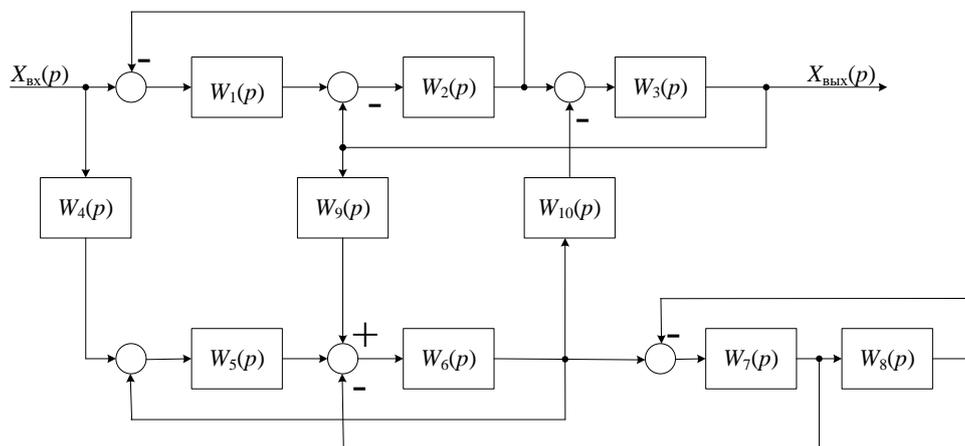


Рис. 2. Пример структурной схемы с перекрестными связями

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

Второй метод – применение правила некасающихся контуров (правила Мейсона) – для рассматриваемой в качестве примера сложноструктурированной системы (рис. 1) является предпочтительным. Комплекс взаимосвязей

между параметрами моделей и структурами удобно представлять в виде организованного графа (орграфа). При построении орграфа (рис. 3) структурная схема модифицирована таким образом, что [3]:

- каждому сигналу, включая входной и выходной сигналы системы, соответствуют свои вершины;
 - каждый блок структурной схемы заменяется дугой с оператором, равным передаточной функции блока;

- все отрицательные знаки учитываются в передаточных функциях;
 - каждый сумматор заменен вершиной графа, на которую направлены дуги графа;
 - каждый узел структурной схемы заменен вершиной графа, из которой дуги графа выходят.

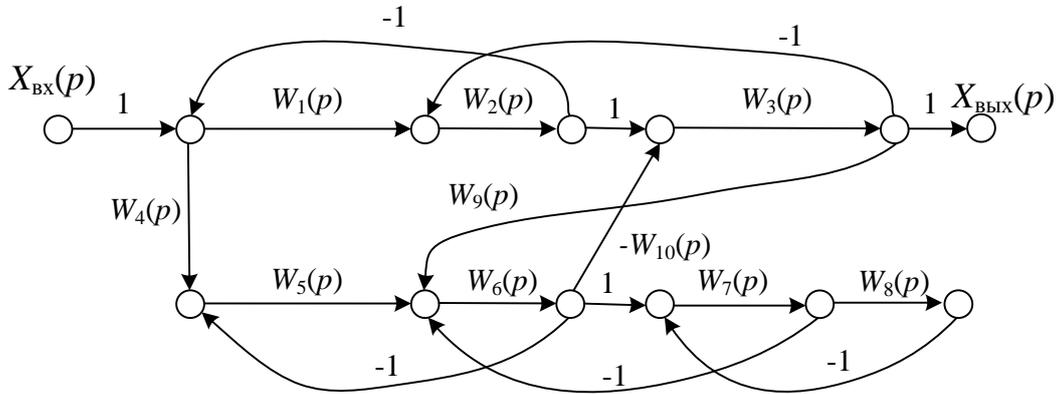


Рис. 3. Орграф рассматриваемой системы

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

Для правила Мейсона в применении к структурным схемам актуальны следующие понятия:

- путь – непрерывная последовательность направленных звеньев между двумя переменными, в которой ни одна из переменных не встречается более одного раза;
- контур – замкнутый путь;
- некасающийся контур – контур, не имеющий ни одной общей переменной с другим контуром или путем.

Известны решения по автоматизации поиска формулы передаточной функции, основанные на применении формулы Мейсона как в общем виде [4, 5], так и для узкой предметной области [6], но методика проверки полученных передаточных функций там не предлагается.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с правилом Мейсона передаточная функция системы определяется как:

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{\sum J_i(p) \cdot \delta_i(p)}{\Delta(p)},$$

$$\Delta(p) = 1 - \sum J_{k1}(p) + \sum J_{k2}(p) - \sum J_{k3}(p) + \dots,$$

$$\delta_i(p) = 1 - \sum J_{ik1}(p) + \sum J_{ik2}(p) - \sum J_{ik3}(p) + \dots,$$

где $J_i(p)$ – передаточная функция i -го прямого пути от $x_{\text{вх}}(p)$ к $x_{\text{вых}}(p)$;

$\sum J_{k1}(p)$ – сумма передаточных функций всех контуров;

$\sum J_{k2}(p)$ – сумма произведений передаточных функций не касающихся друг друга пар контуров;

$\sum J_{k3}(p)$ – сумма произведений передаточных функций не касающихся друг друга троек контуров;

$\sum J_{ik1}(p)$ – сумма передаточных функций всех контуров, не касающихся i -го пути;

$\sum J_{ik2}(p)$ – сумма произведений передаточных функций всех пар контуров, не касающихся i -го пути;

$\sum J_{ik3}(p)$ – сумма произведений передаточных функций всех троек контуров, не касающихся i -го пути и т. д.

Для орграфа, представленного на рис. 2, имеют место следующие компоненты формулы Мейсона.

Прямые пути от $x_{\text{вх}}(p)$ к $x_{\text{вых}}(p)$:

1) $W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)$;

2) $W_4(p) \cdot W_5(p) \cdot W_6(p) \cdot W_{10}(p) \cdot W_3(p)$.

Контуров:

- 1) $-W_1(p) \cdot W_2(p)$;
- 2) $-W_2(p) \cdot W_3(p)$;
- 3) $-W_5(p) \cdot W_6(p)$;
- 4) $-W_6(p) \cdot W_7(p)$;
- 5) $-W_7(p) \cdot W_8(p)$;
- 6) $-W_6(p) \cdot W_{10}(p) \cdot W_3(p) \cdot W_9(p)$.

Не касающиеся друг друга пары контуров:

- 1) $(-W_1(p) \cdot W_2(p)) \cdot (-W_5(p) \cdot W_6(p))$;
- 2) $(-W_1(p) \cdot W_2(p)) \cdot (-W_6(p) \cdot W_7(p))$;
- 3) $(-W_1(p) \cdot W_2(p)) \cdot (-W_7(p) \cdot W_8(p))$;
- 4) $(-W_1(p) \cdot W_2(p)) \cdot (-W_6(p) \cdot W_{10}(p) \cdot W_3(p) \cdot W_9(p))$;
- 5) $(-W_2(p) \cdot W_3(p)) \cdot (-W_5(p) \cdot W_6(p))$;
- 6) $(-W_2(p) \cdot W_3(p)) \cdot (-W_7(p) \cdot W_8(p))$;
- 7) $(-W_2(p) \cdot W_3(p)) \cdot (-W_6(p) \cdot W_7(p))$;
- 8) $(-W_6(p) \cdot W_{10}(p) \cdot W_3(p) \cdot W_9(p)) \cdot (-W_7(p) \cdot W_8(p))$;
- 9) $(-W_5(p) \cdot W_6(p)) \cdot (-W_7(p) \cdot W_8(p))$.

Не касающиеся друг друга тройки контуров:

- 1) $(-W_1(p) \cdot W_2(p)) \cdot (-W_7(p) \cdot W_8(p)) \cdot (-W_6(p) \cdot W_{10}(p) \cdot W_3(p) \cdot W_9(p))$;
- 2) $(-W_1(p) \cdot W_2(p)) \cdot (-W_5(p) \cdot W_6(p)) \cdot (-W_7(p) \cdot W_8(p))$;
- 3) $(-W_2(p) \cdot W_3(p)) \cdot (-W_5(p) \cdot W_6(p)) \cdot (-W_7(p) \cdot W_8(p))$.

Числитель искомой передаточной функции:

$$A(p) = \sum J_i(p) \cdot \delta_i(p) = W_1 W_2 W_3 \cdot (1 + W_5 W_6 + W_7 W_8 + W_6 W_7 + W_3 W_6 W_7 W_8) - W_4 W_5 W_6 W_{10} W_3 \cdot (1 + W_1 W_2 + W_7 W_8 + W_1 W_2 W_7 W_8). \quad (1)$$

Знаменатель:

$$B(p) = \Delta(p) = 1 + (W_1 W_2 + W_2 W_3 + W_5 W_6 + W_6 W_7 + W_7 W_8 + W_6 W_{10} W_3 W_9) + (W_1 W_2 W_5 W_6 + W_1 W_2 W_6 W_7 + W_1 W_2 W_7 W_8 + W_1 W_2 W_6 W_3 W_9 W_{10} + W_2 W_3 W_5 W_6 + W_2 W_3 W_7 W_8 + W_2 W_3 W_6 W_7 + W_3 W_6 W_9 W_{10} W_7 W_8 + W_5 W_6 W_7 W_8) + (W_1 W_2 W_5 W_6 W_7 W_8 + W_1 W_2 W_6 W_3 W_9 W_{10} W_7 W_8 + W_1 W_2 W_5 W_6 W_7 W_8). \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) с целью большей наглядности опущен комплексный аргумент p . Очевидно, что проверка правильности полученной передаточной функции с помощью эквивалентных преобразований структурных схем весьма затруднительна.

Предлагаемая методика апробирована для схемы, приведенной на рис. 2, методом численного эксперимента. Он проведен для передаточных функций, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Передаточные функции для численного эксперимента

| $W_1(p)$ | $W_2(p)$ | $W_3(p)$ | $W_4(p)$ | $W_5(p)$ |
|-------------------------|-------------------------|----------|---------------|-------------------------|
| $\frac{k_1}{t_1 p + 1}$ | $\frac{1}{p}$ | $k_3 p$ | k_4 | $\frac{k_5}{t_5 p + 1}$ |
| $W_6(p)$ | $W_7(p)$ | $W_8(p)$ | $W_9(p)$ | $W_{10}(p)$ |
| $\frac{1}{p}$ | $\frac{k_1}{t_2 p + 1}$ | $k_8 p$ | $\frac{1}{p}$ | k_{10} |

Примечание: составлено авторами.

Программа проведенного в среде *Matlab* численного эксперимента представлена на рис. 4 и 5. Эксперимент осуществлялся для

следующих значений параметров: $k_1 = 5$; $k_3 = 2$; $k_4 = 2$; $k_5 = 3$; $k_8 = 2$; $k_{10} = 2$; $t_1 = 0.1$; $t_2 = 0.1$; $t_3 = 0.15$; $t_5 = 0.2$; $t_8 = 0.12$. Функцио-

нальная схема численного эксперимента в программе численного эксперимента, –
приведена на рис. 6, а результаты моделирования для значений параметров, указанных
на рис. 7.

```
Mason_1.m x +
% Расчет передаточной функции по правилу Мейсона
% Коэффициенты схемы
k1=5;
k3=2;
k4=2;
k5=3;
k8=2;
k10=2;
% Постоянные времени схемы
t1=0.1;
t2=0.1;
t3=0.15;
t5=0.2;
t8=0.12;
syms p s
% передаточные функции схемы
w1=k1/(t1*p+1);
w2=1/p;
w3=k3*p;
w4=k4;
w5=k5/(t5*p+1);
w6=1/p;
w7=k1/(t2*p+1);
w8=k8*p;
w9=1/p;
w10=k10;
% Блок вычисления передаточных функций прямых путей
w11=w1*w2*w3;
w22=-1*w4*w5*w6*w10*w3;
```

Рис. 4. Начало программы численного эксперимента

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

```
% Вычисление передаточных функций контуров
wk1=-1*w2*w1;
wk2=-1*w2*w3;
wk3=-1*w6*w7;
wk4=-1*w5*w6;
wk5=-1*w7*w8;
wk6=-1*w6*w10*w3*w9;
% Вычисление передаточных функций двух независимых контуров
ww1=wk1*wk4;
ww2=wk1*wk3;
ww3=wk1*wk5;
ww4=wk1*wk6;
ww5=wk2*wk4;
ww6=wk2*wk5;
ww7=wk2*wk3;
ww8=wk6*wk5;
ww9=wk4*wk5;
% Вычисление передаточных функций трех независимых контуров
www1=wk1*wk5*wk6;
www2=wk1*wk4*wk5;
www3=wk2*wk4*wk5;
% Получение передаточной функции по правилу Мейсона
A=w11*(1-wk4-wk5-wk3+ww9)+w22*(1-wk1-wk5+ww3);
B=1-wk1-wk2-wk3-wk4-wk5-wk6+ww1+ww2+ww3+ww4+ww5+ww6+ww7+ww8+ww9-www1-www2-www3;
W=A/B;
W=collect(W)

>> Mason_1
W =
(- 2020*p^4 - 70900*p^3 - 456500*p^2 - 20000*p)/(303*p^5 + 4979*p^4 + 31445*p^3 + 116400*p^2 + 197750*p + 30000)
```

Рис. 5. Завершение программы численного эксперимента

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

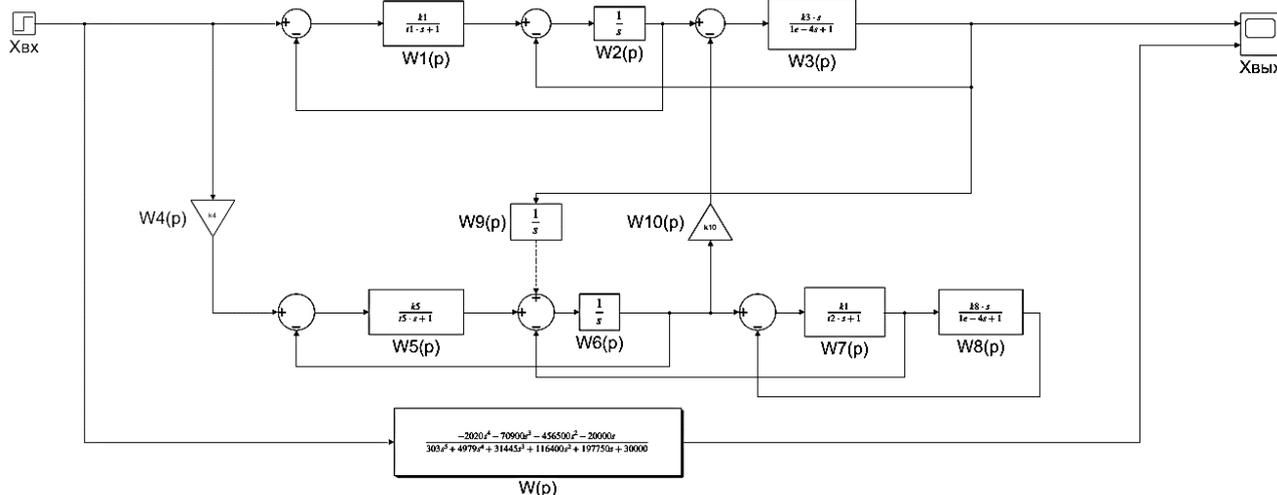


Рис. 6. Функциональная схема численного эксперимента

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

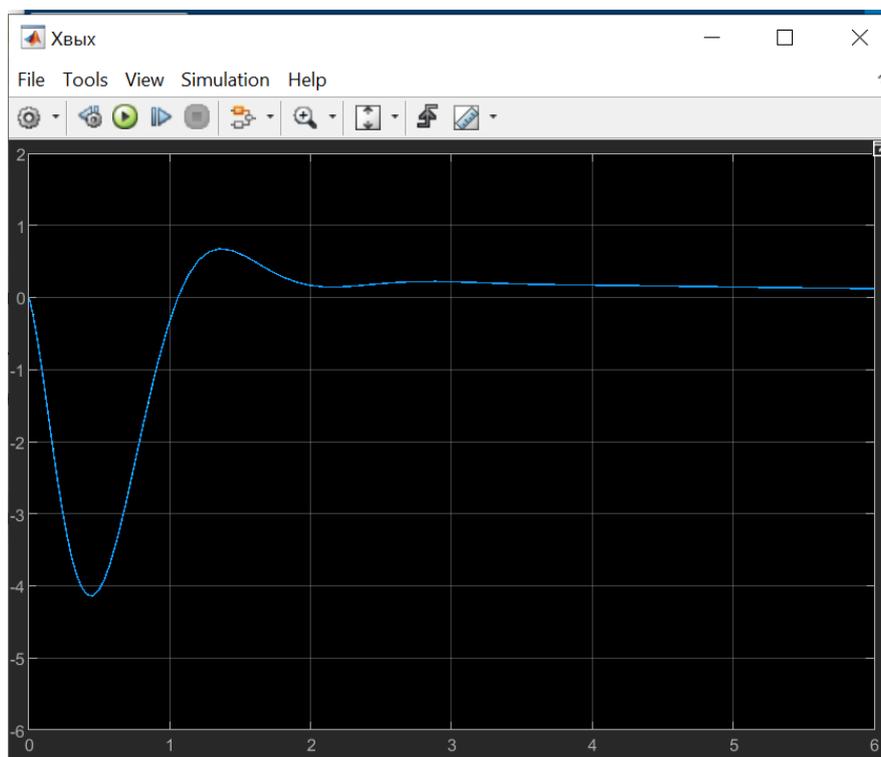


Рис. 7. Результат численного эксперимента

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная методика контрольного моделирования, предназначенная для проверки найденной передаточной функции сложноструктурированной системы с многочисленными перекрестными связями, позволяет оценить правильность передаточной функции системы без применения правил эквива-

лентных преобразований структурных схем, что значительно упрощает анализ промежуточных результатов исследования и обеспечивает достоверность исследования в целом. Рассмотренная методика позволяет получить истинные передаточные функции сложноструктурированных систем без упрощений и соответствующей потери точности и осу-

ществлять их дальнейший анализ. Примером сложноструктурированной системы с многочисленными перекрестными связями может служить трехмассовая упругая электромеханическая система с двухдвигательным электроприводом [7]. Предлагаемый метод контрольного моделирования может быть применен для проверки правильности находже-

ния передаточной функции сложноструктурированной системы независимо от способа ее получения: аналитического или с помощью специальных программ [8–11]. Предлагаемую методику можно применять для любых классов систем: линейных, нелинейных, нестационарных, распределенных.

Список источников

1. Музылева И. В. Элементарная теория линейных систем в задачах и упражнениях. СПб. : Лань, 2017. 428 с.
2. Музылева И. В., Музылев К. А. Методология преподавания теории автоматического управления согласно современным образовательным стандартам // Современные сложные системы управления HTCS'2018 : сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. Ю. И. Еременко. М. : ИПУ РАН; Старый Оскол : СТИ НИТУ «МИСиС»; Старый Оскол : ТНТ, 2018. С. 17–19.
3. Лебедев С. К. Математические основы теории автоматического управления. URL: <http://drive.ispu.ru/elib/lebedev/index.html> (дата обращения: 26.04.2022).
4. Петрова И. Ю., Лежнина Ю. А., Евдошенко О. И. Автоматизация расчета динамических характеристик сложных параметрических структурных схем // Инженерно-строит. вестн. Прикаспия. 2019. № 1 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-rascheta-dinamicheskikh-harakteristik-slozhnyh-parametricheskikh-strukturnykh-shem> (дата обращения: 21.04.2022).
5. Сафаров И. М., Набиулин Б. К., Сафиуллина Г. М. Автоматизация расчета передаточных функций АСУ методом некасающихся контуров // ИВД. 2020. № 4 (64). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-rascheta-peredatochnykh-funktsiy-asu-metodom-nekasayuschihysya-konturov> (дата обращения: 21.04.2022).
6. Плотникова Л. В., Звегинцев А. А., Кашипова Л. А., Ишмуратов Р. А., Нуриев Н. К. Программная реализация системного анализа сложноструктурированной химико-технологической схемы нефтехимического производства // Вестн. Казан. технологич. ун-та. 2015. № 8. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/programmnaia-realizatsiya-sistemnogo-analiza-slozhnostrukturirovannoy-himiko-tehnologicheskoy-shemy-neftehimicheskogo](https://cyberleninka.ru/article/n/programmnaia-realizatsiya-sistemnogo-analiza-slozhnostrukturirovannoy-himiko-tehnologicheskoy-shemy-neftehimicheskogo-proizvodstva) (дата обращения: 21.04.2022).
7. Мещеряков В. Н. Динамика электромеханических систем подъемно-транспортных механизмов с асинхронным электроприводом : моногр. Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2002. 120 с.
8. Броннов С. А., Кривова Д. Д., Кривов Д. А. Библиотека специальных процедур для представления передаточных функций в виде типовых динамических звеньев. М. : ФИПС, 2017. № 2017664046 от 14.12.2012. URL: fips.ru (дата обращения: 26.04.2022).

References

1. Muzyleva I. V. Elementarnaya teoriya lineinykh sistem v zadachakh i uprazhneniyakh. St. Petersburg : Lan, 2017. 428 p. (In Russian).
2. Muzyleva I. V., Muzylev K. A. Metodologiya преподаvaniya teorii avtomaticheskogo upravleniya soglasno sovremennym obrazovatelnyim standartam // High Technology Control Systems (HTCS'2018) : Proceedings of the XIII International Research-to-Practice Conference / Ed. Yu. I. Eremenko. Moscow : Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences; Stary Oskol : Starooskolsky Engineering Institute of the National University of Science and Technology "MISIS"; Stary Oskol : TNT, 2018. P. 17–19. (In Russian).
3. Lebedev S. K. Matematicheskie osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. URL: <http://drive.ispu.ru/elib/lebedev/index.html> (accessed: 26.04.2022). (In Russian).
4. Petrova I. Yu., Lezhnina Yu. A., Evdoshenko O. I. Automate the Calculation of Dynamic Characteristics of Complex Parametric Structural Schemes // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2019. No. 1 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-rascheta-dinamicheskikh-harakteristik-slozhnyh-parametricheskikh-strukturnykh-shem> (accessed: 21.04.2022). (In Russian).
5. Safarov I. M., Nabiulin B. K., Safiullina G. M. Automation of Automatic Control System Transfer Functions Calculation Using the Non-Canceling Contour Method // Engineering Journal of Don. 2020. No. 4 (64). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-rascheta-peredatochnykh-funktsiy-asu-metodom-nekasayuschihysya-konturov> (accessed: 21.04.2022). (In Russian).
6. Plotnikova L. V., Zvegintsev A. A., Kashipova L. A., Ishmuratov R. A., Nuriev N. K. Programmnaia realizatsiya sistemnogo analiza slozhnostrukturirovannoi khimiko-tehnologicheskoi skhemy neftekhimicheskogo proizvodstva // Bulletin of the Technological University. 2015. No. 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmnaia-realizatsiya-sistemnogo-analiza-slozhnostrukturirovannoy-himiko-tehnologicheskoy-shemy-neftehimicheskogo> (accessed: 21.04.2022). (In Russian).
7. Meshcheryakov V. N. Dinamika elektromekhanicheskikh sistem podemno-transportnykh mekhanizmov s asinkhronnym elektroprivodom : Monograph. Lipetsk : Publishing House Lipetsk State Technical University, 2002. 120 p. (In Russian).

9. Семенов А. В. Программа построения желаемых передаточных функций дискретных систем управления с высоким порядком астатизма по передаточным функциям непрерывных прототипов в среде MATLAB. М. : ФИПС, 2014. № 2014617827 от 04.08.2014. URL: fips.ru (дата обращения: 26.04.2022).
10. Полющенко И. С. Программа для идентификации параметров линейных динамических систем. М. : ФИПС, 2018. № 2018610439 от 11.01.2018. URL: fips.ru (дата обращения: 26.04.2022).
11. Голубев А. В., Большаков В. А. Программный комплекс расчета автоматической системы регулирования для энергетических объектов. М. : ФИПС, 2014. № 2014662248 от 26.11.2014. URL: fips.ru (дата обращения: 26.04.2022).
8. Bronov S. A., Krivova D. D., Krivov D. A. Biblioteka spetsialnykh protsedur dlia predstavleniia peredatochnykh funktsii v vide tipovykh dinamicheskikh zvenev. Moscow : FIPS, 2017. No. 2017664046 of 14.12.2012. URL: fips.ru (accessed: 26.04.2022). (In Russian).
9. Semenov A. V. Programma postroeniia zhelaemykh peredatochnykh funktsii diskretnykh sistem upravleniia s vysokim poriadkom astatizma po peredatochnym funktsiiam nepreryvnykh prototipov v srede MATLAB. Moscow : FIPS, 2014. No. 2014617827 of 04.08.2014. URL: fips.ru (accessed: 26.04.2022). (In Russian).
10. Polyushchenkov I. S. Programma dlia identifikatsii parametrov lineinykh dinamicheskikh sistem. Moscow : FIPS, 2018. No. 2018610439 of 11.01.2018. URL: fips.ru (accessed: 26.04.2022). (In Russian).
11. Golubev A. V., Bolshakov V. A. Programmnyi kompleks rascheta avtomaticheskoi sistemy regulirovaniia dlia energeticheskikh obektov. Moscow : FIPS, 2014. No. 2014662248 of 26.11.2014. URL: fips.ru (accessed: 26.04.2022). (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.