

УДК 681.513

ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА ОДНОКАНАЛЬНОЙ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ*

К.М. БОБОБЕКОВ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: kurbon_111@mail.ru

Исследуется двухмассовая одноканальная система, описываемая двумя дифференциальными уравнениями второго порядка. Приводится методика расчета регулятора для объекта четвертого порядка полиномиальным методом. В классическом варианте метода синтеза степень регулятора выбирается на единицу меньше степени знаменателя объекта. В нашем случае степень регулятора выбрана равной четырем, но в знаменателе регулятора свободный член задан равным нулю с целью обеспечения астатизма. Для определения параметров регулятора использованы специальные команды пакета Matlab. Результаты моделирования показаны в виде графиков переходных процессов системы. В результате модификации методики расчета регулятора удалось уменьшить перерегулирование по сравнению с другими работами.

Ключевые слова: полиномиальный метод синтеза, одноканальная система, двухмассовый объект, управление, расчет параметров регулятора, переходный процесс

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-4-25-36

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшее распространение в синтезе линейных систем автоматического управления нашли методы, базирующиеся на представлении объекта и регулятора в пространства состояний. Сюда можно отнести методы, использующие вектор состояния, а при недоступности последнего вводят в систему наблюдатели полного или пониженного порядка, позволяющие получить оценку вектора состояния [12, 13]. Как правило, наблюдатель и регулятор располагаются в цепи обратной связи, что в некотором смысле неудобно, так как требуется вводить корректоры, обеспечивающие заданные статические свойства. Последние десятилетия активно развивается альтернативный метод

* Статья получена 21 ноября 2016 г.

синтеза, позволяющий исключить некоторые недостатки, присущие методам синтеза на основе описания системы в пространства состояний. Суть этого метода – использование полиномов и полиномиальных матриц.

При расчете многоканальных линейных систем с использованием полиномиального метода возникает ряд задач, которые ставят перед проектировщиком новые проблемы. Поэтому приходится возвратиться к одноканальным системам, чтобы разобраться с некоторыми вопросами полиномиального метода синтеза [2–4, 6, 11, 14–16]. Рассмотрим синтез для объекта, представляющего собой два консервативных звена. Этот объект исследовался в статье [2]. Данная работа в некотором смысле является продолжением работ [1, 2].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Модель объекта представляет собой систему из двух грузов массой m_1 и m_2 , подвешенных последовательно на двух пружинах жесткости k_1 и k_2 . Управляющее воздействие U приложено ко второму грузу, измеряемая переменная x_1 .

Координаты x_1 и x_2 отсчитываются от состояния равновесия. Уравнения первого звена

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1) \quad (1)$$

и второго звена – это дифференциальные уравнения второго порядка [1–3]

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k_2 (x_2 - x_1) + U. \quad (2)$$

После несложных преобразований получена **передаточная функция объекта**¹ [1]

$$W_{obj} = \frac{k_2 / m_2}{m_1 s^4 + \left(k_2 + k_1 + k_2 \frac{m_1}{m_2} \right) s^2 + k_1 \frac{k_2}{m_2}}. \quad (3)$$

¹ В статье [1] допущены некоторые неточности: на стр. 4 в седьмой строчке снизу написано $W_{obj}(s)$, а надо $W_R(s)$ – передаточная функция регулятора. Кроме того, на стр. 7 в формулах (3) и (4) – $m_1 x_1^4 / k_2$, а правильно $-m_1 x_1^{(4)} / k_2$; на этой же странице в первой формуле снизу дано $W = U / x_1$, а правильно $W = x_1 / U$. На стр. 9 в последней формуле $W_R(s)$, а должно быть $W_{cl}(s)$ или $W_{зам}(s)$.

О возможных значениях параметров объекта. Уравнение (3) будет выглядеть более компактно, если числитель и знаменатель правой части умножим на m_2 :

$$W_{obj} = \frac{k_2}{m_1 m_2 s^4 + (k_2 m_2 + k_1 m_2 + k_2 m_1) s^2 + k_1 k_2}. \quad (4)$$

В статье [1] исходя из заданной передаточной функции

$$\frac{1}{s^4 + 2s^2 + 1}, \quad (4a)$$

но не сказано, как выбраны параметры m_1 , m_2 , и k_1 . Покажем, что существуют такие значения параметров. Числитель и знаменатель уравнения (4) разделим на k_2 :

$$W_{obj} = \frac{1}{\frac{m_1 m_2}{k_2} s^4 + \left(m_2 + \frac{k_1 m_2}{k_2} + m_1 \right) s^2 + k_1}. \quad (5)$$

Из сравнения (4a) и (5) можно получить три уравнения с четырьмя неизвестными:

$$\frac{m_1 m_2}{k_2} = 1, \quad m_2 + \frac{k_1 m_2}{k_2} + m_1 = 2, \quad k_1 = 1. \quad (6a, 6б, 6в)$$

Как видно из (6в), параметр k_1 нам известен. Если подставим значения k_1 в (6б), то остается два уравнения с тремя неизвестными. Из уравнения (6a) определяем k_2 и подставим в (6б):

$$k_2 = m_1 m_2, \quad m_2 + 0,5 m_1 + m_1 = 2.$$

Отсюда получим

$$m_1 = (2 - m_2) / 1,5. \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что m_1 и m_2 могут принимать значения из некоторой области. В нашем случае зададим $m_2 = 0,5$ кг, тогда $m_1 = 1$ кг. Определили, что в статье [1] предполагается, что выбраны именно такие значения параметров.

Для упрощения выберем следующие параметры объекта: $k_1 = k_2 = 0,25$, $m_1 = 1$, $m_2 = 0,25$.

2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА

Подставим указанные значения параметров объекта в уравнение (5) и получим передаточную функцию объекта с числовыми значениями параметров

$$W_{ob}(s) = \frac{n(s)}{d(s)} = \frac{n_0}{s^4 + d_2 s^2 + d_0} = \frac{1}{s^4 + 1,5s^2 + 0,25}. \quad (8)$$

Запишем передаточную функцию регулятора

$$W_R(s) = \frac{x(s)}{y(s)} = \frac{x_4 s^4 + x_3 s^3 + x_2 s^2 + x_1 s + x_0}{s^4 + y_3 s^3 + y_2 s^2 + y_1 s}. \quad (9)$$

Для определения передаточной функции замкнутой системы [9, 17] выполним следующие действия в Matlab:

```
syms y3 y2 y1 x4 x3 x2 x1 x0 d4 d2 d0 n0 s
n=n0
d=d4*s^4+d2*s^2+d0*s^0
x=x4*s^4+x3*s^3+x2*s^2+x1*s^1+x0*s^0
y=s^4+y3*s^3+y2*s^2+y1*s^1
Wcl=collect((n*x)/((d*y)+(n*x)),s)
```

В результате получим

$$W_{cl}(s) = \frac{n_0 x_4 s^4 + n_0 x_3 s^3 + n_0 x_2 s^2 + n_0 x_1 s + n_0 x_0}{s^8 + \psi_1 s^7 + \psi_2 s^6 + \psi_3 s^5 + \psi_4 s^4 + \psi_5 s^3 + \psi_6 s^2 + \psi_7 s^1 + \psi_8}, \quad (10)$$

где введены обозначения:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= y_3, \quad \psi_2 = (d_2 + y_2), \quad \psi_3 = (d_2 y_3 + y_1), \quad \psi_4 = (d_0 + d_2 y_2 + n_0 x_4), \\ \psi_5 &= (d_0 y_3 + d_2 y_1 + n_0 x_3), \quad \psi_6 = (d_0 y_2 + n_0 x_2), \quad \psi_7 = (d_0 y_1 + n_0 x_1), \quad \psi_8 = n_0 x_0. \end{aligned}$$

Зададим желаемый **характеристический полином замкнутой системы** (ХПЗС) такой, чтобы все корни были равны $\{-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1\}$:

$$s^8 + \psi_1 s^7 + \psi_2 s^6 + \psi_3 s^5 + \psi_4 s^4 + \psi_5 s^3 + \psi_6 s^2 + \psi_7 s^1 + \psi_8 =$$

$$= s^8 + 8s^7 + 28s^6 + 56s^5 + 70s^4 + 56s^3 + 28s^2 + 8s^1 + 1.$$

Приравниваем коэффициенты по степеням последнего уравнения и коэффициенты знаменателя (10). Эту систему уравнений запишем в матричном виде:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} d_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_2 & 0 & d_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & n_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_0 & 0 & d_2 & 0 & n_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_0 & 0 & 0 & 0 & n_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_0 & 0 & 0 & 0 & n_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & n_0 \end{pmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} y_3 \\ y_2 \\ y_1 \\ x_4 \\ x_3 \\ x_2 \\ x_1 \\ x_0 \end{pmatrix}}_x + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ d_2 \\ 0 \\ d_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_c = \underbrace{\begin{pmatrix} 8 \\ 28 \\ 56 \\ 70 \\ 56 \\ 28 \\ 8 \\ 1 \end{pmatrix}}_b. \quad (11)$$

Старшие коэффициенты равны единице, и поэтому остается восемь уравнений, то есть размер матрицы $A - 8 \times 8$. Подставим значения параметров объекта $n_0 = 1$, $d_4 = 1$, $d_2 = 1,5$, $d_0 = 0,25$ в уравнение (9) и найдем вектор x . Эта операция легко делается в Matlab [8]:

$$x = \text{inv}(A)(b - c).$$

В результате параметры регулятора определены:

$$\begin{aligned} x^t &= [y_3 \quad y_2 \quad y_1 \quad x_4 \quad x_3 \quad x_2 \quad x_1 \quad x_0] = \\ &= [8 \quad 26.5 \quad 44 \quad 30 \quad -12 \quad 21.375 \quad -3 \quad 1]. \end{aligned}$$

Подставим полученные параметры в уравнение (10):

$$W_R(s) = \frac{30s^4 - 12s^3 + 21,4s^2 - 3s + 1}{s^4 + 8s^3 + 26,5s^2 + 44s}.$$

Для проверки подставим параметры объекта и вычисленные значения параметров регулятора в уравнение (11):

$$W_{cl}(s) = \frac{30s^4 - 12s^3 + 21,375x_2s^2 - 3x_1s + 1}{s^8 + 8s^7 + 28s^6 + 56s^5 + 70s^4 + 56s^3 + 28s^2 + 8s^1 + 1}.$$

Вычисления, связанные с проверкой, можно выполнить при помощи стандартных команд пакета Matlab:

```
>> syms s
>> n=1;
>> d=s^4+1.5*s^2+0.25*s^0;
>> x=30*s^4-12*s^3+21.375*s^2-3*s^1+1*s^0;
>> y=s^4+8*s^3+26.5*s^2+44*s^1;
>> D=collect((n*x),s);
>> N=collect(((d*y)+(n*x)),s);
>> Wcl=vpa((D/N),4)
```

Особое внимание следует уделить команде **collect** – «собирает» члены по степеням s , а команда **vpa** «позволяет избавиться» от целочисленной арифметики. Число 4 указывает на число значащих цифр после запятой.

Приведем переходный процесс в системе (рис. 1) для случая, когда параметры объекта равны: $k_1 = k_2 = 0,25$, $m_1 = 1$, $m_2 = 0,25$.

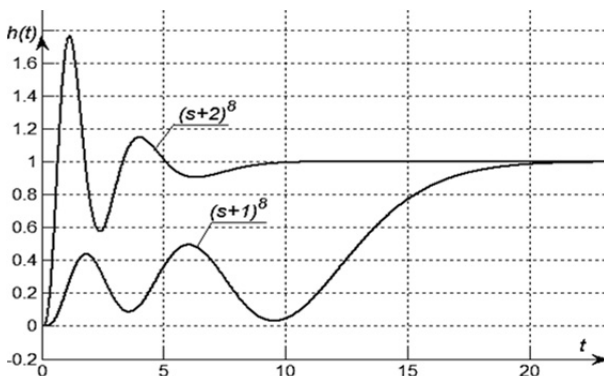


Рис. 1. График переходных процессов в системе для двух вариантов желаемого ХПЗС

Из рис. 1 видно, что в случае, когда корни ХПЗС равны $\{-2, -2, -2, -2, -2, -2, -2\}$, перерегулирование приблизительно равно $\sigma = 75\%$ и время установления равно примерно 9 с, а в случае равенства корней $\{-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1\}$ в классическом смысле перерегулирование отсутствует. Переходный процесс в системе, включающей данный объект, но с регулятором, рассчитанным в [1], имеет отрицательный выброс в пределах от трехсот до пятисот процентов (рис. 2).

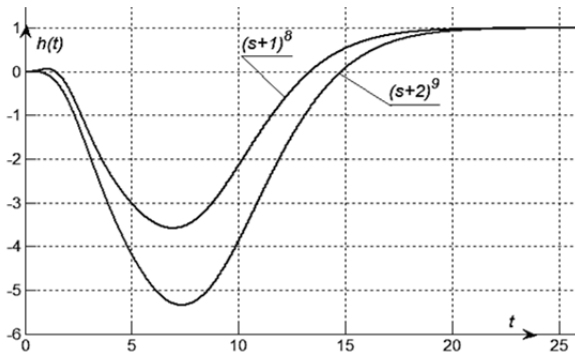


Рис. 2. Графики переходных процессов в системе

Существенное улучшение динамических показателей переходного процесса можно объяснить частичным изменением методики расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из результатов моделирования, в данной работе, как и в статье [1], объект обладает существенными колебательными свойствами и показатели переходных процессов зависят от значений параметров объекта. Кроме того, если потребовать меньшее быстродействие системы, то отрицательный выброс уменьшается. Можно рекомендовать:

- предварительно «не вводить» интегратор в объект, а потребовать в знаменателе регулятора равенство нулю свободного члена, что в итоге понижает степень регулятора на единицу, то есть упрощает последний;

- показатели переходного процесса можно существенно улучшить, если использовать так называемый двухпараметрический регулятор, то есть регулятор, состоящий из двух блоков, расположенных в канале задания и в обратной связи.

Для того чтобы при расчетах в пакете Matlab результаты вычислений не оставались в виде дробей «целое число/ целое число», следует использовать команду `vpa(..., 3)`. Внутри скобки перед запятой записывается преобразуемое уравнение, а после запятой — число три — это количество цифр, которые показываются после запятой при преобразовании от целых к вещественному виду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The modeling tests of the new PID-regulators structures / A.A. Voevoda, V.A. Zhmud', R.Y. Ishimtsev, V.M. Semibalamut // Proceedings of the 18th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modeling, ASM 2009, Palma de Mallorca, Spain, 7–9 September 2009. – [S. l.], 2009. – P. 165–168.
2. *Воевода А.А., Шоба Е.В.* Управление перевернутым маятником // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 2 (68). – С. 3–14.
3. *Воевода А.А.* Стабилизация двухмассовой системы: полиномиальный метод синтеза двухканальной системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – № 4 (58). – С. 121–124.
4. *Воевода А.А., Вороной В.В.* Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов заданной структуры // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 2 (51). – С. 214–218.
5. *Воевода А.А., Вороной В.В.* Модальный синтез регуляторов пониженного порядка методом дифференцирования характеристического полинома // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – № 1 (63). – С. 3–12.
6. *Бобобеков К.М., Воевода А.А.* Расчет параметров регулятора для стабилизации перевернутого маятника по углу отклонения // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 3 (85). – С. 18–32.
7. *Воевода А.А.* Стабилизация двухмассовой системы: модальный метод синтеза с использованием полиномиального разложения // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 195–198.
8. *Бобобеков К.М.* Об особенностях реализации двухпараметрического регулятора стабилизации положения маятника в среде Matlab // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 3 (85). – С. 115–130.
9. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – 3rd ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.
10. *Шоба Е.В., Воевода А.А., Вороной В.В.* Модальный синтез многоканального регулятора пониженного порядка с использованием «обратной» производной // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2012. – № 1 (46). – С. 15–22.
11. *Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Troshina G.V.* The parameters determination of the inverted pendulum model in the automatic control system // XIII международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2016, Новосибирск, 3–6 октября 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 1, ч. 3. – С. 180–182.

12. *Воевода А.А., Шоба Е.В.* Стабилизация двухмассовой системы: модальный метод синтеза в пространстве состояний // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 1 (59). – С. 25–34.

13. *Воевода А.А., Шоба Е.В.* Стабилизация трехмассовой системы: модальный метод синтеза в пространстве состояний с наблюдателем пониженного порядка // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 4 (62). – С. 13–24.

14. *Бобобеков К.М., Воевода А.А.* Полиномиальный метод синтеза ПИ(Д)-регулятора для неминимально фазового объекта // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 4 (82). – С. 7–20.

15. *Шоба Е.В.* Модальный метод синтеза многоканальных динамических систем с использованием полиномиального разложения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 192 с.

16. *Вороной В.В.* Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов пониженного порядка: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 173 с.

17. *Doyle J.C., Francis B., Tannenbaum A.* Feedback control theory. – New York: Macmillan Publ., 1990. – 198 p.

Бобобеков Курбонмурод Мулломиракович, специалист по технологиям машиностроения, 2008–2013 – кафедра «Технология машиностроения, металлоорежущие станки и инструменты» механико-технологического факультета Таджикского технического университета (ТТУ) им. акад. М.С. Осими. С 2013 по 2015 г. ассистент Таджикского технического университета, с 2015 г. аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. В настоящее время специализируется в области синтеза систем управления техническими системами. Имеет несколько публикаций. E-mail: kurbon_111@mail.ru

A polynomial method for the synthesis of single-channel two-mass system *

K.M. Bobobekov

Novosibirsk State Technical University, 630087, Novosibirsk, the avenue K. Marx, 20, the post-graduate student of Department "Automatics" of Novosibirsk state technical university, e-mail: kurbon_111@mail.ru

Is investigated the single-channel two-mass system described by two second order differential equations. Is presented the technique of calculating the regulator for the object of the fourth order polynomial method. In the classic version of the synthesis method of the degree of regulator is chosen by one is less than of the degree of the denominator the object. In this case, the degree of regulator is chosen equal to four, but in the denominator of the regulator free term is set to zero to ensure astatic. To determine the parameters of the regulator are used special teams Matlab package. The simulation results are shown in graphs system transients. As a result of the modification method of calculating the regulator was able to reduce the overshoot compared with other works.

Keywords: polynomial synthesis method, a single-channel system, dual-mass object, control, calculation of the controller parameters, the transition process

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-4-25-36

REFERENCES

1. Voevoda A.A., Zhmud' V.A., Ishimtsev R.Y., Semibalamut V.M. The modeling tests of the new PID-regulators structures. *Proceedings of the 18th IASTED International conference on applied simulation and modeling, ASM 2009*, Palma de Mallorca, Spain, 7–9 September 2009, pp. 165–168.
2. Voevoda A.A., Shoba E.V. Upravlenie perevernutym mayatnikom [Management of the inverted pendulum]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 2 (68), pp. 3–14.
3. Voevoda A.A. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: polinomial'nyi metod sinteza dvukhkanal'noi sistemy [Stabilization of two-mass system: polynomial method of synthesis of two-channel system]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 4 (58), pp. 121–124.
4. Voevoda A.A., Voronoi V.V. Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov zadannoi struktury [Polynomial method for calculating multi-channel controllers of a given structure]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudu-*

* Received 21 November 2016.

darstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university, 2013, no. 2 (51), pp. 214–218.

5. Voevoda A.A., Voronoi V.V. Modal'nyi sintez regulyatorov ponizhennogo poryadka metodom differentsirovaniya kharakteristicheskogo polinoma [Modal design of reduced order controllers by method of differentiation of the characteristic polynomial]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 1 (63), pp. 3–12.

6. Bobobekov K.M., Voevoda A.A. Raschet parametrov regulyatora dlya stabilizatsii perevernutogo mayatnika po uglu otkloneniya [Calculation of controller parameters for the stabilization of the inverted pendulum by corner deviation]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (85), pp. 18–32.

7. Voevoda A.A. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: modal'nyi metod sinteza s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya [Stabilisation of two-mass system by a modal method of synthesis with polynomial factorization]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (38), pp. 195–198.

8. Bobobekov K.M. Ob osobennostyakh realizatsii dvukhparametricheskogo regulyatora stabilizatsii polozheniya mayatnika v srede Matlab [On the peculiarities of realization the two-parameter regulator of stabilization the position pendulum in environment MATLAB]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (85), pp. 115–130.

9. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 3rd ed. New York, Oxford University Press, 1999. 334 p.

10. Shoba E.V., Voevoda A.A., Voronoy V.V. Modal'nyi sintez mnogokanal'nogo regulyatora ponizhennogo poryadka s ispol'zovaniem "obratnoi" proizvodnoi [Modal synthesis of multi-channel low-order controller using the "reverse" derivative principle for three-mass system]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (46), pp. 15–22.

11. Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Troshina G.V. The parameters determination of the inverted pendulum model in the automatic control system. *XIII mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya" APEP-2016* [Proceedings of the XIII International Conference "Actual problems of electronic instrument engineering", (APEIE-2016)], Novosibirsk, 3–6 October 2016, vol. 1, pt. 3, pp. 180–182.

12. Voevoda A.A., Shoba E.V. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: modal'nyi metod sinteza v prostranstve sostoyanii [Stabilisation of two-mass system: a modal method of synthesis with using state space]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (59), pp. 25–34.

13. Voevoda A.A., Shoba E.V. Stabilizatsiya trekhmassovoi sistemy: modal'nyi metod sinteza v prostranstve sostoyanii s nablyudatelem ponizhennogo poryadka [Stabilisation of three-mass system: a modal method of synthesis in state space with reduced-order observer]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 4 (62), pp. 13–24.

14. Bobobekov K.M., Voevoda A.A. Polinomial'nyi metod sinteza PI(D)-regulyatora dlya neminimal'no fazovogo ob"ekta [Polynomial method synthesis of PI(D) regulator for non-minimum-phase object]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 4 (82), pp. 7–20.

15. Shoba E.V. *Modal'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [The modal method for the synthesis of multi-channel dynamic systems using a polynomial expansion. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 192 p.

16. Voronoi V.V. *Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov ponizhennogo poryadka*. Diss. kand.tekhn. nauk [A polynomial method for calculating the multi-channel controllers low order. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 173 p.

17. Doyle J.C., Francis B., Tannenbaum A. *Feedback control theory*. New York, Macmillan Publ., 1990. 198 p.