

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ

УДК681.513

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-7-17

СИНТЕЗ ОДНОКАНАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАКТОРИЗАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ОБЪЕКТА *

А.А. ВОЕВОДА¹, К.М. БОБОБЕКОВ², В.И. ШИПАГИН³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики. E-mail: uscit@uscit.ru

² 630087, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, соискатель кафедры автоматики. E-mail: kurbon_111@mail.ru

³ 630087, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, соискатель кафедры автоматики. E-mail: shipagin@mail.ru

В рамках настоящей статьи рассматривается модифицированная методика синтеза одноканальных регуляторов с использованием факторизации полиномов передаточной функции объекта на основе использования матрицы Сильвестра, что является основой для формализованного решения задачи синтеза многоканальных регуляторов в системах управления взаимосвязанными процессами и устройствами. Предлагается метод синтеза одноканальных регуляторов с использованием факторизации полиномов числителя и знаменателя передаточной функции объекта, что позволяет «сохранить» левые нули и полюса объекта, удаленные от мнимой оси, в замкнутой системе. Проиллюстрирован пример синтеза одноканальных регуляторов, управляющих не строго правильными объектами второго порядка, с использованием методов факторизации объекта, что подтверждает работоспособность предлагаемого метода.

Ключевые слова: передаточная функция объекта, система управления, одноканальная система, метод факторизации, полиномиальный синтез, одноканальные регуляторы

ВВЕДЕНИЕ

В теории автоматического управления задача синтеза регуляторов систем автоматического управления занимает очень важное место. Системы автоматического управления обеспечивают заданный переходный процесс измене-

* Статья получена 15 марта 2019 г.

ния контролируемой величины или основные качественные показатели в различных технических системах. Большое количество литературы посвящено синтезу регуляторов различных порядков.

В современном мире растет количество технических объектов, представляющих собой по своей сути динамическую систему. Вследствие развития и усложнения систем управления динамическими системами задача синтеза регуляторов является актуальной, несмотря на большой набор уже существующих методов и алгоритмов решения. Например, в [8] представлен алгоритм синтеза одноканальных регуляторов с использованием факторизации передаточной функции объектов. В настоящей работе предлагается доработка этого алгоритма. Под факторизацией передаточной функции подразумевается представление ее в виде $w_{ob}(s) = Z^-(s) \cdot Z^+(s) / P^-(s) \cdot P^+(s)$, где $Z^-(s)$ и $P^-(s)$ – полиномы, корни которых расположены в открытой левой полуплоскости комплексной плоскости \mathbb{C} , а у $Z^+(s)$ и $P^+(s)$ – в правой полуплоскости.

1. МЕТОД ФАКТОРИЗАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ОБЪЕКТА

Осуществим факторизацию ПФ объекта $w_{ob}(s) = n(s) / d(s)$, где $\deg n(s) \leq \deg d(s) = n$:

$$w_{ob}(s) = Z^-(s) \cdot Z^+(s) / P^-(s) \cdot P^+(s).$$

Здесь $Z^-(s)$, $P^-(s)$ – полиномы, корни которых лежат в левой открытой полуплоскости комплексной плоскости J ; $Z^+(s)$, $P^+(s)$ – полиномы, корни которых лежат в правой замкнутой полуплоскости комплексной плоскости \mathbb{C} ; $\deg Z^-(s) \cdot Z^+(s) = l$, $\deg Z^+(s) = l^*$, $\deg Z^-(s) = l - l^*$, $\deg P^-(s) \cdot P^+(s) = n$, $\deg P^+(s) = n^*$, $\deg P^-(s) = n - n^*$, $l \leq n$, $n^* \leq n$, $l^* \leq l$.

В соответствии с алгоритмом синтеза регулятора полного порядка пусть порядок числителя регулятора m будет равен порядку знаменателя регулятора и на единицу меньше порядка объекта $m = n - 1$ (можно выбрать регулятор и повышенного порядка). Рассмотрим случай, когда все левые нули и полюса объекта введены в регулятор:

$$w_r(s) = P^-(s) \cdot x(s) / Z^-(s) \cdot y(s),$$

где $\deg P^-(s) \cdot x(s) = n-1$, $\deg x(s) = n-1-(n-n^*) = n^*-1$, $\deg Z^-(s) \cdot y(s) = n-1$, $\deg y(s) = n-1-(l-l^*) = n-1-l+l^*$. Структурная схема системы управления с факторизацией может быть изображена в виде

$$v(s) \rightarrow e(s) = v(s) - y(s) \rightarrow w_r(s) \rightarrow w_{ob}(s) \rightarrow y(s).$$

После сокращения структура принимает вид

$$v(s) \rightarrow e(s) = v(s) - y(s) \rightarrow \tilde{w}_r(s) \rightarrow \tilde{w}_{ob}(s) \rightarrow y(s),$$

где $\tilde{w}_{ob}(s) = n(s)/d(s)$, $\tilde{w}_r(s) = x(s)/y(s)$. Если нулей объекта справа не больше, чем полюсов объекта справа, $n^* \geq l^*$, тогда можем записать: $n-1-l+l^* = n^*-1$, откуда $n-l+l^* = n^*$, или $n - \underbrace{(l-l^*)}_{\deg Z^-(s)} = n^*$, тогда $n - (n - (l-l^*)) = n - n^*$, откуда $l-l^* = n - n^*$, где $l-l^* = \deg Z^-(s)$, $n - n^* = \deg P^-(s)$. Это говорит о том, что количество нулей и полюсов объекта, включаемых в регулятор, одинаково.

2. ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА

Рассмотрим задачу синтеза регулятора с использованием факторизации объекта для стабилизации неустойчивого объекта с ПФ $w_{ob}(s) = n(s)/d(s) = (s+2)(s-3)/(s+3)(s-4)$, где $Z^-(s) = (s+2)$, $P^-(s) = (s+3)$, $(\deg Z^-(s) = \deg P^-(s))$. Полиномы $Z^-(s)$ и $P^-(s)$ ПФ объекта учтем в ПФ регулятора $w_r(s) = x(s)(s+3)/y(s)(s+2)$. После сокращения новый объект представим в виде $\tilde{w}_{ob}(s) = \tilde{n}(s)/\tilde{d}(s) = (s-3)/(s-4)$, а регулятор в виде $\tilde{w}_r(s) = x(s)/y(s)$, где $x(s) = x_1s + x_0$, $y(s) = y_1s$. Очевидно, что порядок регулятора $\tilde{w}_r(s)$ — m равен порядку объекта $\tilde{w}_{ob}(s)$ — $n^* = 1$; для обеспечения астатических свойств берем $y_0 = 0$. Тогда порядок ХПЗС $\deg c(s) = m + n^* = 2$, пусть $c(s) = (s+1)^2$. Составим уравнение $\Im \Re = \aleph$, где

$\mathfrak{I} = (x_0 \ y_1 \ x_1)$, $\mathfrak{K} = (1 \ 2 \ 1)$, $\mathfrak{R} = (r_1^t \ r_2^t \ r_3^t)^t$, $r_1 = (-3 \ 1 \ 0)$, $r_2 = (0 \ -4 \ 1)$, $r_3 = (0 \ -3 \ 1)$, откуда $\mathfrak{I} = \mathfrak{K}\mathfrak{R}^{-1}$, тогда $\mathfrak{I} = (-0,333 \ -5,333 \ 6,333)$. Итак, получили $\tilde{w}_r(s) = (6,333s - 0,333) / (-5,333s)$. Исходный регулятор с учетом ранее сокращенных множителей $s + 2$ и $s + 3$ имеет вид

$$w_r(s) = (6,333s^2 + 18,67s - 1) / (-5,333s^2 - 10,67s).$$

Передаточная функция замкнутой системы без сокращения

$$w_{cl}(s) = \frac{6,333s^4 + 12,34s^3 - 57,67s^2 - 111s + 6}{s^4 + 7s^3 + 17s^2 + 17,02s + 6},$$

после сокращения $w_{cl}(s) = (6,333s^2 - 19,33s + 1) / (s^2 + 2s + 1)$.

В результате получен регулятор, обеспечивающий устойчивость системы управления со свойством астатизма, также «сохранены» в замкнутой системе устойчивые нули и полюса объекта. Таким образом, если у ПФ объекта имеются множители $Z^-(s)$ и $P^-(s)$ в числителе и знаменателе, корни которых лежат в открытой левой полуплоскости \mathbb{C} на достаточном удалении от мнимой оси [5, 2], то можно воспользоваться факторизацией объекта. Далее воспользоваться алгоритмом синтеза одноканальных регуляторов, приведенным в [15], и, наконец, восстановить в ХПЗС корни, которые сократили. Отметим, что в [4] этот вопрос исследован подробно и даны соответствующие рекомендации, однако без использования матрицы Сильвестра.

3. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА ОДНОКАНАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАКТОРИЗАЦИИ¹

Модифицированный метод состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Получить описание объекта в виде набора дифференциальных уравнений и перейти к изображениям либо сразу получить операторную форму записи ПФ $w_{ob}(s) = n(s) / d(s)$, где $\deg n(s) \leq \deg d(s) = n$.

¹ Данный алгоритм следует использовать, если у объекта имеются левые корни, которые можно отнести к регулятору. Этот алгоритм несколько отличается от алгоритма, приведенного в работе [8, с. 89]. В частности, добавлены шаги 4-й и 9-й, а шаг 3-й модифицирован.

Шаг 2. Осуществить факторизацию передаточной функции, т. е. найти представление: $w_{ob}(s) = Z^-(s) \cdot Z^+(s) / P^-(s) \cdot P^+(s)$. Предполагается, что $\deg Z^-(s) = \deg P^-(s)$.

Шаг 3. Полиномы $Z^-(s)$ и $P^-(s)$ включить в регулятор: $w_r(s) = P^-(s) \cdot x(s) / Z^-(s) \cdot y(s)$. С целью упрощения процедуры расчета регулятора полиномы $Z^-(s)$ и $P^-(s)$ объекта и регулятора сокращаются, но необходимо после вычислений параметров регулятора их восстановить. Тогда передаточная функция объекта $\tilde{w}_{ob}(s) = Z^+(s) / P^+(s)$, а регулятора $\tilde{w}_r(s) = x(s) / y(s)$, причем $\deg P^+(s) = n^*$ и $\deg x(s) = \deg y(s) = m$.

Шаг 4. Далее можно использовать предыдущий алгоритм. Выбрать порядок регулятора $m \geq n^* - 1$ и выписать полиномы числителя и знаменателя регулятора.

Шаг 5. Выписать ПФЗС:

$$w_{cl}(s) = \frac{\tilde{w}_r(s) \cdot \tilde{w}_{ob}(s)}{1 + \tilde{w}_r(s) \cdot \tilde{w}_{ob}(s)} = \frac{Z^+(s) \cdot x(s)}{Z^+(s) \cdot x(s) + P^+(s) \cdot y(s)}$$

и ХПЗС: $c(s) = Z^+(s) \cdot x(s) + P^+(s) \cdot y(s)$.

Шаг 6. Найти степень желаемого ХПЗС:

$$c(s) = c_f s^f + c_{f-1} s^{f-1} + \dots + c_1 s + c_0,$$

где $f = m + n^*$.

Шаг 7. Перейти от полиномиального уравнения к числовому матричному уравнению $\Im \Re = \aleph$.

Шаг 8. Решить $\Im \Re = \aleph$ и сформировать модель регулятора с учетом полиномов $Z^-(s)$ и $P^-(s)$.

Шаг 9. Восстановить в ПФЗС полиномы, которые были сокращены, т. е. записать

$$w_{cl}(s) = \frac{n(s) \cdot x(s) \cdot Z^-(s) \cdot P^-(s)}{Z^-(s) \cdot P^-(s) \cdot c(s)}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модификация метода синтеза одноканальных регуляторов с использованием факторизации передаточной функции объекта, позволяющая «сохранять» левые нули и полюса объекта, достаточно удаленные от мнимой оси, в замкнутой системе. Предложенный метод детализирует и уточняет методику синтеза одноканальных регуляторов, изложенную в [8, с. 89], и позволяет формализовать процедуру расчета параметров регулятора как полного, так и повышенного порядка. Использование регуляторов повышенного порядка приводит к появлению свободных параметров, которые можно использовать для обеспечения заданного расположения нулей системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kailath T.* Linear systems. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1980. – 350 p.
2. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – 3rd ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.
3. *Гайдук А.Р., Беляев В.Е., Пьявченко Т.А.* Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: учебное пособие. – 2-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2011. – 464 с.
4. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.
5. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.
6. *Гайдук А.Р.* Теория автоматического управления: учебник. – М.: Высшая школа, 2010. – 415 с.
7. *Вороной В.В.* Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов пониженного порядка: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 173 с.
8. *Шоба Е.В.* Модальный метод синтеза многоканальных динамических систем с использованием полиномиального разложения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 192 с.
9. *Воевода А.А., Бобобеков К.М.* Решение переопределенной линейной системы уравнений при полиномиальном синтезе регуляторов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 4 (56). – С. 84–99.

10. Бобобеков К.М., Воевода А.А. Синтез двухканальной системы полиномиальным методом: обеспечение астатизма // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 1 (83). – С. 7–19.

11. Воевода А.А. Стабилизация двухмассовой системы: полиномиальный метод синтеза двухканальной системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – № 4 (58). – С. 121–124.

12. Воевода А.А., Вороной В.В. Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов заданной структуры // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 2 (51). – С. 214–218.

13. Воевода А.А., Бобобеков К.М. Синтез линейных многоканальных регуляторов с использованием структурных преобразований // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2017. – № 3. – С. 7–20.

14. Бобобеков К.М., Тауров Э.Ш. Вычисление взаимно простого разложения для одноканальных передаточных функций с использованием матрицы Сильвестра // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 1 (91). – С. 7–30.

15. Бобобеков К.М. Полиномиальный метод синтеза одноканальной двухмассовой системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 4 (86). – С. 25–36.

16. Бобобеков К.М. О нормировании полиномов знаменателей объекта и регулятора при полиномиальном методе синтеза // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 4 (86). – С. 7–24.

17. Воевода А.А. Стабилизация двухмассовой системы: модальный метод синтеза с использованием полиномиального разложения // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 195–198.

18. Шоба Е.В., Воевода А.А., Вороной В.В. Модальный синтез многоканального регулятора пониженного порядка с использованием «обратной» производной на примере трехмассовой системы // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1 (46). – С. 15–22.

19. 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.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 300 публикаций. E-mail: ucit@ucit.ru

Бобобеков Курбонмурод Мулломиракович, специалист по технологиям машиностроения, 2008–2013 – кафедра «Технология машиностроения, металло-режущие 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 более 30 публикаций. E-mail: kurbon_111@mail.ru

Шипагин Виктор Игоревич, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. В настоящее время специализируется в области синтеза систем управления техническими системами. E-mail: shipagin@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-7-17

Synthesis of single-channel regulators using factorization of the object transfer function*

A.A. Voevoda¹, K.M. Bobobekov², V.I. Shipagin³

¹Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: ucit@ucit.ru

²Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student of Department "Automatics". E-mail: kurbon_111@mail.ru

³Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student of Department "Automatics". E-mail: shipagin@mail.ru

In the framework of this article, we consider a modified method for synthesizing single-channel controllers using factorization of polynomials of the transfer function of an object based on the use of the Sylvester matrix, which is the basis for a formalized solution of the synthesis problem of multi-channel controllers in control systems for interconnected processes and devices. A method for the synthesis of single-channel controllers using factorization of polynomials of the numerator and denominator of the transfer function of the object is proposed, which allows you to "save" the left zeros and poles of the object, remote from the imaginary axis, in a closed system. An example of the synthesis of single-channel controllers that control not strictly correct second-order objects using the factorization methods of the object is illustrated, which confirms the efficiency of the proposed method.

Keywords: object transfer function, control system, single-channel system, factorization method, polynomial synthesis, single-channel regulators

* 15 March 2019.

REFERENCES

1. Kailath T. *Linear systems*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1980. 350 p.
2. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 3rd ed. New York, Oxford University Press, 1999. 334 p.
3. Gaiduk A.R., Belyaev V.E., P'yavchenko T.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya v primerakh i zadachakh s resheniyami v MATLAB* [Theory of automatic control in examples and problems with solutions in MATLAB]. 2nd ed., rev. St. Petersburg, Lan' Publ., 2011. 464 p.
4. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. T. 2. *Mnogomernye, nelineinye, optimal'nye i adaptivnye sistemy* [The theory of automatic control. Vol. 2. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 464 p.
5. Gaiduk A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nyi podkhod)* [Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach)]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 360 p.
6. Gaiduk A.R. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [The theory of automatic control]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2010. 415 p.
7. 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.
8. 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.
9. Voevoda A.A., Bobobekov K.M. Reshenie pereopredelennoi lineinoi sistemy uravnenii pri polinomial'nom sinteze regulyatorov [Solution of an overdetermined linear system of equations for polynomial synthesis of regulators]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2017, no. 4 (56), pp. 84–99.
10. Bobobekov K.M., Voevoda A.A. Sintez dvukhkanal'noi sistemy polinomial'nym metodom: obespechenie astatizma [Synthesis of two-channel system polynomial method: ensuring astatic]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 1 (83), pp. 7–19.
11. 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 Novosibir-*

skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – *Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 4 (58), pp. 121–124.

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

13. Voevoda A.A., Bobobekov K.M. Sintez lineinykh mnogokanal'nykh regulyatorov s ispol'zovaniem strukturnykh preobrazovaniy [Synthesis of linear multi-channel regulators using structural transformations]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2017, no. 3, pp. 7–20.

14. Bobobekov K.M., Taurov E.Sh. Vychislenie vzaimno prostogo razlozheniya dlya odnokanal'nykh peredatochnykh funktsii s ispol'zovaniem matritsy Sil'vestra [Calculation of a mutually simple expansion for single-channel transfer functions using the Sylvester matrix]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (91), pp. 7–30.

15. Bobobekov K.M. Polinomial'nyi metod sinteza odnokanal'noi dvukhmassovoi sistemy [A polynomial method for the synthesis of single-channel two-mass system]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4 (86), pp. 25–36.

16. Bobobekov K.M. O normirovanii polinomov znamenatelei ob'ekta i regulyatora pri polinomial'nom metode sinteza [About rationing polynomials denominator object and regulator during polynomial method of synthesis]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4 (86), pp. 7–24.

17. 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.

18. Shoba E.B., Voevoda A.A., Voronoy V.V. Modal'nyi sintez mnogokanal'nogo regulyatora ponizhennogo poriyadka s ispol'zovaniem "obratnoi" proizvodnoi na primere trekhmassovoi sistemy [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.

19. Voevoda A.A., Voronoy V.V. Modal'nyi sintez regul'yatorov 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.

Для цитирования:

Воевода А.А., Бобобеков К.М., Шипагин В.И. Синтез одноканальных регуляторов с использованием факторизации передаточной функции объекта // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 2 (95). – С. 7–17. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-7-17.

For citation:

Voevoda A.A., Bobobekov K.M., Shipagin V.I. Sintez odnokanal'nykh regul'yatorov s ispol'zovaniem faktorizatsii peredatochnoi funktsii ob"ekta [Synthesis of single-channel regulators using factorization of the object transfer function]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (95), pp. 7–17. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-7-17.