

*АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

УДК 681.513

**ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА
ПИ(Д)-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НЕМИНИМАЛЬНО
ФАЗОВОГО ОБЪЕКТА***

К.М. БОБОБЕКОВ¹, А.А. ВОЕВОДА²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: kurbon_111@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики. E-mail: ucit@ucit.ru

Рассматривается полиномиальный метод синтеза одноканальных стационарных линейных объектов. Приводится иллюстрация расчетов на двух примерах. Первый пример – это синтез ПИ-регулятора для неустойчивого неминимального фазового объекта второго порядка, что соответствует регулятору неполного порядка. Синтез осуществляется с использованием критерия Гурвица посредством построения области устойчивости в плоскости параметров регулятора. Особенность переходного процесса системы – это колебательный характер с большим первым отрицательным выбросом. И второй пример – это расчет регулятора полного порядка – модифицированного ПИД-регулятора – также для неустойчивого неминимально-фазового объекта. Особенность расчета данного примера состоит в том, что для объекта второго порядка достаточно взять регулятор первого порядка. Но для обеспечения астатизма необходимо свободный член полинома знаменателя передаточной функции регулятора взять равным нулю, что приводит к необходимости выбора регулятора второго порядка. Переходный процесс системы носит колебательный характер с небольшим отрицательным выбросом, после которого следуют положительный и отрицательный выбросы. С технической точки зрения система с ПИД-регулятором имеет более удовлетворительный вид.

Ключевые слова: полиномиальный метод синтеза, ПИ(Д)-регулятор, неминимально-фазовый объект, желаемый характеристический полином, регулятор полного порядка, регулятор пониженного порядка, одноканальная система, астатизм, устойчивость

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-4-7-20

* Статья получена 19 августа 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

При синтезе линейных стационарных одноканальных систем автоматического управления, если не принимать во внимание частотные методы, в основном используют синтез в пространстве состояний, а также полиномиальный метод синтеза.

Реализация закона управления, организованного по принципу обратной связи по состоянию, требует обязательного измерения всех компонент вектора состояний. В действительности же имеются измерители лишь части компонент этого вектора. Вот почему в обратную связь вместо вектора состояний заводится лишь некоторая оценка этого вектора, формируемая наблюдателем, который может быть полного либо пониженного порядка. Таким образом, при синтезе модальным методом в пространстве состояний кроме регулятора, который стоит в обратной связи, необходимо ввести наблюдатель вектора состояний полного или пониженного порядка, который находит оценки недостающих компонент вектора состояний.

Кратко опишем полиномиальный метод синтеза [1, 5, 16]. Пусть рассматривается объект управления, описываемый строго правильной (strictly proper) передаточной функцией

$$W_{obj}(s) = \frac{n(s)}{d(s)} = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_0}, \quad (1)$$

где $m < n$ ¹.

Передаточная функция регулятора, который стоит в прямом канале в отличие от методов синтеза в пространства состояний, выбирается вида

$$W_R(s) = \frac{x(s)}{y(s)} = \frac{x_{n-1} s^{n-1} + x_{n-2} s^{n-2} + \dots + x_0}{y_{n-1} s^{n-1} + y_{n-2} s^{n-2} + \dots + y_0}, \quad (2)$$

где содержится $2n$ неизвестных² x_i и y_i , $i = \overline{1, n}$.

Система управления представляет собой последовательное соединение регулятора и объекта, охваченных отрицательной обратной связью. Опишем систему уравнениями:

$$y = W(s)u, \quad u = W_r(s)e, \quad e = v - y. \quad (3)$$

¹ Можно положить коэффициент при старшем члене полинома знаменателя $d_n = 1$.

² Коэффициент при старшем члене полинома знаменателя можно также взять равным единице $y_{n-1} = 1$, что позволит уменьшить число неизвестных x_i, y_j .

Передаточная функция замкнутой системы с учетом (1)–(3) равна

$$W_{\text{sys}}(s) = \frac{W_R(s)W_{\text{obj}}(s)}{1 + W_R(s)W_{\text{obj}}(s)} = \frac{n(s)x(s)}{n(s)x(s) + d(s)y(s)}, \quad (4)$$

т. е. характеристический полином замкнутой системы

$$\chi(s) = n(s)x(s) + d(s)y(s) \quad (5)$$

будет иметь степень $2n-1$ и с $2n$ неизвестными коэффициентами x_i, y_j . Коэффициенты полинома $\chi(s)$ обозначены $\chi_{2n-1}, \dots, \chi_0$. Приравнявая коэффициенты при членах с одинаковыми степенями, получаем систему линейных уравнений

$$Ax = b, \quad (6)$$

где A включает коэффициенты объекта, x – искомые коэффициенты регулятора, b – коэффициенты желаемого характеристического полинома. Рассмотрим полиномиальный метод синтеза на примерах.

1. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПИ-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НЕУСТОЙЧИВОГО НЕМИНИМАЛЬНО ФАЗОВОГО ОБЪЕКТА ВТОРОГО ПОРЯДКА

Зададим передаточную функцию объекта следующего вида:

$$W_{\text{obj}}(s) = \frac{s-1}{s^2+1}.$$

Структурная схема системы (рис. 1) соответствует уравнениям (3).

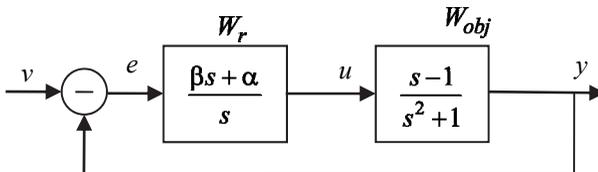


Рис. 1. Структурная схема системы

Запишем характеристический полином замкнутой системы (ХПЗС)

$$s(s^2 + 1) + (\alpha + \beta s)(s-1) = \chi(s),$$

откуда

$$s^3 + \beta s^2 + (1 + \alpha - \beta)s - \alpha = s^3 + \beta s^2 + (1 + \alpha - \beta)s - \alpha .$$

Для определения коэффициентов α и β используем критерий устойчивости Гурвица. Для полинома третьей степени

$$a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s - a_3 s^0$$

матрица Гурвица

$$H = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

довольно простая. Из критерия устойчивости Гурвица следует:

1) $\forall_i a_i > 0$, то есть $a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0$, что соответствует выполнению необходимых условий устойчивости (рис. 2):

$$\beta > 0, \quad 1 + \alpha - \beta > 0, \quad -\alpha > 0; \quad (8)$$

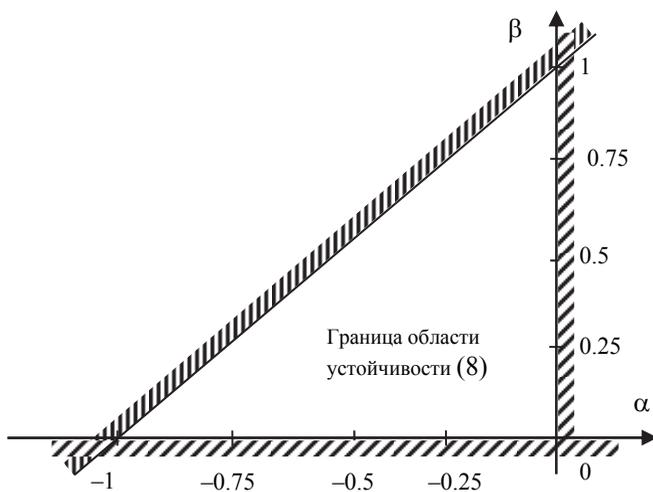


Рис. 2. График границы области устойчивости (8)

2) $a_1 a_2 > a_0 a_3$, что соответствует выполнению достаточных условий устойчивости. Для нашего случая матрица Гурвица следующая:

$$H = \begin{bmatrix} \beta & -\alpha & 0 \\ 1 & (1+\alpha-\beta) & 0 \\ 0 & \beta & -\alpha \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Выпишем второе условие устойчивости, что совместно с (8) является достаточным условием устойчивости:

$$\beta + \beta\alpha - \beta^2 + \alpha > 0.$$

Сгруппируем члены относительно β :

$$\beta^2 - (1+\alpha)\beta - \alpha < 0. \quad (10)$$

Построим границы области устойчивости по уравнению (10) в плоскости параметров (α, β) , перейдем к равенству

$$\beta^2 - (1+\alpha)\beta - \alpha = 0.$$

Решим последнее уравнение, определим дискриминант

$$D = (-\alpha - 1)^2 + 4\alpha = \alpha^2 + 2\alpha + 1 + 4\alpha = \alpha^2 + 6\alpha + 1$$

и корни квадратного уравнения. Получаем еще неравенства, определяющие совместно с (8) область устойчивости

$$\beta_1 \leq \frac{(\alpha + 1) + \sqrt{\alpha^2 + 6\alpha + 1}}{2}, \quad \beta_2 \leq \frac{(\alpha + 1) - \sqrt{\alpha^2 + 6\alpha + 1}}{2}. \quad (11)$$

Параметр регулятора β должен принимать вещественное значение, т. е. подкоренное выражение $\sqrt{\alpha^2 + 6\alpha + 1}$ должно принимать неотрицательное значение. Из анализа квадратного уравнения $\alpha^2 + 6\alpha + 1 = 0$ следует, что $\alpha \geq -0.17$ или $\alpha \leq -5.83$. С учетом ограничений рис. 2 остается одно условие $\alpha \geq -0.17$. Вычисляем границы по неравенствам (11) для $-0.18 \leq \alpha \leq 0$.

Область устойчивости

α	0	-0.02	-0.04	-0.06	-0.08	-0.1	-0.12	-0.14	-0.16	-0.18
β_1	1	0.963	0.9	0.87	0.82	0.75	0.71	0.64	0.55	0.4
β_2	0	0.019	0.04	0.066	0.094	0.126	0.165	0.213	0.283	0.4

По данным таблицы построим область устойчивости (рис. 3). Базовые значения параметров регулятора выбираем равными $(-0.1, 0.4)$. Соответствующая точка показана на рис. 3 крестиком. Область допустимых вариаций параметров регулятора отмечен а заштрихованным прямоугольником.

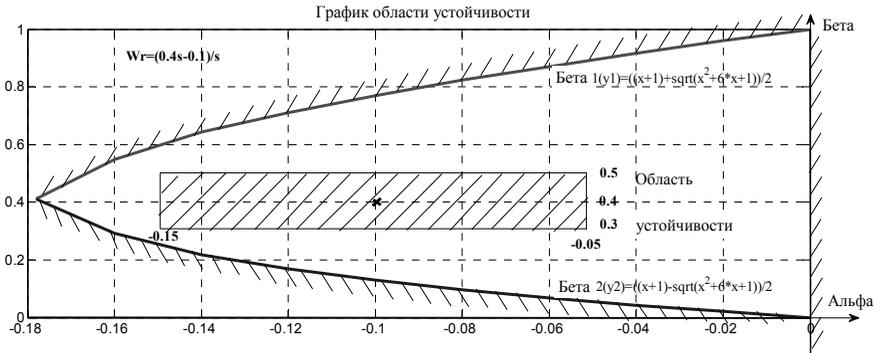


Рис. 3. Область устойчивости в плоскости параметров регулятора (α, β)

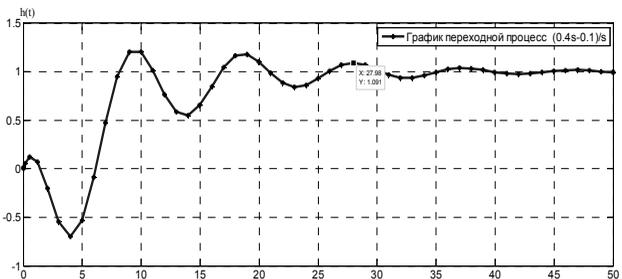


Рис. 4. График переходного процесса

Из графика переходного процесса (рис. 4) определяем время переходного процесса $t_{\text{пп}} = 27 \text{ с}$. В классическом смысле перерегулирование равно примерно $\sigma = 20 \%$. Следует отметить, что система начинает движение в противоположном от задания направлении. Процесс носит колебательный характер, последовательность амплитуд следующая: $(+0.2, -0.7, +1.6, +0.55)$.

Из графиков переходных процессов (рис. 5) для различных значений параметров объекта (вариация параметров объекта в пределах 10 %) видно, что при вариации параметров объекта возможно увеличение перерегулирования до 100 %.

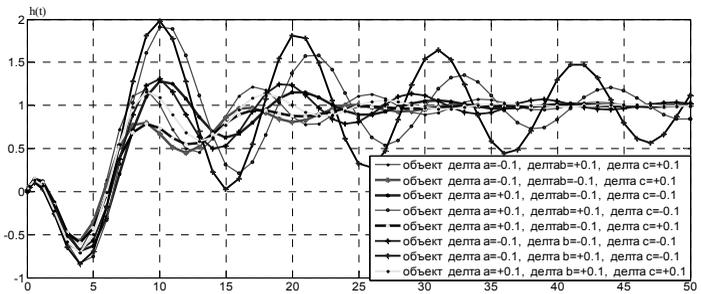


Рис. 5. Переходные процессы в системе при вариации параметров объекта

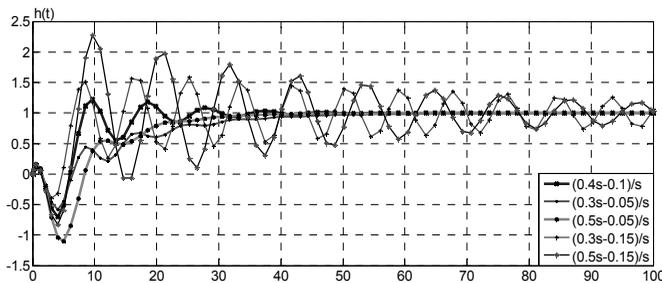


Рис. 6. Переходные процессы в системе при вариации параметров регулятора

При вариации параметров регулятора можно добиться практического исчезновения колебательности, но появляется отрицательный выброс.

2. ПРИМЕР СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА ПОЛНОГО ПОРЯДКА ДЛЯ НЕУСТОЙЧИВОГО НЕМИНИМАЛЬНО ФАЗОВОГО ОБЪЕКТА

При объекте степени (1, 2), где 1 и 2 – это степени полиномов числителя и знаменателя соответственно, регулятор следует выбирать степени (1, 1). При необходимости обеспечить астатизм в системе следует задать регулятор степени (2, 2). При этом нулевой член полинома знаменателя равен нулю. Данный регулятор можно назвать обобщенным ПИ(Д)-регулятором³. Структурная схема системы приведена на рис. 7.

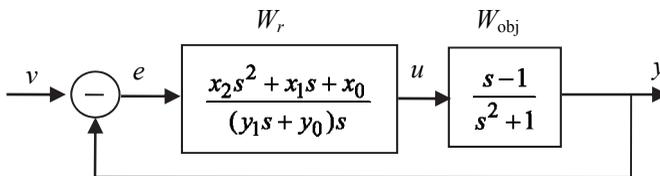


Рис. 7. Структурная схема системы

Выпишем ХПЗС, воспользовавшись формулой (5) и, к примеру, задавшись полюсами замкнутой системы $\{-1, -1, -1, -1\}$:

$$A(s) = (y_1 s^2 + y_0 s)(s^2 + 1) + (x_2 s^2 + x_1 s + x_0)(s - 1) = (s + 1)^4,$$

откуда

$$\begin{aligned} y_1 s^4 + y_1 s^2 + y_0 s^3 + y_0 s + x_2 s^3 - x_2 s^2 + x_1 s^2 - x_1 s + x_0 s - x_0 = \\ = s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} y_1 s^4 + (y_0 + x_2) s^3 + (y_1 - x_2 + x_1) s^2 + (y_0 - x_1 + x_0) s - x_0 = \\ = s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1. \end{aligned}$$

³ При $y_1 / y_0 \rightarrow 0$ закон управления приближается к ПИ(Д)-закону.

Формула (6) принимает вид

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_0 \\ x_2 \\ x_1 \\ x_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \\ 6 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Отсюда

$$x = A^{-1} \cdot b = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_0 \\ x_2 \\ x_1 \\ x_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 7 \\ -3 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}.$$

Подставим найденные коэффициенты в формулу регулятора⁴ (рис. 3):

$$W_r = \frac{-3s^2 + 2s - 1}{s^2 + 7s}.$$

Переходный процесс в системе (рис. 8) явно указывает на наличие нулей объекта и (или) регулятора в правой полуплоскости комплексной плоскости.

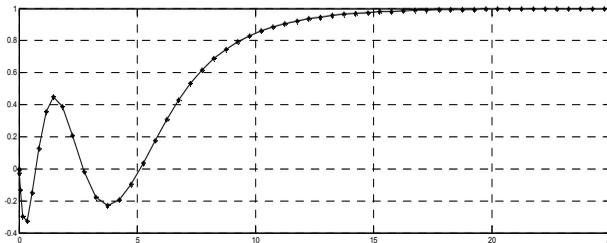


Рис. 8. График переходного процесса

⁴ По-видимому, у регулятора старший коэффициент полинома знаменателя можно положить равным единице, желаемый характеристический полином взять также с единичным коэффициентом при старшей степени. Тогда в уравнении (6) число неизвестных уменьшается на единицу.

Из графика видно, что в классическом смысле выброса (перерегулирования) нет, т. е. $\sigma = 0$, а время переходного процесса равно $t_{пп} = 13$ с. Однако особенностью переходного процесса является отрицательный выброс в первоначальный момент времени, равный -0.3 , сменяющийся последовательно положительным и отрицательным значениями, равными примерно $0,4$ и $-0,2$. Кратко это будем записывать так: $\{-0.3, 0.4, -0.2\}$. В большинстве случаев в технических системах это нежелательно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При синтезе регуляторов пониженного порядка получаем регуляторы более простого вида, недостаток – процедура, как правило, не формализована. Синтез регуляторов полного порядка формализован (для одноканальных систем). В целом процедура расчета существенно проще по сравнению с синтезом в пространстве состояний. Кроме того, в отличие от синтеза пространства состояний, устройство управления расположено в прямом канале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воевода А.А., Ижцкая Е.А. Стабилизация двухмассовой системы: модальный метод синтеза // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – № 2 (56). – С. 3–10.
2. Корюкин А.Н. Максимизация степени устойчивости двухмассовой системы с ПИД-регулятором // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 1 (75). – С. 46–63.
3. Корюкин А.Н. Предел устойчивости по Гурвицу двухмассовой системы с ПИД-регулятором. Ч. 1 // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 3 (69). – С. 71–104.
4. Вороной В.В. О дополнительном требовании к желаемой передаточной функции // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 3 (69). – С. 33–38.
5. Шоба Е.В. Стабилизация положения кабины лифта. Расчет регулятора // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 3 (69). – С. 135–142.
6. Воевода А.А., Вороной В.В. Модальный синтез многоканальных регуляторов пониженного порядка с использованием «обратного» дифференцирования характеристической матрицы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – № 3 (65). – С. 3–10.
7. Вороной В.В., Воевода А.А. О влиянии нулей «справа» на переходные процессы в системе // Сборник научных трудов НГТУ. – 2013. – № 2 (72). – С. 19–29.

8. *Воевода А.А., Шоба Е.В.* О разрешимости задачи автономизации многоканальной системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 2 (60). – С. 9–16.
9. *Воевода А.А., Вороной В.В.* О смещении корней при «обратном» дифференцировании // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 3 (69). – С. 11–22.
10. *Вороной В.В.* Краткий обзор методов синтеза регуляторов пониженного порядка // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 4 (62). – С. 25–34.
11. *Воевода А.А.* Стабилизация двухмассовой системы: полиномиальный метод синтеза двухканальной системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – № 4 (58). – С. 121–124.
12. *Шоба Е.В.* Модальный метод синтеза в пространстве состояний с наблюдателем пониженного порядка: о возможности обеспечения статического режима // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 4 (62). – С. 175–182.
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. *Шоба Е.В., Воевода А.А., Вороной В.В.* Модальный синтез многоканального регулятора пониженного порядка с использованием «обратной» производной // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1 (46). – С. 15–23.
15. *Чехонадских А.В., Калашиников С.Н.* Параметры управления пониженного порядка одноканальных систем и корневые координаты // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 4 (57). – С. 41–48.
16. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – 3rd ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 200 публикаций. E-mail: ucit@ucit.ru

Бобобеков Курбонмурод Мулломиракович, аспирант кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез систем управления для технических и технологических объектов управления. E-mail: kurbon_111@mail.ru

Polynomial method synthesis of PI(D) regulator for non-minimum-phase object*

K.M. Bobobekov¹, A.A. Voevoda²

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student of Department "Automatics" of Novosibirsk state technical university. E-mail: kurbon_111@mail.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: ucit@ucit.ru

Is considered a polynomial method of synthesis of linear single-channel stationary objects. Provides an illustration of calculations for two examples. The first example is the synthesis of the PI regulator for minimum phase unstable is not the object of the second order, which corresponds to the reduced-order controllers. The synthesis is carried out using the Hurwitz criterion by plotting the stability domain in the parameter plane of the regulator. The peculiarity of the transient process of the system is oscillatory in nature with a large first negative emission. And the second example is a calculation of the full order controller is a modified PID controller for unstable nonminimal - phase object. The peculiarity of the calculation of this example is that the object of the second order is sufficient to take the knob of the first order. But to ensure the astatic need free term of the polynomial denominator of the transfer function of the regulator is taken to be zero, which leads to the necessity of selection of regulator of second order. The transition process of the system is of oscillatory nature with a small negative overshoot, followed by positive and negative emissions. From a technical point of view, the system with the PID regulator has a more satisfactory appearance.

Keywords: Polynomial synthesis method, PI(D) regulator, the minimum phase object, the desired characteristic polynomial, the regulator of the full order regulator reduced-order, single-channel system, astatic, stability

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-4-7-20

REFERENCES

1. Voevoda A.A., Izhitskaya E.A. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: modal'nyi metod sinteza [Stabilization of the two-mass system: modal synthesis method]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 2 (56), pp. 3–10.
2. Koryukin A.N. Maksimizatsiya stepeni ustoichivosti dvukhmassovoi sistemy s PID-regulyatorom [Maximizing degree of stability of two-mass system with PID-control]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 1 (75), pp. 46–63.

* Received 19 August 2015.

3. Koryukin A.N. Predel ustoichivosti po Gurvitsu dvukhmassovoi sistemy s PID-regulyatorom. Ch. 1 [Stability limit according to Gurvits of two mass systems with PID-controller. Pt. 1]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 3 (69), pp. 71–104.

4. Voronoi V.V. O dopolnitel'nom trebovanii k zhelaemoi peredatochnoi funktsii [Additional requirements to the desired transfer function]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 3 (69), pp. 33–38.

5. Shoba E.B. Stabilizatsiya polozheniya kabiny lifta. Raschet regulyatora [Stabilization provision the cabin of the lift. Calculation regulator]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 3 (69), pp. 135–142.

6. Voevoda A.A., Voronoi V.V. Modal'nyi sintez mnogokanal'nykh regulyatorov ponizhennogo poryadka s ispol'zovaniem "obratnogo" differentsirovaniya kharakteristicheskoi matritsy [Modal synthesis of low-order regulators multi-channel systems using the "reverse" derivative principle]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 3 (65), pp. 3–10.

7. Voronoi V.V., Voevoda A.A. O vliyanii nulei «sprava» na perekhodnye protsessy v sisteme [About the right zeros influence to system transients]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 2 (72), pp. 19–29.

8. Voevoda A.A., Shoba E.V. O razreshimosti zadachi avtonomizatsii mnogokanal'noi sistemy [About diagonally decoupling for multi-input multi-output systems]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 2 (60), pp. 9–16.

9. Voevoda A.A., Voronoi V.V. O smeshchenii kornei pri «obratnom» differentsirovanii [About roots shift with using "reverse" derivative]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 3 (69), pp. 11–22.

10. Voronoi V.V. Kratkii obzor metodov sinteza regulyatorov ponizhennogo poryadka [The short review of synthesis methods of the lowered order regulators]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo uni-*

versiteta – *Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 4 (62), pp. 25–34.

11. Voevoda A.A. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: polinomial'nyi metod sinteza dvukhkanal'noi sistemy [Two-mass system stabilization: polynomial method of two-channel system synthesis]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 4 (58), pp. 121–124.

12. Shoba E.V. Modal'nyi metod sinteza v prostranstve sostoyanii s nablyudatelem ponizhennogo poryadka: o vozmozhnosti obespecheniya staticheskogo rezhima [Modal method of synthesis in space of conditions with the observer of the lowered order: about possibility of maintenance of the static mode]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 4 (62), pp. 175–182.

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. Shoba E.V., Voevoda A.A., Voronoi V.V. Modal'nyi sintez mnogokanal'nogo regul'yatora 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. 15–23.

15. Chekhonadskikh A.V., Kalashnikov S.N. Parametry upravleniya ponizhennogo poryadka odnokanal'nykh sistem i kornevye koordinaty [Low order control parameters of SISO systems and root coordinates]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 4 (57), pp. 41–48.

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