

*АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

УДК 681.513

**ПЕРЕХОД ОТ НЕПРЕРЫВНЫХ САУ К ДИСКРЕТНЫМ СИСТЕМАМ\***

К.М. БОБОБЕКОВ

*630087, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: kurbon\_111@mail.ru*

Исследуется точность перехода от непрерывной системы к дискретной системе для различных вариантов аппроксимации непрерывных звеньев дискретными, а также от величины шага дискретизации и от степени свернутости структурной схемы системы. Исследования проводятся на примере системы, состоящей из объекта и двух пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов. В нашем случае объект неустойчивый, представляющий собой перевернутый маятник на тележке с одним входом и двумя выходами. Первый регулятор стабилизирует угол отклонения маятника, а второй регулятор обрабатывает заданное положение тележки. Данная система рассматривается во многих работах, а в нашем случае рассмотрим переход от непрерывной системы к дискретной и анализ несовпадения переходных процессов. Для перехода от непрерывной системы к дискретной можно воспользоваться несколькими методами. Например, заменить блок интегратора на дискретный блок при использовании команд «zoh» (zero order hold – фиксация нулевого порядка) и «foh» (fast order hold – фиксация первого порядка) при разных шага дискретизации. Приведены переходные процессы непрерывной и дискретной системы. Также приведен переходный процесс системы в случае использования передаточных функции всей системы «вход – выход» на дискретные. При дискретизации ошибки моделирования незначительные. При сворачивании структурной схемы и при уменьшении шага дискретизации ошибки уменьшаются.

**Ключевые слова:** неустойчивый объект, непрерывная система, дискретная система, аппроксимации «foh» и «zoh», переходный процесс, ошибка дискретизации, шаг дискретизации

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-1-7-22

---

\* Статья получена 19 декабря 2016 г.

## ВВЕДЕНИЕ

При исследовании систем автоматического управления нередко используются параллельно как непрерывные, так и дискретные модели. При этом в некоторых случаях качественное и количественное поведение систем может существенно отличаться вплоть до того, что устойчивая система превращается в неустойчивую систему. В настоящее время регуляторы реализуются на процессорах и компьютерах, и поэтому нужно уметь переходить от непрерывной реализации регулятора к дискретной. Эти вопросы исследуются в данной работе на примере системы, состоящей из объекта и двух ПИД-регуляторов. В нашем случае неустойчивый объект – это объект типа перевернутого маятника на тележке с одним входом и двумя выходами [1–8, 15]. Исследования проводятся для структурных схем – как свернутых, так и развернутых. При этом используются в основном структуры, состоящие из набора сумматоров, интеграторов и блоков усиления. Интеграторы заменяются либо с использованием команд «zoh» (zero order hold – фиксация нулевого порядка) или «foh» (fast order hold – фиксация первого порядка). При идентификации как параметров объекта, так и параметров регулятора также часто переходят к дискретным моделям. При исследованиях используется пакет моделирования Matlab.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ставится задача исследовать зависимость погрешности аппроксимации:

- от степени свернутости структурной схемы системы автоматического управления;
- вида аппроксимации непрерывных динамических звеньев;
- шага аппроксимации.

## 2. НЕПРЕРЫВНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Система представляет собой неустойчивый объект типа перевернутого маятника (inverted pendulum) с одним входом  $u(s)$ , двумя выходами  $\theta(s)$  и  $S(s)$  [1–3] и двумя регуляторами:

$$\theta(s) = \frac{1}{s^2} \left( -\frac{\alpha}{M_t} \frac{1}{L} u(s) + b\theta(s) \right), \quad (1)$$

$$S(s) = \frac{1}{s^2} \left( \frac{\alpha}{M_t} u(s) - a\theta(s) \right), \quad (2)$$

где  $\alpha / M_t = 0,033$ ,  $b = 33,3$ ,  $a = 23,3$ ,  $L = 1$ ,  $\theta$  – угол отклонения маятника,  $S$  – положение тележки,  $u$  – управляющий сигнал. Данная система рассматривается в работах [1–3, 7, 8, 15], где вычислены параметры регулятора. Регулятор  $R_\theta$  стабилизирует угол отклонения маятника, регулятор  $R_S$  обрабатывает заданное положение тележки. Приведем уравнение регуляторов:

$$R_S = \frac{\delta + \varepsilon s}{s} + \nu s, \quad (3)$$

$$R_\theta = \frac{\alpha + \beta s}{s} + \gamma s, \quad (4)$$

где  $\alpha = 9774,7$ ,  $\beta = 5206,1$ ,  $\gamma = 454,55$ ,  $\varepsilon = -984,85$ ,  $\delta = -378,79$ ,  $\nu = 60,6$  [1].

Структурная схема системы приведена на рис. 1 [1].

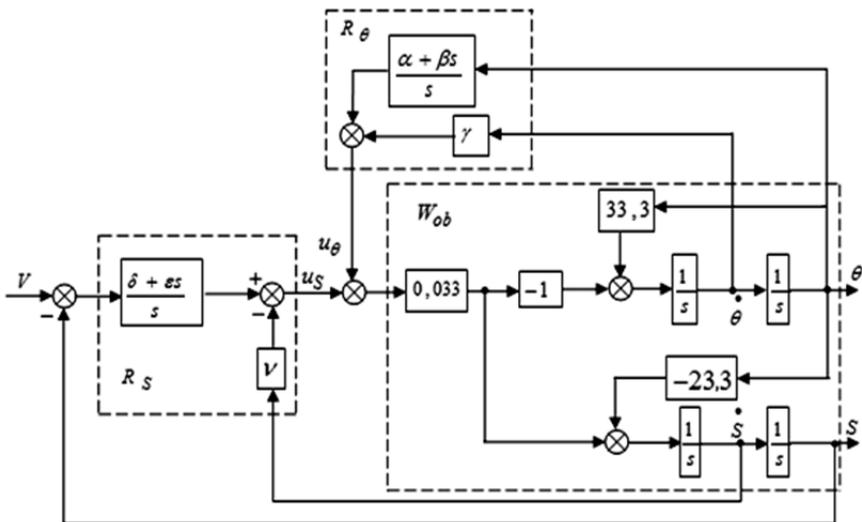


Рис. 1. Система автоматического управления перевернутым маятником, включающая два регулятора  $R_\theta$  и  $R_S$

В данном случае предполагается, что нам доступны  $\dot{S}$  и  $\dot{\theta}$ , что позволяет говорить только о ПИ-регуляторах. Непрерывную структурную схему можно преобразовать к виду, содержащему интеграторы, сумматоры и блоки усиления за счет простого преобразования  $\frac{\delta + \varepsilon s}{s} = \frac{\delta}{s} + \varepsilon$  (рис. 2).

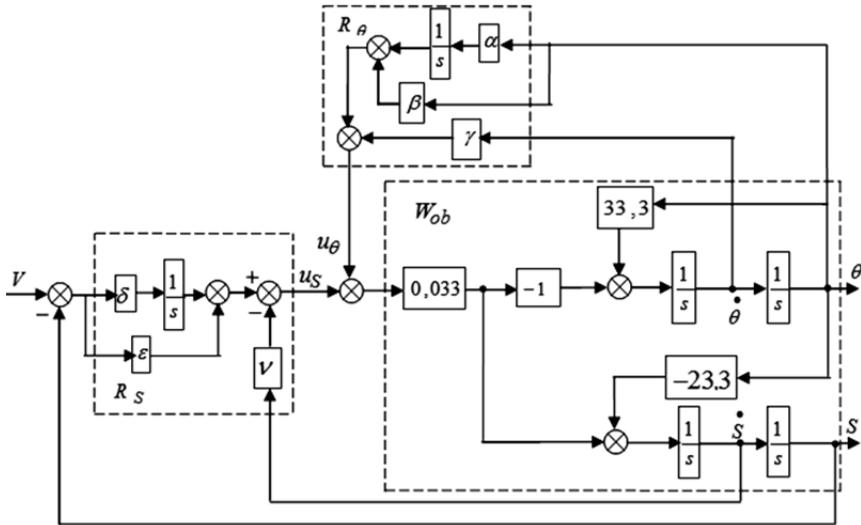


Рис. 2. Представление непрерывной САУ (рис. 1) через интеграторы, сумматоры и коэффициенты усиления

Можно найти передаточные функции «свернутой» системы (рис. 2):

$$W \left[ \frac{S(s)}{V(s)} \right] = \frac{k\varepsilon s^3 + k\delta s^2 + k(-b+a)\varepsilon s + k(-b+a)\delta}{s^5 + \psi_1 s^4 + \psi_2 s^3 + \psi_3 s^2 + \psi_4 s + \psi_5},$$

$$W \left[ \frac{\theta(s)}{V(s)} \right] = \frac{-k\varepsilon s^3 - k\delta s}{s^5 + \psi_1 s^4 + \psi_2 s^3 + \psi_3 s^2 + \psi_4 s + \psi_5},$$

где

$$\psi_1 = k(v + \gamma), \quad \psi_2 = (-b + k(\varepsilon + \beta)), \quad \psi_3 = k(\alpha + \delta + (-b + a)v),$$

$$\psi_4 = k(-b + a)\varepsilon, \quad \psi_5 = k(-b + a)\delta.$$

При выбранных значениях параметров регулятора замкнутая система имеет следующие значения полюсов:

$$\{-5, -5, -5, -1, -1\},$$

и предыдущие формулы преобразуются:

$$W \left[ \frac{S(s)}{V(s)} \right] = \frac{-32,5s^3 - 12,5s^2 + 325s + 125}{s^5 + 17s^4 + 106s^3 + 290s^2 + 325s + 125}, \quad (5)$$

$$W \left[ \frac{\theta(s)}{V(s)} \right] = \frac{32,5s^3 + 12,5s}{s^5 + 17s^4 + 106s^3 + 290s^2 + 325s + 125}. \quad (6)$$

Этими формулами воспользуемся в дальнейшем при преобразовании свернутой непрерывной системы к дискретной.

### 3. ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ

Преобразуем непрерывную систему (рис. 2) в дискретную. При *аппроксимации нулевого порядка* при использовании команды `c2d(w, Δt, 'zoh')` пропорциональные звенья сохраняются, а интегрирующие звенья  $1/s$  заменяются на  $\Delta t / (1 - z)$ , где  $\Delta t$  – шаг дискретизации. В Matlab это действие реализуется следующим образом:

```
>>w=tf([1], [1 0]);
>>w1=c2d(w, 0.1, 'zoh'),
```

где  $\Delta t = 0,1$ . На рис. 3 приведена структурная схема непрерывной САУ (рис. 2), преобразованная в дискретную систему для  $\Delta t = 0,1$  с.

Переходные процессы (рис. 4) для непрерывной системы (рис. 2) и дискретной системы (рис. 3) отличаются на начальном участке  $0 \dots 0,6$  с, где ошибка составляет 18 %.

Для уменьшения ошибки можно уменьшить шаг дискретизации например, возьмем  $\Delta t = 0,05$  с (рис. 5). Ошибка дискретизации уменьшалась примерно до 6 %. Если уменьшить  $\Delta t$  до  $0,025$  с, то ошибка уменьшается до 3 %.



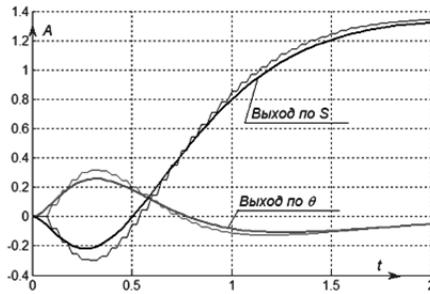


Рис. 5. Выходные сигналы систем, представленные на рис. 2 для непрерывного случая, и дискретной системы при аппроксимации «zoh» (рис. 3) при  $\Delta t = 0,05$  с

Далее переходим от непрерывной свернутой передаточной функции системы по выходному сигналу  $S$  к дискретной системе, для чего используем уравнение (5) и выполним следующие действия в Matlab:

```
>> W1=tf([-32.5 -12.5 325 125],[1 17 106 290 325 125]);
>> D1=c2d(W1, 0.1, 'zoh')
```

В результате получили дискретную передаточную функцию

$$W \left[ \frac{S(z)}{V(z)} \right] = \frac{-0,0917z^4 + 0,2281z^3 - 0,1182z^2 - 0,07182z + 0,05101}{z^5 - 3,629z^4 + 5,215z^3 - 3,71z^2 + 1,307z - 0,1827}. \quad (7)$$

Дискретная передаточная функция системы по выходу  $\theta$  вычисляется аналогично, т. е. уравнение (6) преобразуется так:

```
>> W2=tf([32.5 0 12.5 0],[1 17 106 290 325 125]);
>> D2=c2d(W2, 0.1, 'zoh'),
```

откуда получим дискретную передаточную функцию по выходному сигналу  $\theta$ :

$$W \left[ \frac{\theta(z)}{V(z)} \right] = \frac{0,09141z^4 - 0,2219z^3 + 0,1182z^2 + 0,06424z - 0,05195}{z^5 - 3,629z^4 + 5,215z^3 - 3,71z^2 + 1,307z - 0,1827}. \quad (8)$$

Для того чтобы сравнивать переходные процессы для непрерывной передаточной функции системы с дискретной передаточной функции по двум каналам, выполним следующие действия в Matlab для  $\Delta t = 0,1$ :

```
>> W1=tf([-32.5 -12.5 325 125],[1 17 106 290 325 125]);
>> step(W1)
hold
>> W2=tf([32.5 0 12.5 0],[1 17 106 290 325 125]);
>> step(W2)
>> D1=c2d(W1,0.1,'zoh')
>> step(D1)
>> D2=c2d(W2,0.1,'zoh')
>> step(D2)
```

Соответствующие переходные процессы показаны на рис. 6.

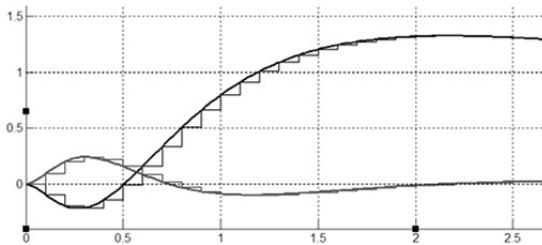


Рис. 6. Выходные сигналы  $S$  и  $\theta$  непрерывной системы (рис. 2) и дискретной системы (рис. 3) для  $\Delta t = 0,1$  с при использовании команды «zoh»

Из рис. 6 следует, что при замене непрерывных передаточных функций на дискретные ошибки аппроксимации нулевые. Следует отметить, что «ступенчатые» сигналы смещены на половину такта (шага дискретизации).

При использовании вместо команды «zoh» более точной команды аппроксимации «foh» смещение устраняется (рис. 7).

Из рис. 7 можно сделать вывод, что смещение устранено, то есть получили более точную «аппроксимацию».

Выполним дискретизацию развернутой структурной схемы рис. 2 с использованием команды «foh», что приведет к замене непрерывного интегратора на дискретный блок  $\Delta t(0,5z + 0,5)/(z - 1)$ . Данные действия в Matlab следующие:

```
>>w=tf([1], [1 0]);
>>w1=c2d(w, 0.1, 'foh')
```

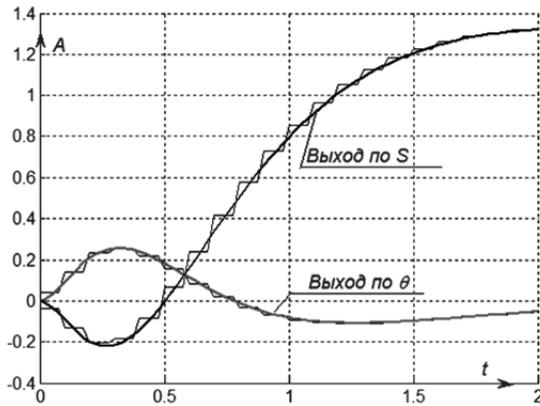


Рис. 7. Выходные сигналы  $S$  и  $\theta$  свернутой непрерывной системы (рис. 2) и дискретной системы при использовании команда «foh» (рис. 3) для  $\Delta t = 0,1$  с

В этой программе выбран шаг дискретизации  $\Delta t = 0,1$ , что дает

$$(0,05z + 0,05)/(z - 1).$$

Итак, структурная схема системы принимает вид рис. 8.

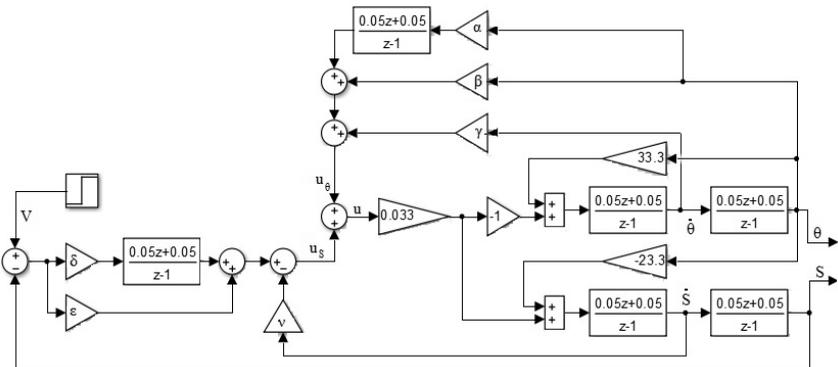


Рис. 8. Дискретная структурная схема, соответствующая непрерывной структурной схеме (рис. 2) при использовании команды «foh» для  $\Delta t = 0,1$  с

Переходные процессы дискретной системы, показанной на рис. 8, для  $\Delta t = 0,1$ ,  $\Delta t = 0,15$  и  $\Delta t = 0,2$  приведены на рис. 9.

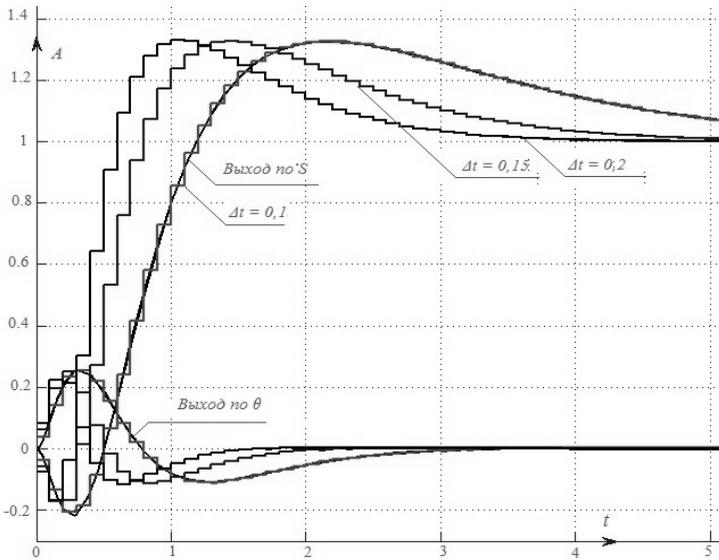


Рис. 9. Выходные сигналы непрерывной системы (рис. 2) и дискретной системы (рис. 3) для команды «foh» при  $\Delta t = 0,1$  с,  $\Delta t = 0,15$  с,  $\Delta t = 0,2$  с

Ошибка дискретизации существенно зависит от шага  $\Delta t$ . Для данной структуры значение шага дискретизации более 0,1 с приводит к большим погрешностям.

Приведем переходные процессы свернутой структурной схемы (в виде передаточной функции) при использовании команды «foh» в случае  $\Delta t = 0,2$  с (рис. 10).

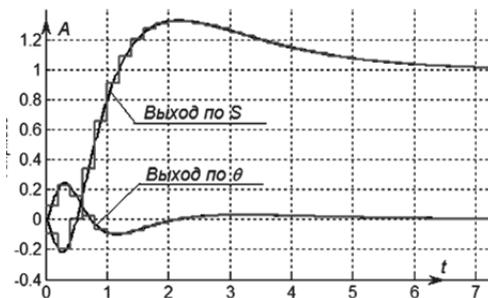


Рис. 10. Выходные сигналы  $S$  и  $\theta$  свернутой непрерывной системы (рис. 2) и дискретной системы (рис. 3) для  $\Delta t = 0,2$  с при использовании команды «foh»

Из рис. 10 очевидно, что при использовании команды «foh» ошибка дискретизации отсутствует даже при  $\Delta t = 0,2$  с, что существенно больше 0,1 с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере системы автоматического управления, состоящей из неустойчивого объекта и двух ПИД-регуляторов, проведено исследование погрешности аппроксимации непрерывной системы дискретной в зависимости:

- от степени «свернутости» структурной схемы;
- вида аппроксимации непрерывных динамических звеньев;
- шага аппроксимации.

Оказывается, погрешность существенно уменьшается при «сворачивании» структурной схемы при более «тонкой» аппроксимации непрерывных динамических звеньев дискретными, а также при уменьшении шага аппроксимации. Интересен тот факт, что в некоторых случаях ошибка отсутствует. При неудачной аппроксимации устойчивая непрерывная система может в дискретном варианте стать неустойчивой. Эти особенности следуют учитывать при анализе систем автоматического управления, когда используются переходы «непрерывная система ↔ дискретная система». Эти особенности обязательно необходимо учитывать при решении задач идентификации, где также типично использование переходов «непрерывная система ↔ дискретная система».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воевода А.А., Шоба Е.В. Управление перевернутым маятником // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 2 (68). – С. 3–14.
2. Бобобеков К.М. Модель перевернутого маятника: частные случаи // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 3 (81). – С. 21–42.
3. Troshina G.V., Voevoda A.A., Bobobekov K.M. The periodic signals application for the estimation of the unstable object parameters // Journal of Physics: Conference series. – 2017. – Vol. 803. – Art. 012166. – P. 1–5. – doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012166.
4. Бобобеков К.М. Об особенностях реализации двухпараметрического регулятора стабилизации положения маятника в среде Matlab // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 3 (85). – С. 115–130.
5. Бобобеков К.М. Псевдогодограф Найквиста // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 2 (84). – С. 49–57.

6. *Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Troshina G.V.* The active identification of parameters for the unstable object // XI Международный форум по стратегическим технологиям, IFOST-2016, Новосибирск, 1–3 июня 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 594–596.
7. *Воевода А.А., Бобобеков К.М.* Активная идентификация параметров модели перевернутого маятника по углу при подаче на вход синусоидальных сигналов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 2 (84). – С. 21–37.
8. *Бобобеков К.М.* Идентификация параметров линеаризованной модели перевернутого маятника: тестовый сигнал – двойной меандр // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 3 (85). – С. 7–17.
9. *Бобобеков К.М., Воевода А.А.* Синтез двухканальной системы полиномиальным методом: обеспечение астатизма // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 1 (83). – С. 7–19.
10. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – 3<sup>rd</sup> ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.
11. *Воевода А.А.* Стабилизация двухмассовой системы: модальный метод синтеза с использованием полиномиального разложения // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 195–198.
12. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с. – ISBN 5-9221-0379-2.
13. *Doyle J.C., Francis B., Tannenbaum A.* Feedback control theory. – New York: Macmillan Publ., 1990. – 198 p.
14. *Mehra R.K.* Optimal input for linear system identification // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1974. – Vol. 19, N 3. – P. 192–200.
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. *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.
18. *Трошина Г.В.* Об активной идентификации динамических объектов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 4 (78). – С. 41–52. – doi: 10.17212/2307-6879-2014-4-41-52.
19. *Voevoda A.A., Troshina G.V.* Active identification of the inverted pendulum control system // Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2015). – St. Petersburg: LETI Publ., 2015. – Vol. 1. – P. 153–156.

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

21. Востриков А.С., Воевода А.А., Жмудь В.А. Эффект понижения порядка системы при управлении по методу разделения движений // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2005. – № 3. – С. 3–13.

22. Воевода А.А., Жмудь В.А. Астатическое управление объектами нестационарными матричными передаточными функциями методом приближенного обращения функциональных комплексных матриц // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2006. – № 2. – С. 3–8.

23. Воевода А.А., Чехонадских А.В., Шоба Е.В. Модальный метод синтеза с использованием полиномиального разложения: разделение движений при стабилизации трехмассовой системы // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2011. – № 2 (43). – С. 39–46.

**Бобобеков Курбонмурод Мулломиракович**, специалист по технологиям машиностроения, 2008–2013 гг. – кафедра «Технология машиностроения, металлорежущие 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 автоматике Новосибирского государственного технического университета. В настоящее время специализируется в области синтеза систем управления техническими системами. Имеет 13 публикаций. E-mail: kurbon\_111@mail.ru

## **Transition from continuous ACS to discrete systems\***

**K.M. Bobobekov**

*Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student of Department "Automatics". E-mail: kurbon\_111@mail.ru*

Is investigated the accuracy of the transition from a continuous system to a discrete system for various variants of approximation of continuous links with discrete ones, as well as the magnitude of the sampling step and the degree of turn aside of the structural scheme of the system.

---

\* Received 19 December 2016.

The research is conducted on the example of a system consisting of an object and two proportional-integral-differential regulators. In our case, the object is unstable, representing an inverted pendulum on a trolley with one input and two outputs. The first regulator stabilizes the angle of deviation of the pendulum, and the second regulator fulfills the predetermined position of the trolley. This system is considered in many works, and in our case we consider the transition from a continuous system to a discrete one and is analyzed the discrepancy of transient processes. To switch from a continuous system to a discrete one, you can use several methods. For example, replace the integrator block on a discrete block by using the "zoh" commands – zero order hold and "foh" – fast order hold for different sampling steps. Are shown transitional processes of a continuous and discrete system are given. Also, is shown transition process to the system in the case of use transfer functions of the entire system "input-output" to discrete ones. When sampling, simulation errors are not significant. When the folding of the structural scheme, sampling errors decrease. Also, with a decrease in the sampling step, errors are reduced.

**Keywords:** unstable object, continuous system, discrete system, approximations foh and zoh, transient process, sampling error, sampling step

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-1-7-22

## REFERENCES

1. 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.
2. Bobobekov K.M. Model' perevernutogo mayatnika: chastnye sluchai [The model of the inverted pendulum: special cases]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (81), pp. 21–42.
3. Troshina G.V., Voevoda A.A., Bobobekov K.M. The periodic signals application for the estimation of the unstable object parameters. *Journal of Physics: Conference series*, 2017, vol. 803, art. 012166, pp. 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012166.
4. Bobobekov K.M. Ob osobennostyakh realizatsii dvukhparametricheskogo regulatora 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.
5. Bobobekov K.M. Pseudogodograf Naikvista [Pseudo-hodograph Nyquist]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (84), pp. 49–57.

6. Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Troshina G.V. [The active identification of parameters for the unstable object]. *XI Mezhdunarodnyi forum po strategicheskim tekhnologiyam, IFOST-2016* [The 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology IFOST-2016], Novosibirsk, 1–3 June 2016, pp. 594–596.
7. Voevoda A.A., Bobobekov K.M. Aktivnaya identifikatsiya parametrov modeli perevernutogo mayatnika po uglu pri podache na vkhod sinusoidal'nykh signalov [Active identification of the inverted pendulum model data on angle in applied to the input sinusoidal signal]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (84), pp. 21–37.
8. Bobobekov K.M. Identifikatsiya parametrov linearizovannoi modeli perevernutogo mayatnika: testovyi signal – dvoinoi meandr [Identification parameters of the linearized model of an inverted pendulum: test signal – a double meander]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (85), pp. 7–17.
9. 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.
10. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 3<sup>rd</sup> ed. New York, Oxford University Press, 1999. 334 p.
11. 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.
12. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. T. 1. *Lineinye sistemy* [The theory of automatic control. Vol. 1. Linear]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 288 p. ISBN 5-9221-0379-2.
13. Doyle J.C., Francis B., Tannenbaum A. *Feedback control theory*. New York, Macmillan Publ., 1990. 198 p.
14. Mehra R.K. Optimal input for linear system identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, vol. 19, no. 3, pp. 192–200.
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. 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.

18. Troshina G.V. Ob aktivnoi identifikatsii dinamicheskikh ob"ektov [About active identification of dynamic objects]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 4 (78), pp. 41–52. doi: 10.17212/2307-6879-2014-4-41-52.

19. Voevoda A.A., Troshina G.V. Active identification of the inverted pendulum control system. *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2015)*. St. Petersburg, LETI Publ., 2015, vol. 1, pp. 153–156.

20. 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.

21. Vostrikov A.S., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Effekt ponizheniya poryadka sistemy pri upravlenii po metodu razdeleniya dvizhenii [The effect of reducing the order of the system that is controlled by the method of separation of motions]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2005, no. 3. pp. 3–13.

22. Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Astaticheskoe upravlenie ob"ektami nestatsionarnymi matrichnymi peredatochnymi funktsiyami metodom priblizhennogo obrashcheniya funktsional'nykh kompleksnykh matrits [Astatic facilities management borne by the stationary matrix transfer functions by approximately the first functional treatment of complex matrices]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 2. pp. 3–8.

23. Voevoda A.A., Chekhonadskikh A.V., Shoba E.V. Modal'nyi metod sinteza s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya: razdelenie dvizhenii pri stabilizatsii trekhmassovoi sistemy [Modal synthesis method using a polynomial decomposition: the separation of motions in the stabilization of the three-mass plant]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 2 (43), pp. 39–46.