

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 681.5.037.4

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-2-7-16

Синтез регулятора для систем, содержащих звено запаздывания*

А.А. ВОЕВОДА^а, В.И. ШИПАГИН^б

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный
технический университет

^а ucit@ucit.ru ^б shipagin@mail.ru

В некоторых случаях повышение показателей качества работы системы автоматического управления может быть достигнуто за счет учета запаздываний при расчете регуляторов. Существуют различные способы синтеза системы управления для таких систем. К ним можно отнести следующие методы: компенсации запаздывания, робастного управления, адаптивного управления, управления на основе моделей с распределенными параметрами, управления на основе искусственных нейронных сетей и другие. Однако эти методы предъявляют дополнительные требования к динамике системы или сложны в технической реализации и настройке. Показан способ расчета регулятора модальным методом синтеза с использованием полиномиально-матричного разложения передаточных функций объекта и регулятора. Необходимые показатели динамики переходных процессов достигаются благодаря выбору полюсов желаемого характеристического полинома замкнутой системы. При синтезе регулятора учет влияния звена запаздывания достигается за счет его аппроксимации с помощью функции Паде. При этом происходит повышение порядка полиномов, которые участвуют в расчете параметров регулятора. В предложенном способе синтеза регулятора нет необходимости повышать порядок участвующих в расчетах полиномов. Это достигается благодаря учету полюсов звена в желаемом характеристическом полиноме замкнутой системы. Для примера применения предложенного способа рассмотрена система с многоканальным неустойчивым объектом, содержащим звено запаздывания в своей структуре. Для наглядности синтез регуляторов приведен для случая, когда в системе звено запаздывания представлено в виде аппроксимации функцией Паде первого порядка, но он также может быть применен в случае аппроксимаций более высокого порядка.

Ключевые слова: система управления, система с запаздыванием, полиномиальное матричное разложение, синтез системы автоматического управления, модальный метод синтеза, характеристическая матрица замкнутой системы, многоканальный объект, многоканальная система

* Статья получена 31 января 2025 г.

ВВЕДЕНИЕ

Для некоторых технических систем фактор наличия запаздывания внутренних процессов оказывает существенное влияние на динамику самой системы. Поэтому при синтезе регулятора необходимо учитывать также наличие в системе звеньев запаздывания. Актуальность выбранного направления исследования подтверждается достаточно большим числом научных работ, направленных на решение этого вопроса. Например, исследования в работе [1] показали, что в системах с обратной связью, где сигнал от объекта управления возвращается с задержкой, неучет этой задержки может привести к тому, что система начнет «раскачиваться» и в конечном итоге потеряет устойчивость. Авторы работы [2] рассматривали системы с большим временем запаздывания, такие как тепловые процессы или системы передачи данных. Неучет задержек в них может привести к значительному увеличению времени достижения установившегося режима и увеличению амплитуды колебаний. В работе [3] показано, что в системах с обратной связью, где сигнал управления возвращается с задержкой, неучет задержки приводит к появлению автоколебаний, что, в свою очередь, влияет на увеличение износа механизмов всей системы. Большое число научных публикаций показывает интерес со стороны научного сообщества к решению вопроса учета звеньев запаздывания в системе при синтезе систем автоматического управления (САУ) и подтверждает актуальность выбранной темы исследования. Существуют различные подходы, реализующие синтез САУ с учетом присутствия в системе звеньев запаздывания.

1. Алгоритмы, использующие компенсацию звеньев запаздывания на основе «упредителей Смита» [1–3]. Применяются для систем с запаздываниями различной локализации. Однако они «чувствительны» к изменению параметров модели объекта управления и задержки [2].

2. Алгоритмы, основанные на робастном управлении [4–7]. Позволяют синтезировать САУ, которые остаются стабильными при наличии некоторых неопределенностей, таких, например, как время запаздывания. Использование этих алгоритмов требует высокой сложности разработки и настройки контроллеров [6] и значительных вычислительных ресурсов для реализации [7].

3. Методы адаптивного управления, которые позволяют проводить автоматическую корректировку регулятора в зависимости от текущего состояния системы [8], могут применяться в условиях с переменной задержкой [3]. Однако они обладают достаточно высокой сложностью алгоритма адаптации [1] и могут потребовать значительных временных ресурсов для обучения и адаптации [2].

4. Методы управления на основе искусственных нейронных сетей позволяют работать с нелинейными системами и переменными задержками [8] и могут адаптироваться к изменениям в системе [3]. Требуют больших объемов данных для обучения [1] и обладают высокой вычислительной сложностью [2].

В настоящей статье приведен подход к синтезу САУ для систем с запаздыванием. Расчет параметров регулятора осуществляется с помощью модального метода, основанного на полиномиальном матричном разложении передаточной функции системы [9, 10]. Этот метод позволяет получить требуемую

динамику переходных процессов благодаря выбору полюсов передаточной функции замкнутой системы. При этом дополнительно удастся уменьшить вычислительную сложность расчета параметров регулятора благодаря сокращению порядка рассматриваемых полиномов.

1. ПОДХОД, РЕАЛИЗУЮЩИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ С УЧЕТОМ ЗВЕНЬЕВ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В СИСТЕМЕ

В качестве инструмента синтеза системы автоматического управления выбран модальный метод, использующий алгоритм полиномиально-матричного разложения, предложенный в [11] с некоторыми дополнениями. Описанный способ может быть применен как для одноканальных, так и для многоканальных систем с той лишь разницей, что для одноканального случая имеем дело с разложением объекта и регулятора в виде полиномов, а в многоканальном случае – в виде полиномиальных матриц. Рассмотрена система с локализацией регулятора и звена запаздывания в прямом канале с объектом, но при желании указанный способ можно адаптировать также и для системы с регулятором и/или звеном запаздывания в обратной связи.

На рис. 1 показана рассматриваемая система. Объект управления (*object*) и звено запаздывания (*delay*) вместе образуют установку (*plant*). На вход системы поступает задание $v(t)$, на выходе – задание $y(t)$. Система содержит отрицательную единичную обратную связь. К регулятору (*controller*) поступает ошибка управления $e(t)$. В результате формируется управляющий сигнал $u(t)$, который поступает к объекту с задержкой τ .

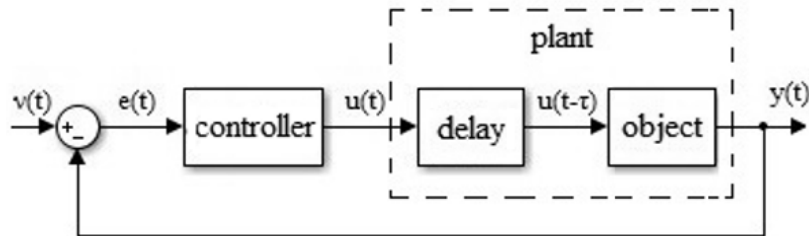


Рис. 1. Рассматриваемая структурная схема системы автоматического управления с запаздыванием

Fig. 1. The block diagram of the automatic control system with a delay

Для дальнейших вычислений звено запаздывания аппроксимируется в виде рациональной функции Паде [12]:

$$w_{\text{delay}} = \frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{(n+k)!}{k!(n-k)!} (-\tau s)^{n-k} \right)}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{(n+k)!}{k!(n-k)!} (\tau s)^{n-k} \right)}. \quad (1)$$

Здесь τ – время задержки; n – порядок аппроксимации (чем выше порядок, тем точнее аппроксимация задержки). Порядок аппроксимации определяется

достаточностью качества управления на «реальных» задержках системы); s – оператор Лапласа.

Синтез САУ проводится с помощью модального метода с использованием аппарата полиномиального матричного разложения системы. Поэтому матричную передаточную функцию (МПФ) установки необходимо представить в виде полиномиального матричного разложения (в настоящей статье приведем алгоритм с использованием левого полиномиального разложения):

$$\mathbf{W}_p = \mathbf{D}_l^{-1}(s)\mathbf{N}_l(s), \quad (2)$$

где $\mathbf{N}_l(s)$, $\mathbf{D}_l(s)$ – полиномиальные матрицы «числителя» и «знаменателя» МПФ установки; МПФ регулятора для удобства расчетов представлен в виде правого полиномиального матричного разложения:

$$\mathbf{W}_r = \mathbf{X}_r(s)\mathbf{Y}_r^{-1}(s), \quad (3)$$

где $\mathbf{X}_r(s)$, $\mathbf{Y}_r(s)$ – полиномиальные матрицы. Представленная система показана на рис. 2.

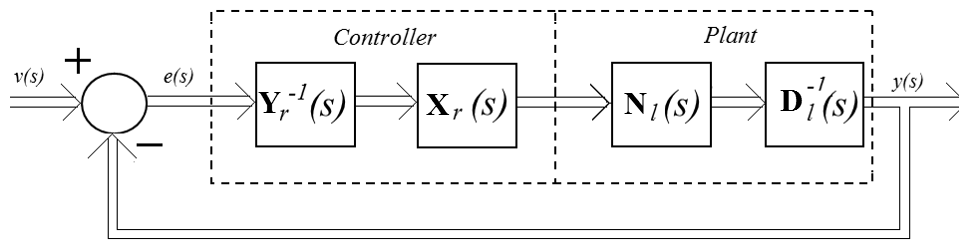


Рис. 2. Система с запаздыванием в полиномиально-матричном представлении

Fig. 2. A system with a delay in the polynomial-matrix representation

В работах [13–15] показано, что в случае выбора левого полиномиального разложения объекта и правого полиномиального разложения регулятора характеристическая полиномиальная матрица замкнутой системы (ХПМЗС) будет иметь вид

$$\mathbf{N}_l(s)\mathbf{X}_r(s) + \mathbf{D}_l(s)\mathbf{Y}_r(s). \quad (4)$$

Для нахождения полиномиальных матриц $\mathbf{X}_r(s)$, $\mathbf{Y}_r(s)$ необходимо выбрать желаемые полюса замкнутой системы и сформировать желаемую ХПМЗС $\mathbf{C}(s)$, затем приравнять ХПМЗС (4) к желаемой. Пусть желаемая ХПМЗС имеет вид

$$\mathbf{C}(s) = \mathbf{C}_1(s)\mathbf{C}_2(s), \quad (5)$$

где $\mathbf{C}_1(s)$, $\mathbf{C}_2(s)$ – полиномиальные матрицы. Для простоты расчетов принято, что матрица $\mathbf{C}_1(s)$ диагонального вида. Корни полиномов главной диагонали $\mathbf{C}_1(s)$ выбраны с учетом необходимых динамических характеристик системы. Однако при этом они не должны совпадать с корнями полиномов «знаменателя» объекта. Это необходимо для исключения сокращений,

которые приводят к неустойчивости управления. Матрица $C_2(s)$ содержит полиномы, корни которых соответствуют полюсам передаточной функции (ПФ) звена запаздывания.

С учетом того, что установка состоит из звена запаздывания и самого объекта управления, ее МПФ (2) можно выразить с учетом присутствия полиномиальной матрицы $C_2(s)$, входящей в состав желаемого ХПМЗС:

$$W_{plant}(s) = (D'_l(s)C_2(s))^{-1} N_l(s), \quad (6)$$

где $D'_l(s)C_2(s) = D_l(s)$. Таким образом, уравнение замкнутой системы (3) представим как

$$N_l(s)X_r(s) + D'_l(s)C_2(s)Y_r(s) = C_1(s)C_2(s). \quad (7)$$

Так как в правой части уравнения (7) присутствует полиномиальная матрица $C_2(s)$, значит, и в левой части данного уравнения в первом слагаемом $N_l(s)X_r(s)$ она также должна быть. Матрица $N_l(s)$ определена и не содержит $C_2(s)$, значит, «числитель» МПФ регулятора $X_r(s)$ нужно выбрать таким, чтобы он содержал матрицу $C_2(s)$:

$$N_l(s)X'_r(s)C_2(s) + D'_l(s)C_2(s)Y_r(s) = C_1(s)C_2(s), \quad (8)$$

где $X'_r(s)C_2(s) = X_r(s)$.

Пусть диагональная полиномиальная матрица $C_2(s)$ содержит одинаковые элементы на главной диагонали. Это значит, что по всем каналам управления задержка одинаковая. В этом случае эту матрицу можно представить в виде $C_2(s) = p_d(s) \cdot I$, где $p_d(s)$ – полином, корни которого являются полюсами звена запаздывания, I – единичная матрица. В таком случае можно провести сокращение на $p_d(s)$ в левой и правой части уравнения (8), а значит, порядок полученных полиномиальных уравнений может быть понижен, что упрощает дальнейшие расчеты:

$$N_l(s)X'_r(s) + D'_l(s)Y_r(s) = C_1(s). \quad (9)$$

В следующем разделе приведен пример синтеза САУ для многоканального объекта с запаздыванием.

2. ПРИМЕР СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Рассмотрим пример многоканальной системы, содержащей запаздывания в своей структуре:

$$W_o(s) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2s+1} & \frac{2}{s} \\ \frac{1}{s} & \frac{1}{2s-1} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Структурный вид объекта с запаздыванием представлен на рис. 3. В системе присутствует задержка $e^{-\tau s}$, равная двум секундам.

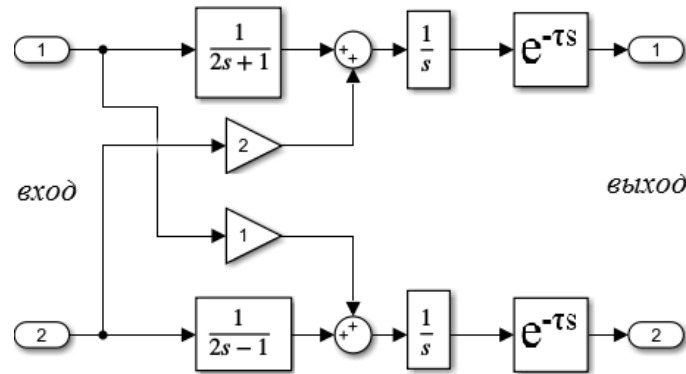


Рис. 3. Структурный вид многоканального объекта с блоком запаздывания

Fig. 3. Structural view of a multi-channel object with a delay block

Для расчета регулятора представим звено запаздывания в виде аппроксимации функцией Паде по формуле (1). При этом порядок аппроксимации будем повышать до наступления приемлемого качества регулирования для системы с «реальным» запаздыванием. В настоящей статье рассмотрено звено запаздывания, аппроксимированное функцией Паде с первым и вторым порядком аппроксимации:

$$w_d(s) = -(s-1)/(s+1). \quad (11)$$

Рассмотрим установку, состоящую из объекта (10) и звена запаздывания (11). Представим ее в виде левого полиномиального матричного разложения (2). Тогда полиномиальные матрицы могут быть представлены в виде

$$\mathbf{D}_l(s) = \begin{pmatrix} s(2s+1)(s+1) & 0 \\ 0 & s(2s-1)(s+1) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{N}_l(s) = \begin{pmatrix} 1-s & -2(2s+1)(s-1) \\ -(s-1)(2s-1) & 1-s \end{pmatrix}.$$

Необходимо выполнить синтез регулятора модальным методом с использованием полиномиального матричного разложения МПФ объекта и регулятора.

МПФ регулятора представим в виде правого полиномиального разложения (3), тогда ХПМЗС может быть выражена в виде (4). Пусть желаемая ХПМЗС состоит из

$$\mathbf{C}_1(s) = \begin{pmatrix} (2s+1)^4 & 0 \\ 0 & (2s+1)^4 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C}_2(s) = \begin{pmatrix} (s+1) & 0 \\ 0 & (s+1) \end{pmatrix}.$$

Выбор матрицы $\mathbf{C}_2(s)$ осуществлялся таким образом, чтобы корни полиномов, находящихся на ее главной диагонали, совпадали с полюсами звена

запаздывания (9). Выбор полиномов матрицы $C_1(s)$ проводился исходя из требуемых динамических характеристик переходных процессов системы.

Выполним преобразования: $D_l(s) = D'_l(s)C_2(s)$ и $X_r(s) = X'_r(s)C_2(s)$, тогда $D'_l(s) = \begin{pmatrix} s(2s+1) & 0 \\ 0 & s(2s-1) \end{pmatrix}$. Для нахождения МПФ регулятора $X'_r(s)$, $Y_r(s)$ решим систему уравнений (9). В результате получим: $X'_r(s) = \begin{pmatrix} 2s+1 & -4s-2 \\ 1-2s & 190s+1 \end{pmatrix}$, $Y_r(s) = \begin{pmatrix} 24s^2+32s+25 & 380(s-1) \\ 2(s-1) & 8s^2+56s+163 \end{pmatrix}$. Восстановим «числитель» регулятора исходя из выполненных преобразований:

$$X_r(s) = X'_r(s)C_2(s) = \begin{pmatrix} (2s+1)(s+1) & -(4s+2)(s+1) \\ (1-2s)(s+1) & (190s+1)(s+1) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

При расчете параметров регулятора через систему уравнений (9) удалось понизить порядок рассматриваемых полиномов за счет сокращения полюсов звена запаздывания.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛУЧЕННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Получим переходную характеристику для системы, представленной на рис. 2, с регулятором (12), рассчитанным с помощью модального метода. Результаты представлены на рис. 3.

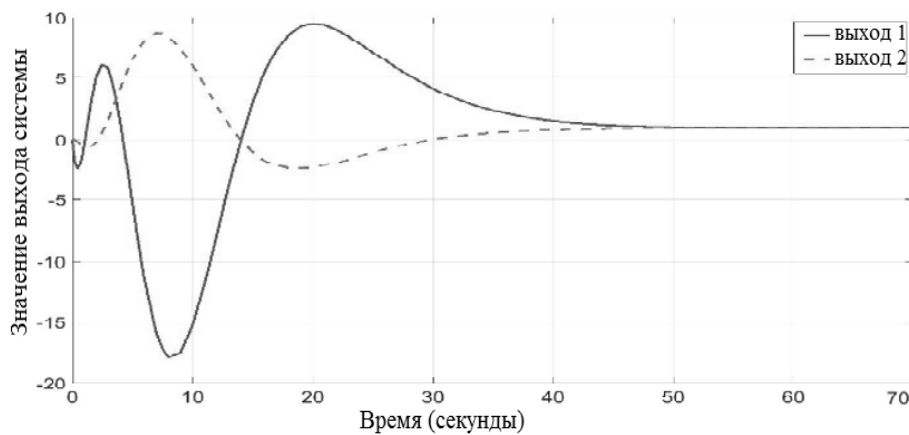


Рис. 3. Переходные процессы системы

Fig. 3. Transients of the system

Из представленных на рис. 3 переходных процессов видно, что регулятор справляется с управлением системой, содержащей задержку. Перерегулирование связано с наличием нулей ПФ замкнутой системы (19), лежащих в правой полуплоскости. При вычислении параметров регулятора удалось понизить порядок рассматриваемых полиномов на единицу, что позволило понизить

вычислительную сложность расчетов. При более высоких порядках аппроксимации задержек с помощью функции Паде удастся добиться еще большего сокращения вычислительной сложности расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для учета звеньев запаздывания при синтезе регуляторов модальным методом необходимо получить аппроксимацию этих звеньев в виде рациональной функции, состоящей из полиномов. Это, в свою очередь, ведет к усложнению вычислений за счет повышения порядка полиномов, которые участвуют в расчете параметров регулятора. При этом чем выше порядок аппроксимации звена запаздывания, тем больше повышается порядок рассматриваемых полиномов.

Если при выборе желаемой ХПМЗС учесть полюса звена запаздывания, то можно понизить порядок рассматриваемых полиномов, которые используются в вычислении параметров регулятора. Это происходит за счет их сокращения в «знаменателе» объекта и «числителе» регулятора. При этом такое сокращение не приводит к неустойчивости системы в связи с тем, что сокращаются «устойчивые» полюса системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Farina M., Suleimanov A.* Stability analysis of feedback systems with time delays // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2019. – Vol. 64 (5). – P. 1932–1945.
2. *Lin Y., Zhou W.* Impact of time delays on dynamic performance in industrial control systems // *Journal of Process Control*. – 2020. – Vol. 92. – P. 1–10.
3. *Li H., Wang Z.* Oscillations in feedback control systems with time delay // *Automatica*. – 2018. – Vol. 96. – P. 152–161.
4. *Gu K., Chen J.* Motion control accuracy degradation due to signal delays // *International Journal of Robotics Research*. – 2017. – Vol. 36 (4). – P. 432–445.
5. *Kumar R., Ryan M.* Time delays in economic models: Implications for forecasting // *Journal of Economic Dynamics and Control*. – 2016. – Vol. 72. – P. 123–137.
6. *Hassan A., Mohammed S.* Safety and efficiency impacts of unaccounted time delays in transportation systems // *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*. – 2021. – Vol. 123. – P. 1–15.
7. *Park J., Kim D.* Challenges in integrating new equipment with time delays into manufacturing automation systems // *International Journal of Production Research*. – 2019. – Vol. 57 (15). – P. 4789–4803.
8. *Jang S., Lee Y.* Real-time control challenges in robotic systems with processing delays // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2020. – Vol. 16 (6). – P. 3745–3756.
9. *Antsaklis P.J., Michel A.N.* *Linear systems*. – Switzerland: Birkhauser, 1997. – 669 p.
10. *Chen C.T.* *Linear system theory and design*. – 2nd ed. – New York: Oxford, 1999. – 334 p.
11. *Бобобеков К.М.* Полиномиальный метод синтеза многоканальных регуляторов с использованием матрицы Сильвестра: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – СПб., 2019. – 168 с.
12. *Лането А.В.* Особенности формирования проматриц и синтеза регуляторов для систем с запаздыванием // *Труды БГТУ. № 6. Физико-математические науки и информатика*. – 2012. – № 6 (153). – С. 122–126.
13. *Бобобеков К.М., Воевода А.А., Шипагин В.И.* Полиномиальный метод синтеза автоматического управления для одноканальных и многоканальных объектов: монография. – Душанбе: ТТУ им. М.С. Осими, 2021. – 192 с.
14. *Филошов В.Ю.* Полиномиальный метод синтеза регуляторов для многоканальных объектов с неквадратной матричной передаточной функцией: дис. ... канд. техн. наук: 2.3.1. – СПб., 2022. – 177 с.

15. Шипагин В.И. Нейросетевая реализация полиномиального метода синтеза регуляторов с детерминированным способом выбора архитектуры и инициализации весовых коэффициентов: дис. ... канд. техн. наук: 2.3.1. – Новосибирск, 2023. – 169 с.

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

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

Voevoda Alexandr A. D.Sc. (Eng.), professor, at the Automation Department, professor in the Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is management of multi-channel objects. He has more than 300 publications. E-mail: ucit@ucit.ru

Shipagin Victor I., PhD (Eng.), assistant lecturer at the Department of Automation in the Novosibirsk State Technical University. He currently specializes in the field of synthesis of regulators for engineering systems. E-mail: shipagin@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-2-7-16

*Synthesis of a regulator for systems containing a delay link**

A.A. VOEVODA^a, V.I. SHIPAGIN^b

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a ucit@ucit.ru ^b shipagin@mail.ru

Abstract

In some cases, an increase in the quality of the automatic control system can be achieved by taking into account delays in the calculation of regulators. There are various ways to synthesize a control system for such systems. These methods include: delay compensation, robust control, adaptive control, control based on models with distributed parameters, control based on artificial neural networks, and others. However, these methods impose additional requirements on the dynamics of the system or are difficult to implement and configure. A method for calculating the regulator by the modal synthesis method using a polynomial-matrix decomposition of the transfer functions of the object and the regulator is shown. The necessary indicators of the dynamics of transition processes are achieved by selecting the poles of the desired characteristic polynomial of a closed system. When synthesizing a regulator, the effect of the delay link is taken into account by approximating it using the Pad function. In this case, the order of the polynomials involved in the calculation of the regulator parameters increases. In the proposed method of regulator synthesis, there is no need to increase the order of the polynomials involved in the calculations. This is achieved by taking into account the poles of the link in the desired characteristic polynomial of the closed system. As an example of the application of the proposed method, a system with a multi-channel unstable object containing delay links in its structure is considered. For clarity, the synthesis of regulators is given for the case when the delay link in the system is represented as an approximation by a first-order Pad function, but it can also be applied in the case of higher-order approximations.

Keywords: control system, delay system, polynomial matrix decomposition, synthesis of an automatic control system, modal synthesis method, characteristic matrix of a closed system, multichannel object, multichannel system

* Received 01 December 2021.

REFERENCES

1. Farina M., Suleimanov A. Stability analysis of feedback systems with time delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, vol. 64 (5), pp. 1932–1945.
2. Lin, Y., & Zhou, W. (2020). Impact of time delays on dynamic performance in industrial control systems. *Journal of Process Control*, 92, 1–10.
3. Li H., Wang Z. Oscillations in feedback control systems with time delay. *Automatica*, 2018, Vol. 96, pp. 152–161.
4. Gu K., Chen J. Motion control accuracy degradation due to signal delays. *International Journal of Robotics Research*, 2017, vol. 36 (4), pp. 432–445.
5. Kumar R., Ryan M. Time delays in economic models: Implications for forecasting. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2016, vol. 72, pp. 123–137.
6. Hassan A., Mohammed S. Safety and efficiency impacts of unaccounted time delays in transportation systems. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2021, vol. 123, pp. 1–15.
7. Park J., Kim D. Challenges in integrating new equipment with time delays into manufacturing automation systems. *International Journal of Production Research*, 2019, vol. 57 (15), pp. 4789–4803.
8. Jang S., Lee Y. Real-time control challenges in robotic systems with processing delays. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, vol. 16 (6), pp. 3745–3756.
9. Antsaklis P.J., Michel A.N. *Linear systems*. Switzerland, Birkhauser, 1997. 669 p.
10. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 2nd ed. New York, Oxford, 1999. 334 p.
11. Bobobekov K.M. *Polynomial'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh regulyatorov s ispol'zovaniem matritsy Sil'vestra*. Diss. kand. tekhn. nauk [Polynomial control method for multi-channel dynamic system by Silvester matrix. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2019. 168 p.
12. Lapeto A.V. *Osobennosti formirovaniya promatrity i sinteza regulyatorov dlya sistem s zapazdyvaniem* [Features of a pro matrix formation for the controller synthesis for systems with a delay]. *Trudy BGTU. № 6. Fiziko-matematicheskie nauki i informatika*, 2012, no. 6 (153), pp. 122–126. (In Russian).
13. Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Shipagin V.I. *Polynomial'nyi metod sinteza avtomaticheskogo upravleniya dlya odnokanal'nykh i mnogokanal'nykh ob'ektov* [Polynomial method for the synthesis of automatic control systems for single-channel and multi-channel objects]. Dushanbe, Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi Publ., 2021. 192 p. (In Russian).
14. Filyushov V.Yu. *Polynomial'nyi metod sinteza regulyatorov dlya mnogokanal'nykh ob'ektov s nekvadratnoi matrichnoi peredatochnoi funktsiei*. diss. kand. tekhn. nauk [A polynomial method for synthesizing regulators for multichannel objects with a non-square matrix transfer function. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2022. 177 p.
15. Shipagin V.I. *Neirosetevaya realizatsiya polynomial'nogo metoda sinteza regulyatorov s determinirovannym sposobom vybora arkhitektury i initsializatsii vesovykh koeffitsientov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Neural network implementation of a polynomial method for synthesizing regulators with a deterministic method for selecting architecture and initializing weighting coefficients. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2023. 169 p.

Для цитирования:

Воевода А.А., Шипагин В.И. Синтез регулятора для систем, содержащих звено запаздывания // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – № 2 (98). – С. 7–16. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-2-7-16.

For citation:

Voevoda A.A., Shipagin V.I. Sintezy regulyatora dlya sistem, sodержashchikh zveno zapazdyvaniya [Synthesis of a regulator for systems containing a delay link]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2025, no. 2 (98), pp. 7–16. DOI: 10.17212/2782-2001-2025-2-7-16.