

Выбор характеристических полиномов замкнутой системы автоматического управления высокого порядка

В.А. Жмудь, Л.В. Димитров

НГТУ, Новосибирск, Россия, Технический университет Софии, София, Болгария

Аннотация: В статье решается вопрос определения коэффициентов желаемого характеристического полинома замкнутой динамической системы управления. Впервые определяются коэффициенты для полиномов до двенадцатого порядка включительно.

Ключевые слова: управление, замкнутые контуры, регуляторы, проектирование управляющих систем, цифровое управление, обратная связь, оптимизация

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность выбора коэффициентов характеристического полинома для замкнутой динамической системы обоснована в достаточной степени [1, 2]. Действительно, некоторые методики используют желаемый вид характеристического полинома для решения задачи управления сложными динамическими объектами [3–6].

В статьях [1, 2] обоснован подход к решению этой задачи и приводятся некоторые предварительные результаты. Эти результаты получены с помощью программы *VisSim* [6, 7]. Они представлены в форме таблиц коэффициентов желаемых уравнений. Задача в работе [1] решена только для систем не выше пятого порядка. В предложенном техническом решении количество оптимизируемых параметров на единицу меньше порядка характеристического полинома. Это ограничивает технические возможности по решению этой задачи для полиномов высокого порядка.

Данная статья продолжает исследования по развитию методики оптимизации регуляторов [8–19] и решает задачу поиска коэффициентов желаемых характеристических полиномов для высокого порядка. Предложен метод сокращения числа оптимизируемых параметров. В статье даны численные результаты для полиномов вплоть до двенадцатого порядка. С этой целью характеристический полином представляется в форме произведения полиномов второй или третьей степени. В этом случае получается решение не строго оптимальное, но в достаточной степени удовлетворительное.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как отмечено в [1], линейная замкнутая динамическая система автоматического

регулирования (САР) описывается, как правило, моделью, приблизительно совпадающей с моделью фильтра низких частот (ФНЧ). В общем виде передаточная функция фильтра низких частот порядка N можно описать соотношением:

$$W(s) = 1 / P_N(s). \quad (1)$$

Здесь s – аргумент преобразования Лапласа, а $P_N(s)$ – полином вида [3]:

$$P_N(s) = 1 + d_1 s + d_2 s^2 + \dots s^N. \quad (2)$$

Коэффициенты при старшем и при младшем членах полинома (2) равны единице, как и в статье [1]. Отклик системы с передаточной функцией вида (1) можно рассчитать моделированием в программе *VisSim*, которая также позволяет строить соответствующие графики.

Традиционные требования к системе позволяют сформировать целевую функцию, а с ее помощью можно осуществить расчет искомых коэффициентов методом численной оптимизации [1, 2]. В работе [1] обосновывается использование целевой функции (3), (4):

$$F_C(T) = \int_0^T \{ |e(t)| t + f[k, e(t)] \} dt, \quad (3)$$

$$f[k, e(t)] = k \max \{ 0, e(t) \cdot de(t) / dt \}. \quad (4)$$

При этом предложено моделировать систему методом открытой модели фильтра при выборе в качестве метода интегрирования адаптивного метода *Булири-Стоера* [1].

В отличие от работы [1], в данной статье предлагается вместо открытой модели системы в целом использовать последовательное соединение нескольких открытых моделей. Каждая из такой модели при этом описывает фильтр не выше третьего порядка.

2. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИНОМА ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА

На *Рис. 1* показана структура для моделирования и оптимизации эквивалентного фильтра, соответствующего системе четвертого порядка. Эта система моделируется как последовательное соединение фильтра третьего порядка и фильтра второго порядка. Полученные

коэффициенты показаны в индикаторах результата внизу рисунка. Первые два коэффициента относятся к первому фильтру третьего порядка, третий коэффициент относится к фильтру второго порядка. Таким образом, полученный характеристический полином имеет следующий вид:

$$P_4(s) = (1 + a_1s + s^2)(1 + a_2s + s^2). \quad (5)$$

На Рис. 2 показан переходный процесс в этой системе с рассчитанными коэффициентами.

В этой системе коэффициент k в соотношении (4) выбран равным пятидесяти. Соотношение (5) задает не все варианты характеристического полинома вида (2), поскольку в нем только два варьируемых параметра, тогда как в полиноме (2) для $N = 4$ таких варьируемых параметров должно быть три. Это искусственно введенное дополнительное ограничение делает оптимизацию условной. Безусловной оптимизацией был бы расчет коэффициентов для полинома вида (5) со следующей модификацией:

$$P_4^*(s) = (1 + a_1s + s^2\beta)(1 + a_2s + s^2\beta^{-1}). \quad (6)$$

Фактически выбор $\beta = 1$ произволен. Однако и выбор k также произволен, поэтому можно принять такое допущение в такой же мере возможным, как произвольный выбор этого коэффициента. Можно показать, что выбор этого коэффициента ощутимо влияет на результат. С этой целью осуществим оптимизацию по той же структуре, задавая значения $k = 20$ и $k = 0$. Результаты расчета коэффициентов для всех трех случаев показаны в Таблице 1. Соответствующие переходные процессы показаны на Рис. 3. Увеличение параметра k приводит к увеличению длительности переходного процесса, но при этом устраняется перерегулирование, также как и обратное перерегулирование. При уменьшении этого параметра, наоборот, длительность переходного процесса сокращается, но возникает прямое и обратное перерегулирование. Для тех случаев, когда обратное перерегулирование крайне нежелательно, следует предпочесть результат с $k = 50$.

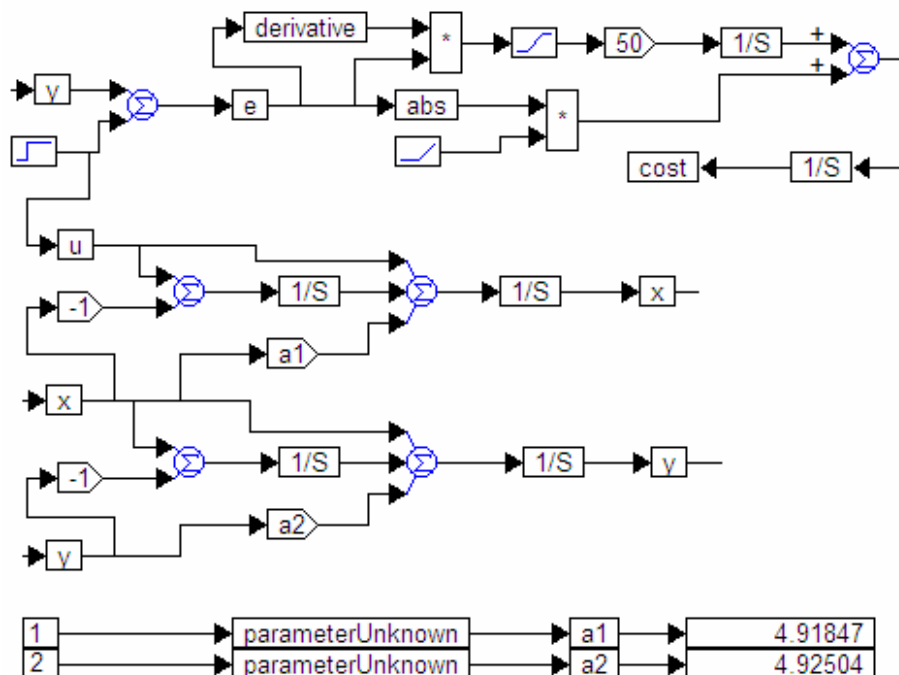


Рис. 1. Структура для оптимизации и результаты в системе третьего порядка

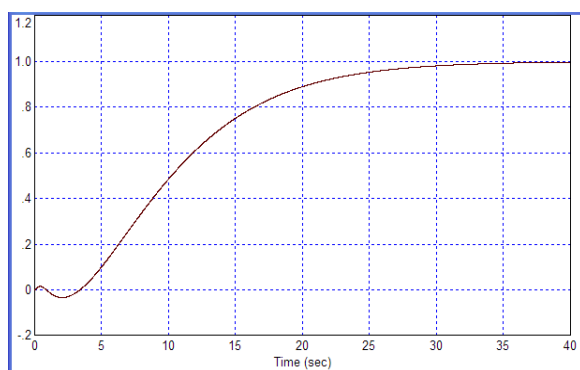


Рис. 2. Переходный процесс в системе четвертого

порядка по Рис. 1

Таблица 1. Результаты расчета коэффициентов для полиномов третьего порядка

Значение k	a_1	a_2	Условное обозначение
50	2,92	2,92	А
20	3,70	3,69	В
0	1,05	2,05	С

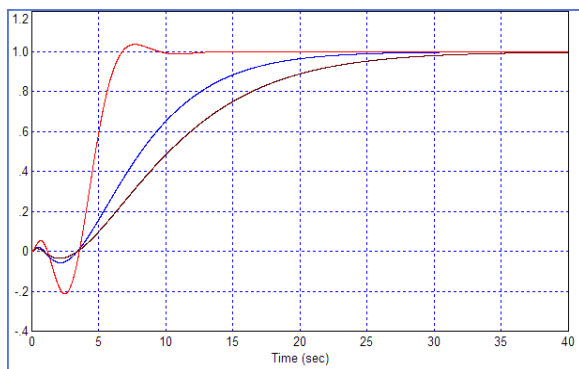


Рис. 3. Переходные процессы в системе четвертого порядка по Рис. 1 при различных значениях весового коэффициента при оптимизации: черная линия – $k = 50$, синяя линия – $k = 20$, красная линия – $k = 0$

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИНОМА ПЯТОГО ПОРЯДКА

На Рис. 4 показана структура для моделирования и оптимизации эквивалентного

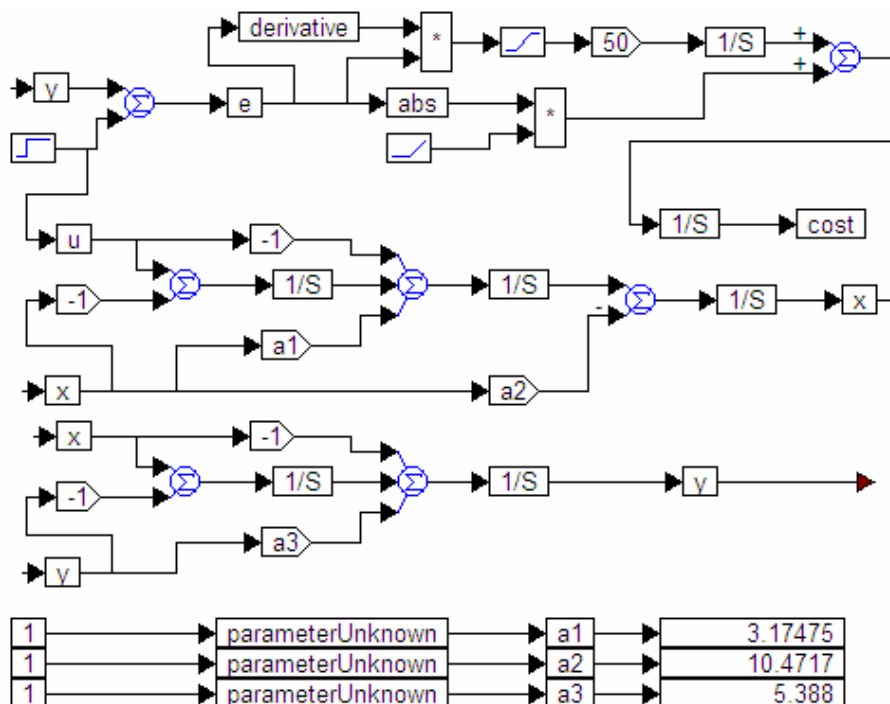


Рис. 4. Структура для оптимизации и результаты в системе пятого порядка

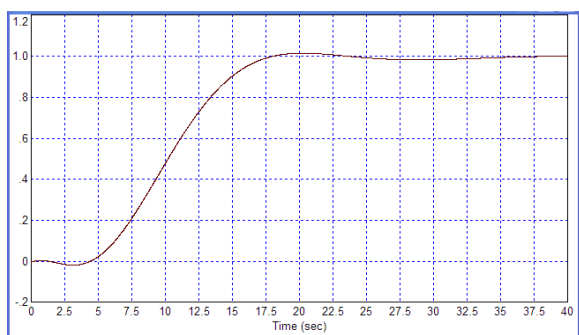


Рис. 5. Переходные процессы в системе пятого порядка по Рис. 4

фильтра, соответствующего системе пятого порядка. Эта система моделируется как последовательное соединение фильтра третьего порядка и фильтра второго порядка. Полученные коэффициенты показаны в индикаторах результата внизу рисунка. Первые два коэффициента относятся к первому фильтру третьего порядка, третий коэффициент относится к фильтру второго порядка. Таким образом, полученный характеристический полином имеет следующий вид:

$$P_5(s) = (1 + a_1s + a_2s^2 + s^3)(1 + a_3s + s^2). \quad (7)$$

На Рис. 5 показан переходный процесс в этой системе с рассчитанными коэффициентами. Для получения коэффициентов полинома в форме (2) достаточно перемножить сомножители в соотношении (7).

$$P_5(s) = 1 + a_3(a_1 + 1)s + (1 + a_1a_3 + a_2)s^2 + (a_1 + a_2a_3)s^3 + a_2s^4 + s^5. \quad (8)$$

4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИНОМА ШЕСТОГО ПОРЯДКА

На Рис. 6 показана структура для моделирования и оптимизации эквивалентного фильтра, соответствующего системе шестого порядка. Эта система моделируется как последовательное соединение двух фильтров третьего порядка. Полученные коэффициенты показаны в индикаторах результата внизу рисунка. Полученный характеристический полином имеет следующий вид:

$$P_6(s) =$$

$$= (1 + a_1s + a_2s^2 + s^3)(1 + a_3s + a_4s^2 + s^3). \quad (9)$$

системе с рассчитанными коэффициентами.

На Рис. 7 показан переходный процесс в этой

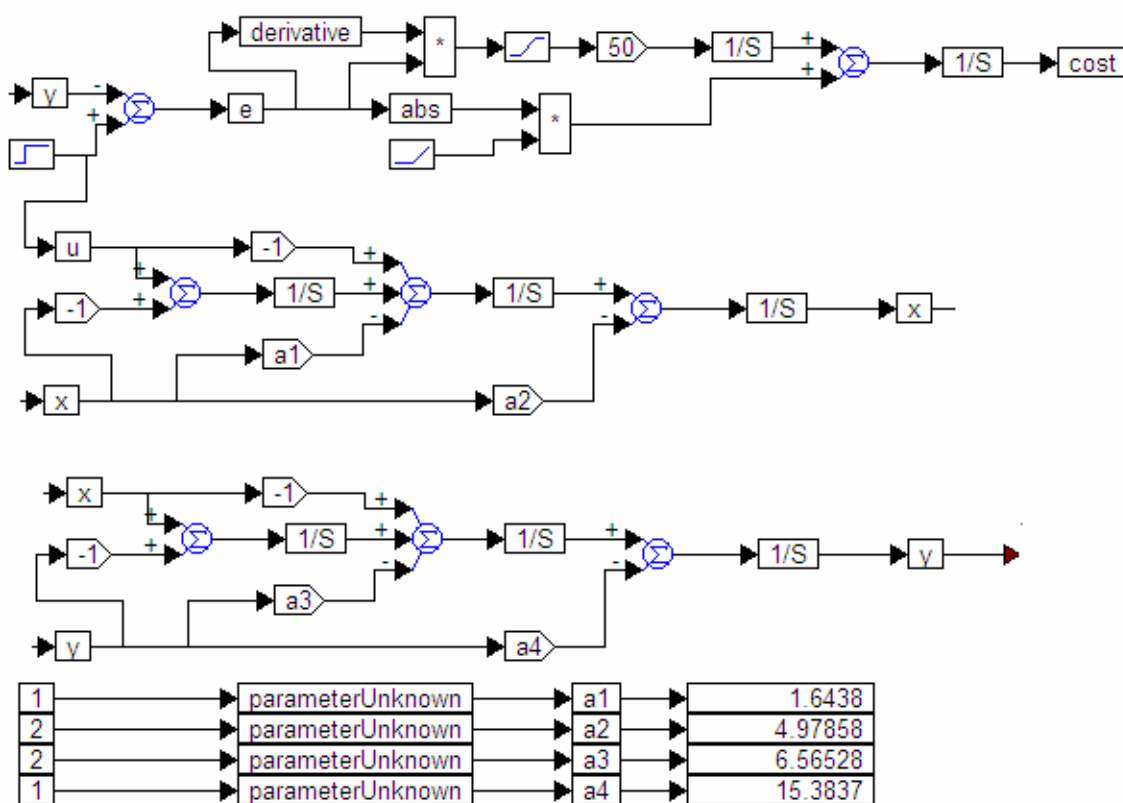


Рис. 6. Структура для оптимизации и результаты в системе шестого порядка

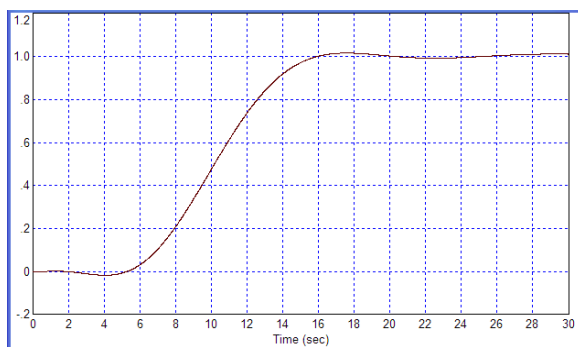


Рис. 7. Переходные процессы в системе шестого порядка по Рис. 6

5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИНОМА СЕДЬМОГО ПОРЯДКА

На Рис. 8 показана структура для моделирования и оптимизации эквивалентного

фильтра, соответствующего системе восьмого порядка. Она моделируется как последовательное соединение фильтра третьего порядка и двух фильтров второго порядка. Полученные коэффициенты показаны в индикаторах результата внизу рисунка. Полученный характеристический полином имеет следующий вид:

$$P_7(s) = (1 + a_1s + a_2s^2 + s^3)(1 + a_3s + s^2) \times (1 + a_4s + s^2). \quad (10)$$

На Рис. 9 показан переходный процесс в этой системе с рассчитанными коэффициентами.

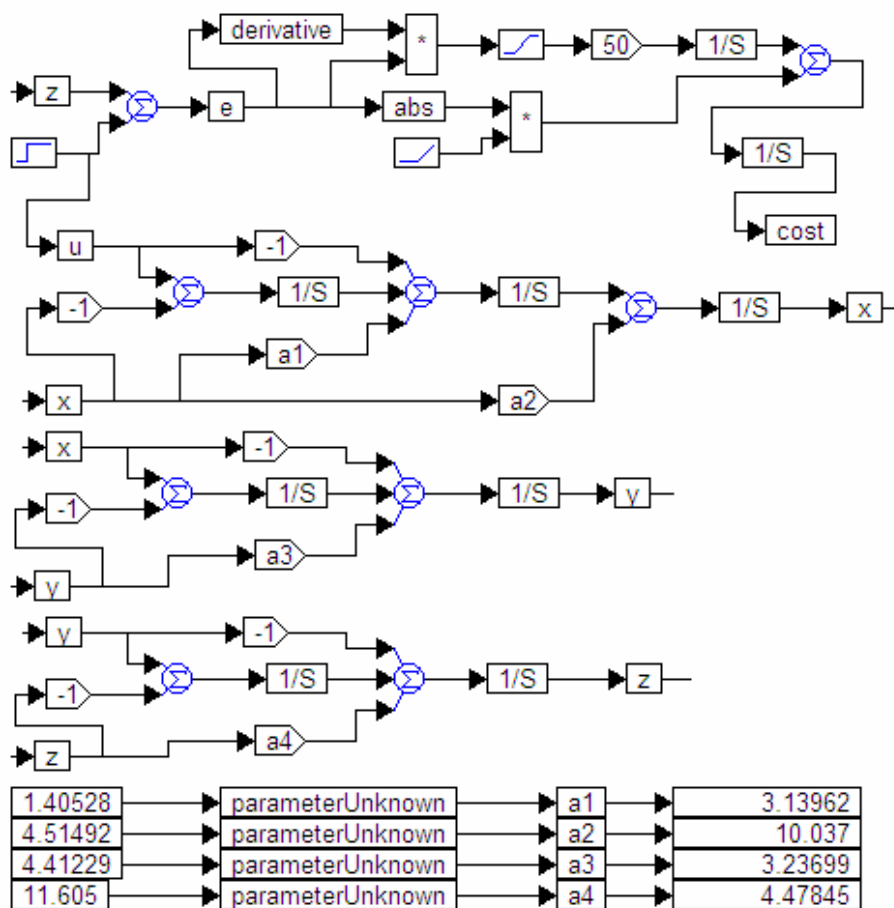


Рис. 8. Структура для оптимизации и результаты в системе седьмого порядка

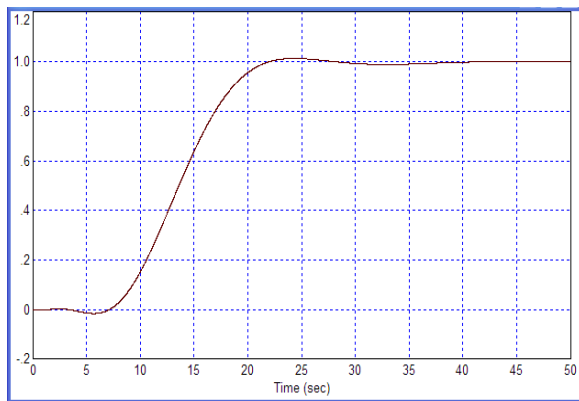


Рис. 9. Переходные процессы в системе седьмого порядка по Рис. 8

6. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИНОМА ВОСЬМОГО ПОРЯДКА

На Рис. 10 показана структура для моделирования и оптимизации эквивалентного фильтра, соответствующего системе пятого порядка. Эта система моделируется как последовательное соединение двух фильтров третьего порядка и одного фильтра второго порядка. Полученные коэффициенты показаны в индикаторах результата внизу рисунка. Полученный характеристический полином имеет следующий вид:

$$P_8(s) = (1 + a_1s + a_2s^2 + s^3) \times (1 + a_3s + a_4s^2 + s^3)(1 + a_5s + s^2). \quad (11)$$

На Рис. 11 показан переходный процесс в этой системе с рассчитанными коэффициентами.

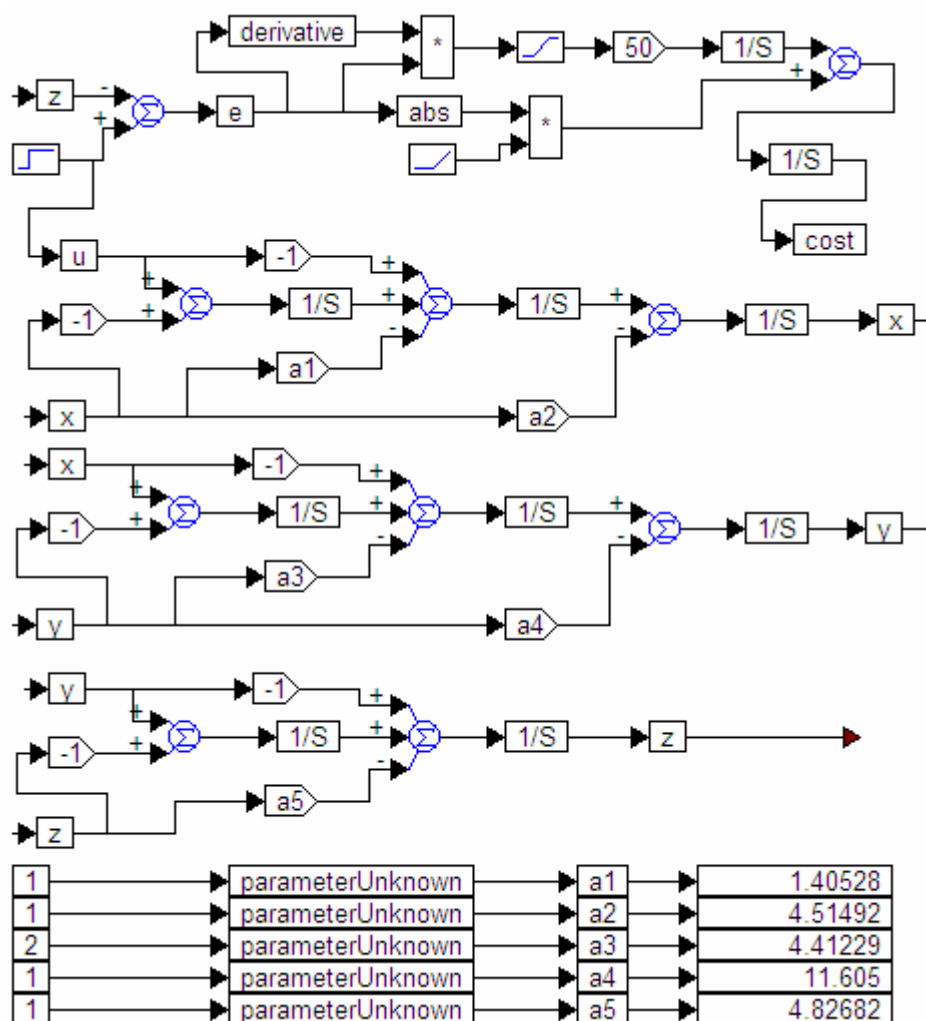


Рис. 10. Структура для оптимизации и результаты в системе восьмого порядка

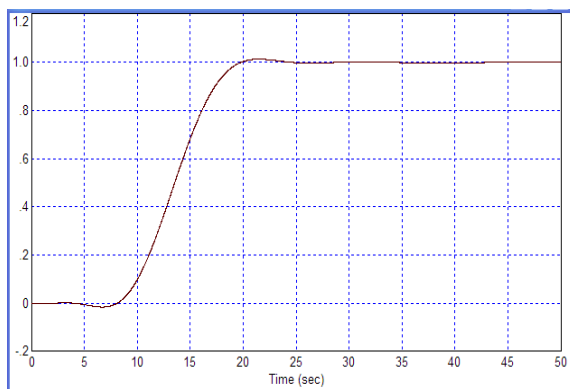


Рис. 11. Переходные процессы в системе восьмого порядка по Рис. 10

7. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИНОМА ДЕВЯТОГО ПОРЯДКА

На Рис. 12 показана структура для моделирования и оптимизации эквивалентного

фильтра, соответствующего системе девятого порядка. Эта система моделируется как последовательное соединение трех фильтров третьего порядка. Полученные коэффициенты показаны в индикаторах результата внизу рисунка. Полученный характеристический полином имеет следующий вид:

$$P_9(s) = (1 + a_1s + a_2s^2 + s^3) \times (1 + a_3s + a_4s^2 + s^3) \times (1 + a_5s + a_6s^2 + s^3). \quad (12)$$

На Рис. 13 показан переходный процесс в этой системе с рассчитанными коэффициентами.

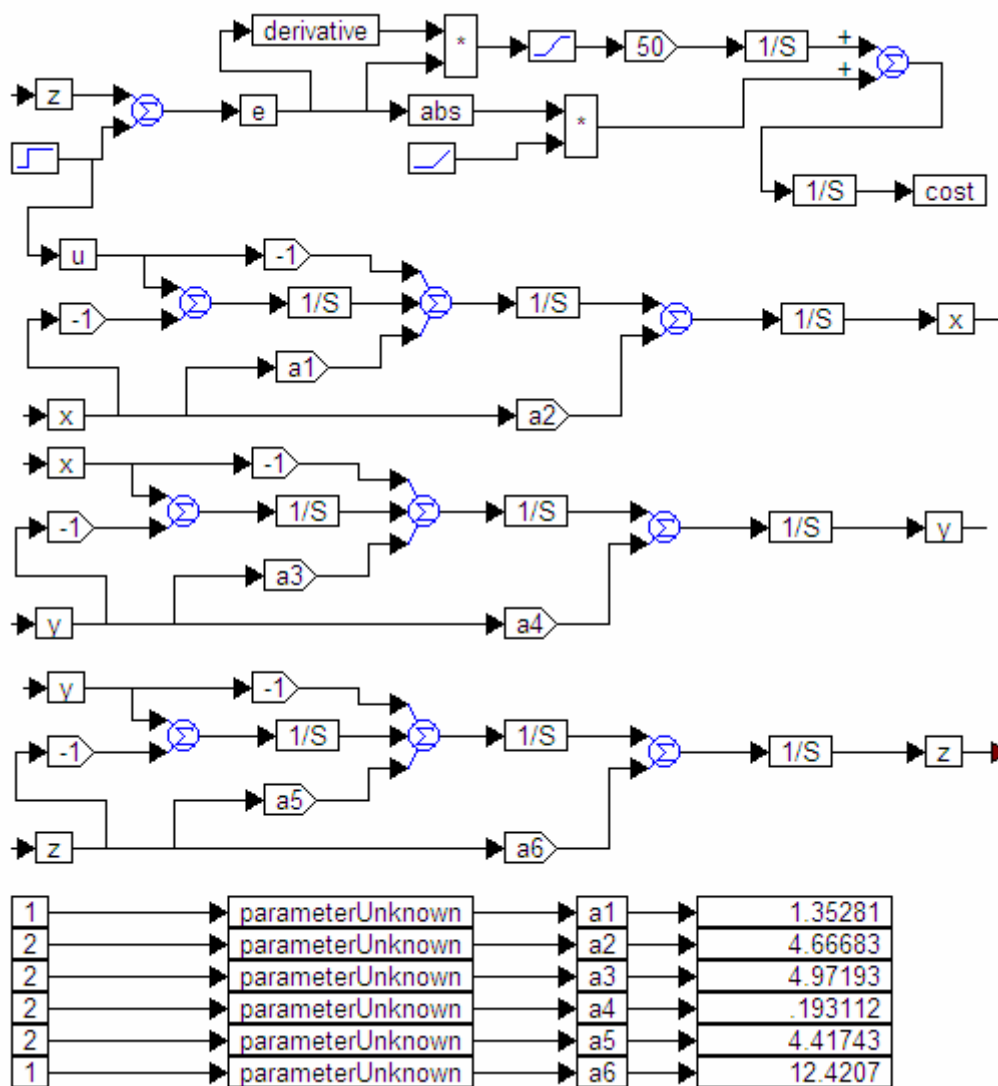


Рис. 12. Структура для оптимизации и результаты в системе девятого порядка

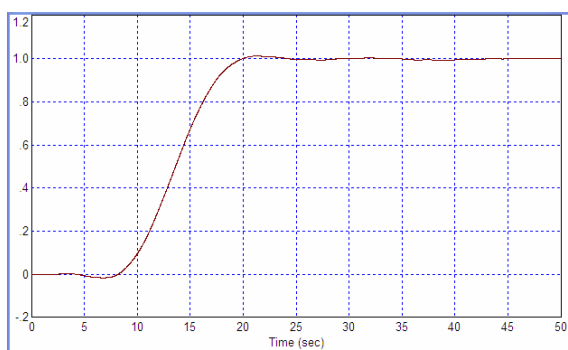


Рис. 13. Переходные процессы в системе девятого порядка по Рис. 12

8. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИНОМА ДЕСЯТОГО ПОРЯДКА

На Рис. 14 показана структура для моделирования и оптимизации эквивалентного

фильтра, соответствующего системе десятого порядка. Эта система моделируется как последовательное соединение двух фильтров третьего порядка и двух фильтров второго порядка. Полученные коэффициенты показаны в индикаторах результата внизу рисунка. Полученный характеристический полином имеет следующий вид:

$$P_{10}(s) = (1 + a_1s + a_2s^2 + s^3) \times (1 + a_3s + a_4s^2 + s^3) \times (1 + a_5s + s^2)(1 + a_6s + s^2). \quad (13)$$

Блок для вычисления стоимостной функции объединен в составной блок для экономии места на графике, что позволяет делать программа VisSim. На Рис. 15 показан переходный процесс в этой системе с рассчитанными коэффициентами.

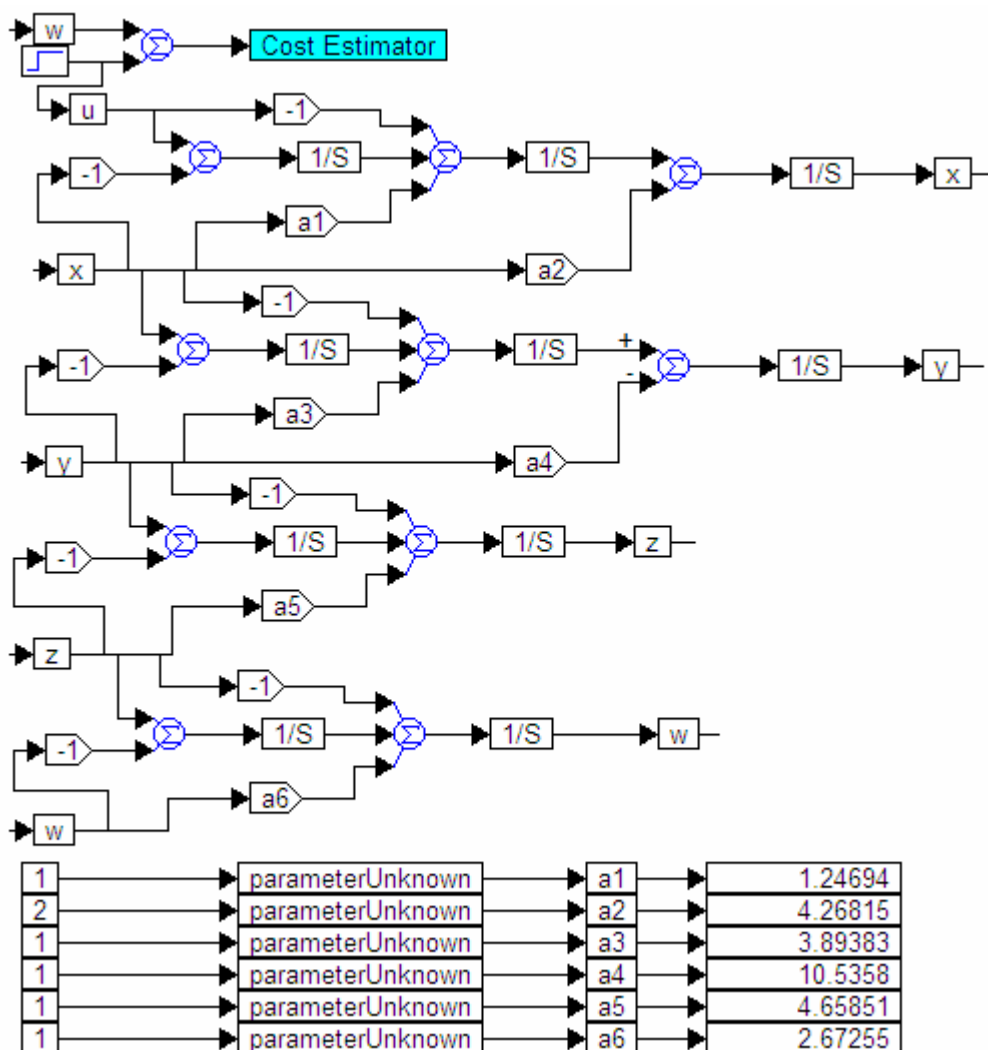


Рис. 14. Структура для оптимизации и результаты в системе девятого порядка

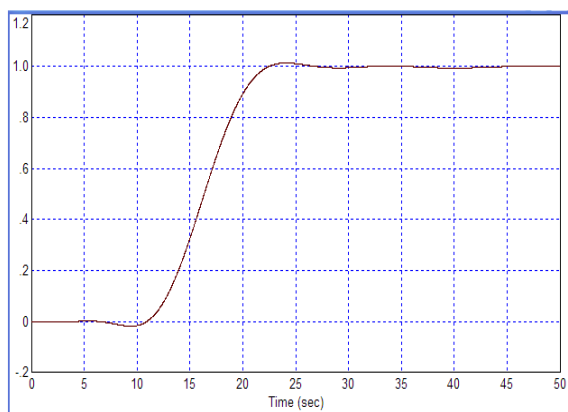


Рис. 15. Переходные процессы в системе девятого порядка по Рис. 14

9. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИНОМА ОДИННАДЦАТОГО ПОРЯДКА

На Рис. 15 показана структура для моделирования и оптимизации эквивалентного фильтра, соответствующего системе одиннадцатого порядка. Эта система моделируется как последовательное соединение трех фильтров третьего порядка и одного фильтра второго порядка. Полученные коэффициенты показаны в индикаторах результата внизу рисунка. Полученный характеристический полином имеет следующий вид:

$$P_{11}(s) = (1 + a_1s + a_2s^2 + s^3) \times (1 + a_3s + a_4s^2 + s^3)(1 + a_5s + a_6s^2 + s^3) \times (1 + a_7s + s^2). \quad (14)$$

На Рис. 16 показан переходный процесс в этой системе с рассчитанными коэффициентами.

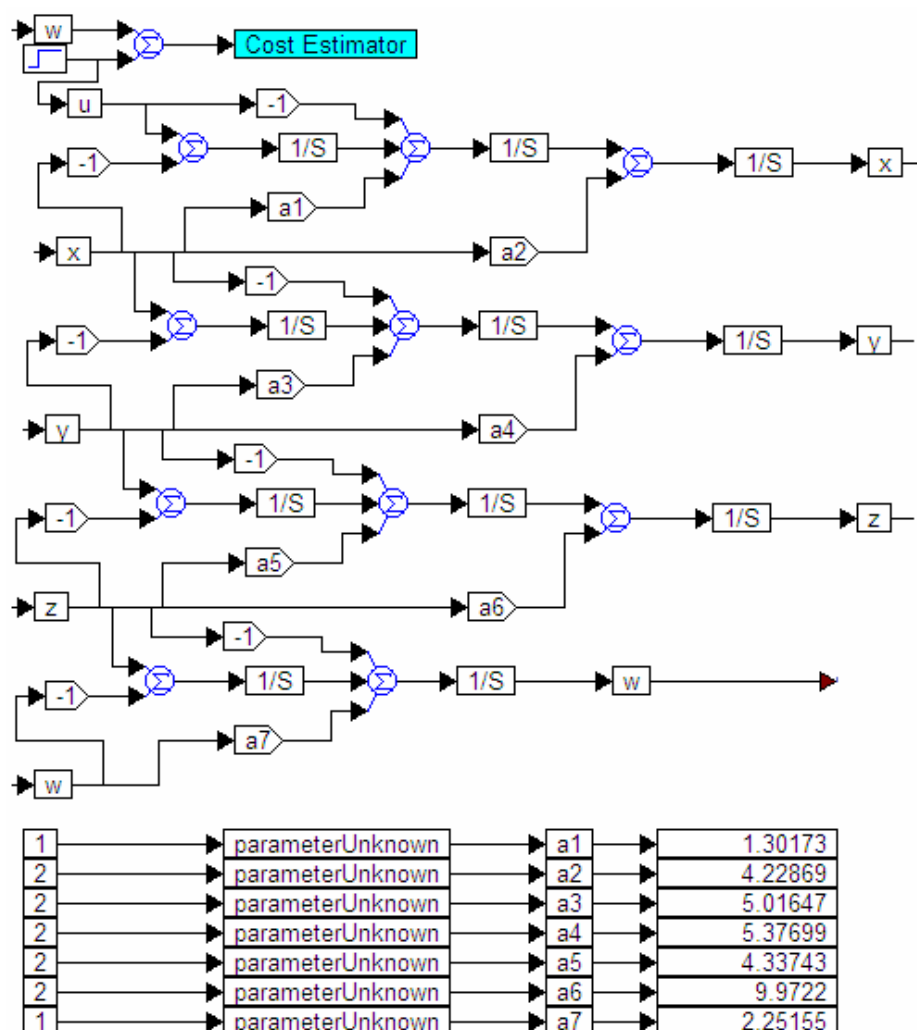


Рис. 16. Структура для оптимизации и результаты в системе одиннадцатого порядка

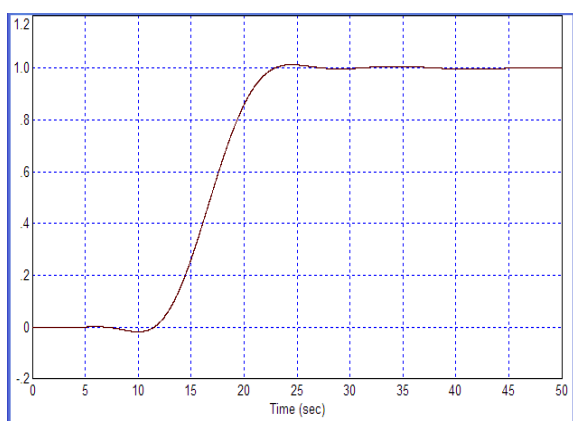


Рис. 17. Переходные процессы в системе одиннадцатого порядка по Рис. 16

10. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИНОМА ДВЕНАДЦАТОГО ПОРЯДКА

На Рис. 18 показана структура для моделирования и оптимизации эквивалентного фильтра, соответствующего системе одиннадцатого порядка. Эта система моделируется как последовательное соединение трех фильтров третьего порядка и одного фильтра второго порядка. Полученные коэффициенты показаны в индикаторах результата внизу рисунка. Полученный характеристический полином имеет следующий вид:

$$P_9(s) = (1 + a_1s + a_2s^2 + s^3) \times \\ \times (1 + a_3s + a_4s^2 + s^3)(1 + a_5s + a_6s^2 + s^3) \times \\ (1 + a_7s + a_8s^2 + s^3). \quad (15)$$

На Рис. 19 показан переходный процесс в этой системе с рассчитанными коэффициентами.

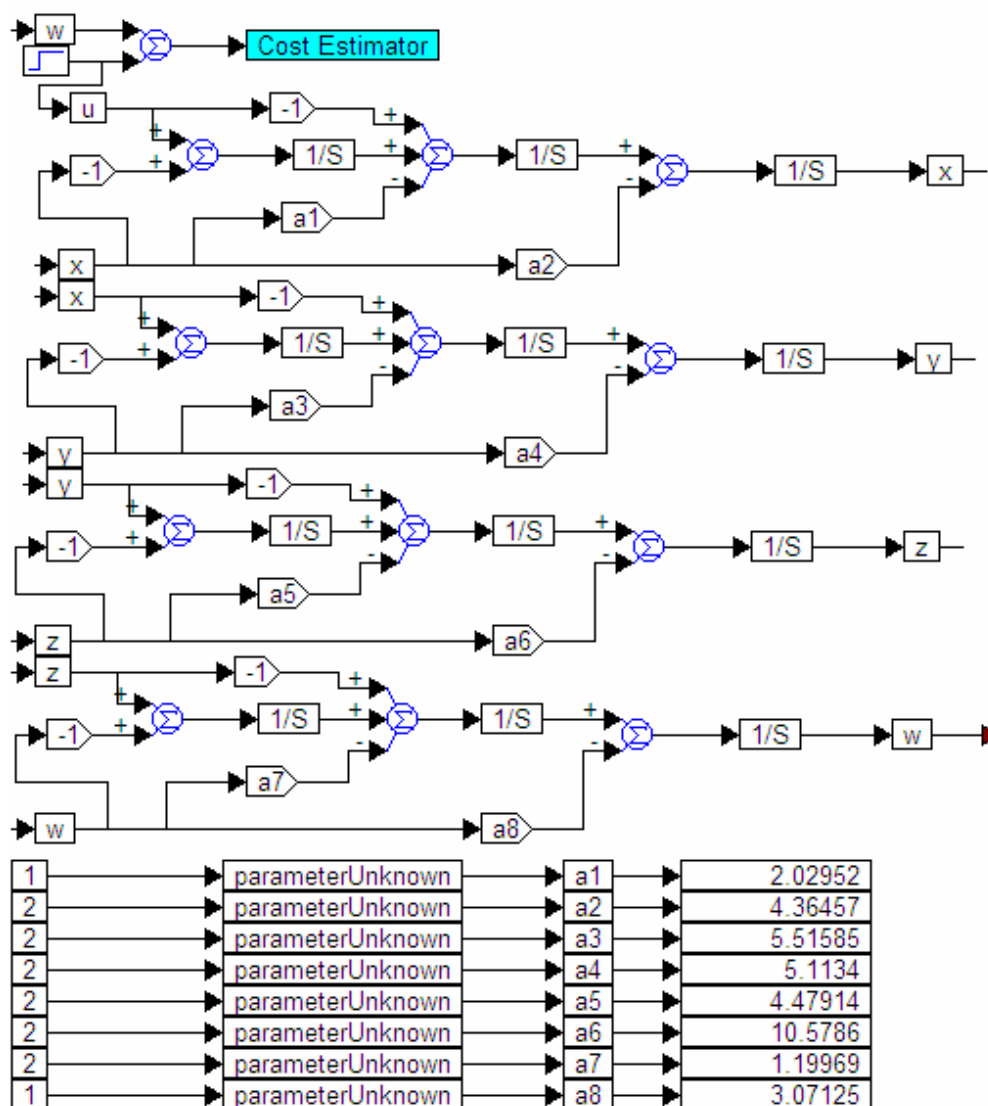


Рис. 18. Структура для оптимизации и результаты в системе двенадцатого порядка

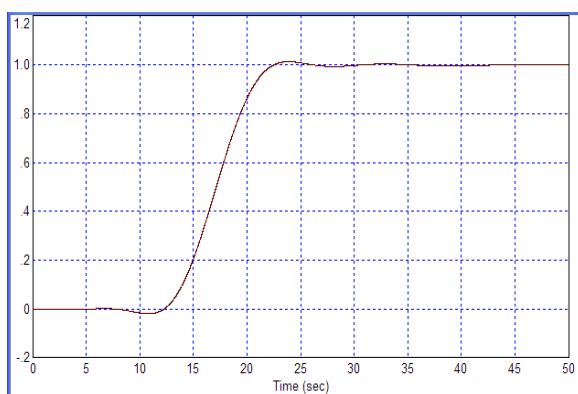


Рис. 19. Переходные процессы в системе двенадцатого порядка по Рис. 18

11. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Получены полиномы вплоть до двенадцатой степени, которые соответствуют определению «желаемый характеристический полином замкнутой динамической системы». Переходные процессы в системах с такими

характеристическими полиномами характеризуются пренебрежимо малым перерегулированием, или полным отсутствием перерегулирования. Особенно это важно в отношении обратного перерегулирования, что отмечено в статье [1]. Для перехода от предписанных коэффициентов полиномов к положению корней полиномов на комплексной плоскости, можно воспользоваться, например, программой *MATLAB*.

Полиномы более высокого порядка едва ли могут потребоваться в практических задачах автоматике, но при необходимости этой методикой можно воспользоваться для вычисления коэффициентов полиномов и более высокой степени. При оптимизации рекомендуется выбирать количество шагов не менее 5000, точность оптимизации 0,001.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных

методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности», проект № 471.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.А. Жмудь. Выбор желаемых полиномов характеристического уравнения замкнутой динамической системы. http://zhurnal.lib.ru/editors/z/zhmudx_w_a/polinom.shtml
- [2] В.А. Жмудь, Л.В. Димитров. Вычисление желаемых коэффициентов характеристического уравнения замкнутой системы автоматического управления. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 1 (15). С. 58–66. http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2016-7_0.pdf
- [3] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Л.В. Димитров. Структуры и методы цифрового управления колебательными объектами. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 1 (15). С. 19–30.
- [4] А.С. Востриков, Г.А. Французова. Теория автоматического регулирования: учебник. М.: Высшая школа, 2006. – 365 с.
- [5] В. А. Жмудь, Г. А. Французова, А. С. Востриков. Динамика мехатронных систем: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. - 176 с.
- [6] В.А. Жмудь. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск. Издательство НГТУ. 2012. – 335 p. ISBN 978-5-7782-2162-8
- [7] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> архив журнала: <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>
- [8] Vadim A. Zhmud, Dashi B. Imekov, Kirill Yu. Lastochkin and Anna V. Lukicheva. New Structure of Regulator for Controlling of Object with Oscillation Features and its Modelling Testing. Proceedings of International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i-2014). Kos Island, Greece, 4-6 June 2014. (Scopus)
- [9] Vadim Zhmud. New Modeling Tested Method for Controlling of Object with Oscillation Features. Proceeding of 2014 International Conference on Mechanical Design, Manufacture and Automation Engineering (MDMAE 2014). ISBN: 978-1-60595-156-0. Thailand, Phuket. Part II. Author statement: Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. P.289 – 296.
- [10] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. The providing of the power saving control of one output value with two controlling channels having different effectiveness and cost of the controlling resource. Proceedings of 23-nd International Scientific and Technical Conference of Transport, Road-Buildong, Agricultural, Hosting & Hauling Military Technics and Technologies “Trans & MOTAUTO ‘15”. 24-27 June, 2015. Varna, Bulgaria. Vol.3. P. 118 – 122. ISSN:1310 – 3946. Publisher: Scientific-technical union of mechanical engineering.
- [11] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. The providing of the power saving control of one output value with two controlling channels having different effectiveness and cost of the controlling resource. International Journal for Science, Technics and Innovations for Industry. 2015. Issue 9. ISSN 1313 – 0226. Sofia. Bulgaria. P. 50 – 54. Publisher: Scientific-technical union of mechanical engineering. URL: www.mech-ing.com/journal
- [12] Zhmud V. A., Yadrishnikov O. D., Semibalamut V. M. Control of the objects with a single output and with two or more input channels of influence. Computational Methods and Experimental Measurements 17. – Wit Press, 2015. – P. 145-156. – (WIT Transactions on Modelling and Simulation ; vol 59). – DOI: 10.2495/CMEM150131. - ISBN 9781845649227. V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, A.S. Vostrikov. Feedback Systems with Pseudo Local Loops. Testing and Measurement: Techniques and Applications: Proceedings of the TMTA-2015. 16-17 January 2015, Phuket Island, Thailand. Taylor &

Francis Group. London. ISBN: 978-1-138-02812-1-8. P. 411 – 416.

- [13] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, A.S. Vostrikov. Design of Robust Energy-Saving Regulators by Means of Optimization Software. Testing and Measurement: Techniques and Applications: Proceedings of the TMTA-2015. 16-17 January 2015, Phuket Island, Taylor & Francis Group. London. ISBN: 978-1-138-02812-1-8. P. 417 – 424.
- [14] V.A. Zhmud, B.I. Pyazkillya. A.V. Liapidevskiy. Numerical optimization of PID-regulator for object with distributed parameters. 6 pages. ADVCIT'15. Paper N 1570214556. ISSN 21803722
- [15] V.A. Zhmud, B.I. Pyazkillya, V.M. Semibalamut, M.V. Trubin, O.D. Yadrishnikov. The two methods of reverse overshoot suppression in automation systems. 6 pages. ADVCIT'15. Paper N 1570212705. ISSN 21803722
- [16] V.A. Zhmud, B.I. Pyazkillya. Identification and Control of Object with Time-Delay Link. 6 pages. ADVCIT'15. Paper N 1570207827. ISSN 21803722
- [17] V. A Zhmud, L.V. Dimitrov. Calculation of Desired Coefficients for the Characteristic Equation of Closed Automatic Control System. Recent. Vol. 17 (2016), No. 2 (48), July. 2016. P. 123–132. URL: <http://www.recentonline.ro/048/Zhmud-R48m.pdf> Румыния. Бухаест. ISSN 1582-0246.
- [18] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, Yu.N. Fomin. Optoelectronic intellectual systems for monitoring of Earth seismic dynamics: results and developing directions. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference CGEM 2016. Conference proceedings. Book 1. Dcience and Technologies in Geology, Eploration and Mining. Volume III. P. 567–574. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: www.sgem.org.
- [19] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, D.O. Tereshkin. Software structure for the laser sensor of the Earth crust Lunar-Solar tide deformations. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference CGEM 2016. Conference proceedings. Book 1. Dcience and Technologies in Geology, Eploration and Mining. Volume III. P. 615–622. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: www.sgem.org.



Вадим Аркадьевич Жмудь, заведующий кафедрой Автоматики в Новосибирском государственном техническом университете, <http://en.nstu.ru/>, доктор технических наук, доцент, ведущий научный специалист Института лазерной физики СО РАН, <http://www.laser.nsc.ru/defeng.htm>, автор более чем 300 научных работ, включая более 20 патентов, 12 учебных пособий. E-mail: zhmud@corp.nstu.ru



Любомир Ванков Димитров, декан машиностроительного факультета Технического университета Софии, <http://ftp.tu-sofia.bg/upravlenie/deans-bg.htm> доктор наук, профессор, автор более 200 научных статей. Область исследований: мехатроника, автоматика, микроэлектронные модули и системы и их применение (MEMS). E-mail: lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg

Choice of High-Order Characteristic Polynomials of Automatic Control of Closed System

V.A. ZHMUD, L.V. DIMITROV

Abstract. The paper resolves the task of seeking of the coefficients of the desired characteristic polynomial of the closed dynamic control system. For the first time the paper gives coefficients for polynomials up to and including the twelfth order.

Key words: control, closed loop, regulators, design of control systems, digital control, feedback, optimization

REFERENCES

- [1] V.A. Zhmud Vybor zhelaemyh polinomov harakteristicheskogo uravnenija zamknoy dinamicheskoy sistemy. http://zhurnal.lib.ru/editors/z/zhmudx_w_a/polinom.shtml
- [2] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. Vychislenie zhelaemyh koefitsientov harakteristicheskogo uravnenija zamknoy sistemy avtomaticheskogo upravlenija. *Avtomatika i programmnaja inzhenerija*. 2016. № 1 (15). S. 58–66. http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2016-7_0.pdf
- [3] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov. Struktury i metody cifrovogo upravlenija kolebatel'nymi ob'ektami. *Avtomatika i programmnaja inzhenerija*. 2016. № 1 (15). S. 19–30.
- [4] A.S. Vostrikov, G.A. Francuzova. *Teoriya avtomaticheskogo regulirovanija: uchebnik*. M.: Vysshaja shkola, 2006. – 365 s.
- [5] V. A. Zhmud, G. A. Francuzova, A. S. Vostrikov. *Dinamika mehatronnyh sistem: ucheb. posobie*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2014. - 176 s.
- [6] V.A. Zhmud. Modelirovanie, issledovanie i optimizacija zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravlenija. Monografija. Novosibirsk. Izdatel'stvo NGTU. 2012. – 335 p. ISBN 978-5-7782-2162-8
- [7] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. *Italian Science Review*. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> архив журнала: <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>
- [8] Vadim A. Zhmud, Dashi B. Imekov, Kirill Yu. Lastochkin and Anna V. Lukicheva. New Structure of Regulator for Controlling of Object with Oscillation Features and its Modelling Testing. *Proceedings of International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i-2014)*. Kos Island, Greece, 4-6 June 2014. (Scopus)
- [9] Vadim Zhmud. New Modeling Tested Method for Controlling of Object with Oscillation Features. *Proceeding of 2014 International Conference on Mechanical Design, Manufacture and Automation Engineering (MDMAE 2014)*. ISBN: 978-1-60595-156-0. Thailand, Phuket. Part II. Author statement: Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. P.289 – 296.
- [10] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. The providing of the power saving control of one output value with two controlling channels having different effectiveness and cost of the controlling resource. *Proceedings of 23-nd International Scientific and Technical Conference of Transport, Road-Buildong, Agricultural, Hosting & Hauling Military Technics and Technologies "Trans & MOTAUTO '15"*. 24-27 June, 2015. Varna, Bulgaria. Vol.3. P. 118 – 122. ISSN:1310 – 3946. Publisher: Scientific-technical union of mechanical engineering.
- [11] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. The providing of the power saving control of one output value with two controlling channels having different effectiveness and cost of the controlling resource. *International Journal for Science, Technics and Innovations for Industry*. 2015. Issue 9. ISSN 1313 – 0226. Sofia, Bulgaria. P. 50 – 54. Publisher: Scientific-technical union of mechanical engineering. URL: www.meching.com/journal
- [12] Zhmud V. A., Yadrishnikov O. D., Semibalamut V. M. Control of the objects with a single output and with two or more input channels of influence. *Computational Methods and Experimental Measurements* 17. – Wit Press, 2015. – P. 145-156. – (WIT Transactions on Modelling and Simulation ; vol 59). – DOI: 10.2495/CMEM150131. - ISBN 9781845649227. V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, A.S. Vostrikov. *Feedback Systems with Pseudo Local Loops. Testing and Measurement: Techniques and Applications: Proceedings of the TMTA-2015*. 16-17 January 2015, Phuket Island, Thailand. Taylor & Francis Group. London. ISBN: 978-1-138-02812-1-8. P. 411 – 416.
- [13] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, A.S. Vostrikov. Design of Robust Energy-Saving Regulators by Means of Optimization Software. *Testing and Measurement: Techniques and Applications: Proceedings of the TMTA-2015*. 16-17 January 2015, Phuket Island, Taylor & Francis Group. London. ISBN: 978-1-138-02812-1-8. P. 417 – 424.
- [14] V.A. Zhmud, B.I. Pyazkillya. A.V. Liapidevskiy. Numerical optimization of PID-regulator for object with distributed parameters. 6 pages. *ADVCIT'15*. Paper N 1570214556. ISSN 21803722
- [15] V.A. Zhmud, B.I. Pyazkillya, V.M. Semibalamut, M.V. Trubin, O.D. Yadrishnikov. The two methods of reverse overshoot suppression in automation systems. 6 pages. *ADVCIT'15*. Paper N 1570212705. ISSN 21803722
- [16] V.A. Zhmud, B.I. Pyazkillya. Identification and Control of Object with Time-Delay Link. 6 pages. *ADVCIT'15*. Paper N 1570207827. ISSN 21803722
- [17] V. A Zhmud, L.V. Dimitrov. Calculation of Desired Coefficients for the Characteristic Equation of Closed Automatic Control System. *Recent*. Vol. 17 (2016), No. 2 (48), July. 2016. P. 123–132. URL: <http://www.recentonline.ro/048/Zhmud-R48m.pdf> ISSN 1582-0246.
- [18] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, Yu.N. Fomin. Optoelectronic intellectual systems for monitoring of Earth seismic dynamics: results and developing directions. *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference CGEM 2016*. Conference proceedings. Book 1. Dcience and Technologies in Geology, Ecploation and Mining. Volume III. P. 567–574. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: www.sgem.org.
- [19] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, D.O. Tereshkin. Software structure for the laser sensor of the Earth crust Lunar-Solar tide deformations. *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference CGEM 2016*. Conference proceedings. Book 1. Dcience and Technologies in Geology, Ecploation and Mining. Volume III. P. 615–622. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: www.sgem.org.