

УДК 681.5

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДАЛЬНОГО СПОСОБА ПОСТРОЕНИЯ SIMULINK-МОДЕЛЕЙ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ТРАНСПОРТНЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

© 2022 М.В.Баканов, А.В. Данеев, В.Н. Сизых

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Статья поступила в редакцию 15.04.2022

В статье рассматривается методика проектирования модальных ПИД-регуляторов для редуцированных динамических систем первого порядка и динамических объектов первого порядка с транспортным запаздыванием. Разрабатывается Simulink-модель для исследования таких систем и объектов. Приводятся результаты исследования и тестирования разработанной модели в программной среде Matlab/Simulink.

Ключевые слова: модальное управление, ПИД-регулятор, транспортное запаздывание.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-2-90-96

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] был разработан модальный метод проектирования ПИД-регуляторов для динамических систем второго и более высокого порядков. Суть модального способа ПИД-регулирования сводится к выбору параметров регулятора таким образом, чтобы его нули и полюса соответствовали полюсам аппроксимированного полиномами первой или второй степени многомерного объекта. Доказано, что в этом случае обеспечивается наилучшее качество переходных процессов замкнутой регулятором системы.

В настоящей статье ставится задача описания и тестирования предложенного в [1] модального метода проектирования для аппроксимированных систем первого порядка и объектов первого порядка с запаздыванием.

1. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПЕРВОГО ПОРЯДКА И СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Системы первого порядка и системы, которые могут быть аппроксимированы уравнениями первого порядка, главным образом характеризуются постоянной времени T передаточной функции (1)

Баканов Максим Витальевич, аспирант.

E-mail: maximbakanov@mail.ru

Данеев Алексей Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации». E-mail: daneev@mail.ru

Сизых Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов». E-mail: sizykh_vn@mail.ru

$$W(s) = \frac{1}{Ts + 1}, \quad (1)$$

Коэффициенты ПИД-регулятора, определяемые по постоянным времени для различных систем первого порядка K_p , K_i , K_d и постоянные времени согласно описанной в [1] методике предлагается определять по формулам:

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} = \frac{T}{T} = 1, \quad T_d = \frac{K_d}{K_p} = \frac{T}{T} = 1, \quad T_I = \frac{K_P}{K_I},$$

в которых дифференциальная составляющая K_d и интегральная составляющая K_i корректируются, как показали исследования [1], справочными коэффициентами $\alpha = [0.1, 3]$ и $\varepsilon = [0.1, 2]$ соответственно (табл. 1), N -коэффициент коррекции постоянной времени фильтра высоких частот.

Большое число промышленных объектов (например, бортовая инерциальная навигационная система самолета [2]) может быть приближенно смоделировано системами первого порядка с запаздыванием (FOPDT-моделями [2]). FOPDT-модели являются комбинацией моделей систем первого порядка со звеном постоянного транспортного запаздывания. Их передаточная функция задается формулой (2)

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-Ls} \quad (2)$$

и представляется s -образной кривой на рис. 1. Она характеризуется двумя константами: временем задержки (постоянной транспортного запаздывания) L и постоянной времени T объекта первого порядка.

Для расчета коэффициентов ПИД-регуляторов в этом случае предлагается использовать формулы, приведенные в табл. 2.

Для проверки предложенного метода проектирования ПИД-регуляторов, создадим

Таблица 1. Предлагаемые формулы для расчетов коэффициентов ПИД-регуляторов для систем первого порядка

Объект	Параметры ПИД-регулятора					
	K_P	K_I	K_D	T_D	T_I	N
T	T	αT	εT	1	1	2...20
Пределы ограничений	T	αT $\alpha = 0.1...3$	εT $\varepsilon = 0.1...2$	ε $\varepsilon = 0.1...2$	$\frac{1}{\alpha}$ $\alpha = 0.1...3$	

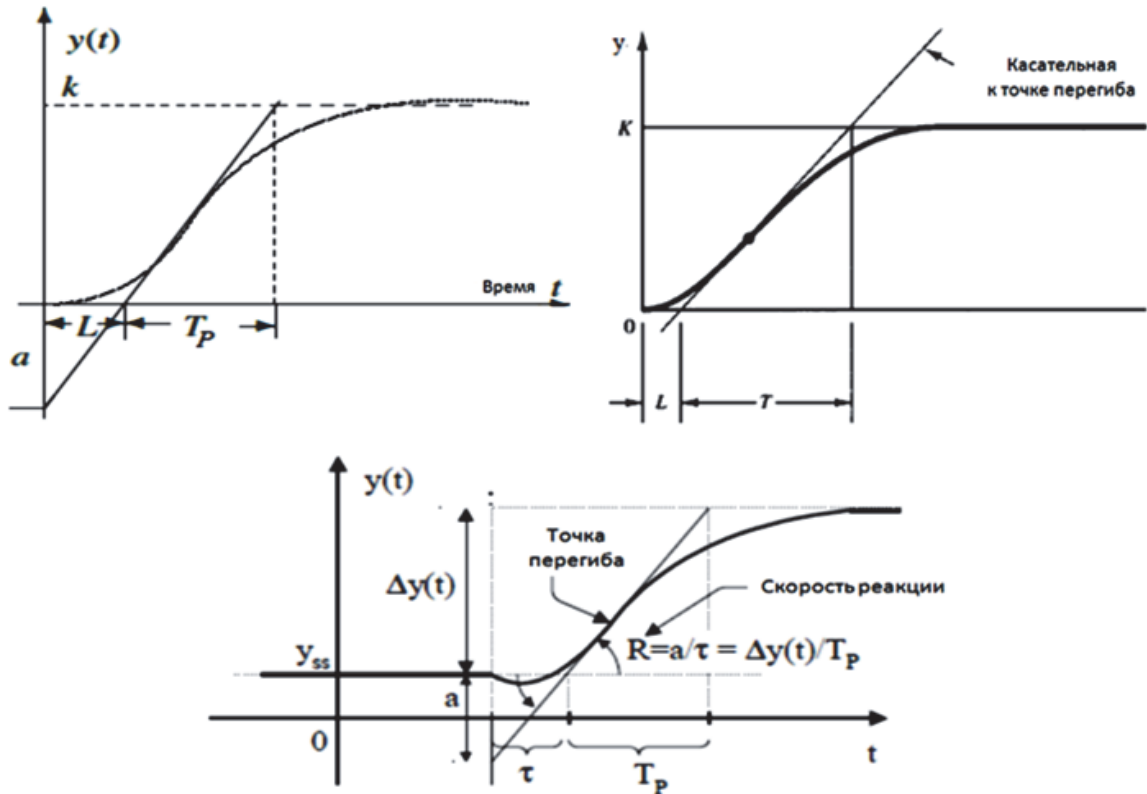


Рис. 1. S-образная кривая реакции системы с запаздыванием

Таблица 2. Предлагаемые формулы для расчетов коэффициентов ПИД-регуляторов для систем первого порядка с запаздыванием

Объект	Параметры ПИД-регулятора					
	K_P	K_I	K_D	T_D	T_I	N
T	T	αT	εT	1	1	2...20
Пределы ограничений	T	αT $\alpha = 0.1...3$	εT $\varepsilon = 0.1...2$	ε $\varepsilon = 0.1...2$	$\frac{1}{\alpha}$ $\alpha = 0.1...3$	

Simulink-модель, изображенную на рис. 2, с четырьмя различными аппроксимированными системами, три из которых являются системами первого порядка, а четвертая – описывает процесс первого порядка с транспортным запаздыванием.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

При тестировании в среде Matlab предложенного метода проектирования ПИД-регуляторов [1] для систем первого порядка и объекта перво-

го порядка с запаздыванием, необходимо применить формулы, приведенные в табл. 2, в виде функции, обозначаемой «PID_method». Значения законов ПИД-регулирования, вычисленные по предложенным формулам, а также величины коэффициентов настройки K_D и K_I , ускоряющие реакцию системы и снижающие перерегулирование, приведены в табл.3.

При подстановке вычисленных коэффициентов ПИД в Simulink-модель для наблюдения реакции конкретной системы необходимо производить действия с переключателями ManualSwitch. При этом для каждой системы результаты реакции отображаются при помощи блока Scope в виде графиков, изображенных на рис. 3 и 4.

На рис. 3 изображена реакция системы 1 (sys1) при следующем положении переключателей:

ManualSwitch – вверх, ManualSwitch2 – вверх, а положение ManualSwitch1 произвольно; и значениях коэффициентов, вычисленных в табл. 3 в первом случае. Таким образом, наблюдается воздействие обычного ПИД-регулятора на систему 1 (sys1) по методу Николса - Циглера [1].

На рис. 4 изображена реакция системы 1 (sys1) при следующем положении переключателей: ManualSwitch – вниз, ManualSwitch1 – вверх, ManualSwitch2 – вверх; и значениях коэффициентов, вычисленных в таблице 3 в первом случае. Таким образом, наблюдается воздействие встроенного ПИД-контроллера Simulink на систему 1 (sys1).

На рис. 5 изображена реакция системы 1 (sys1) при следующем положении переключателей: ManualSwitch – вниз, ManualSwitch1 – вниз,

Таблица 3. Вычисленные значения коэффициентов ПИД-регуляторов

№	Параметры ПИД								
	T	K	L	K_F	K_I	K_D	T_D	T_I	N
1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
2	1	1	0.3	1	0.3	0.3	0.3	3.333	2

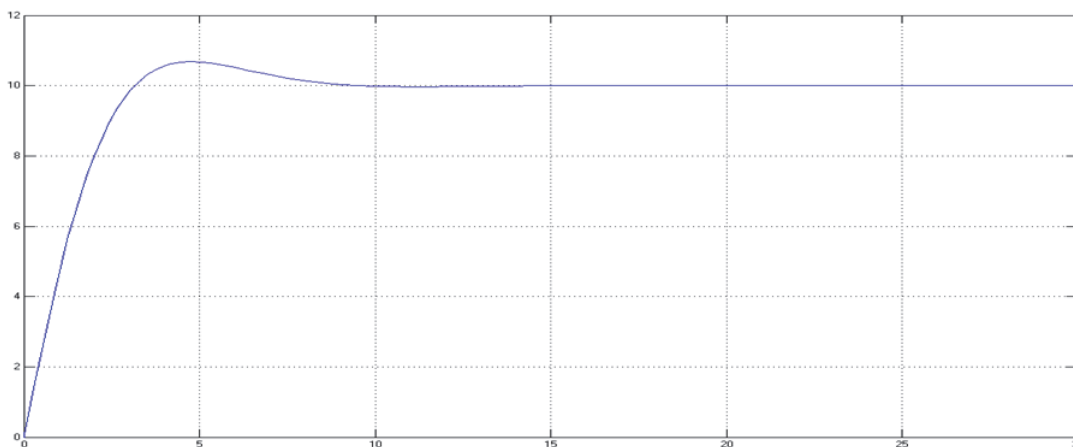


Рис. 3. воздействие обычного ПИД-регулятора на систему 1 (sys1)



Рис. 4. воздействие встроенного ПИД-регулятора на систему 1 (sys1)

ManualSwitch2 – вверх; и значениях коэффициентов, вычисленных в таблице 3 в первом случае. Таким образом, наблюдается воздействие ПИД-регулятора, смоделированного с учетом фильтра низких частот, на систему 1 (sys1).

На рис. 6 изображена реакция системы 2 (sys2) при следующем положении переключателей: ManualSwitch – вверх, ManualSwitch2 –

вверх, а положение остальных переключателей – произвольно; и значениях коэффициентов, вычисленных в табл. 3 во втором случае. Таким образом, наблюдается воздействие обычного ПИД-регулятора на систему 2 (sys2).

На рис. 7 изображена реакция системы 2 (sys2) при следующем положении переключателей: ManualSwitch – вверх, ManualSwitch2 –

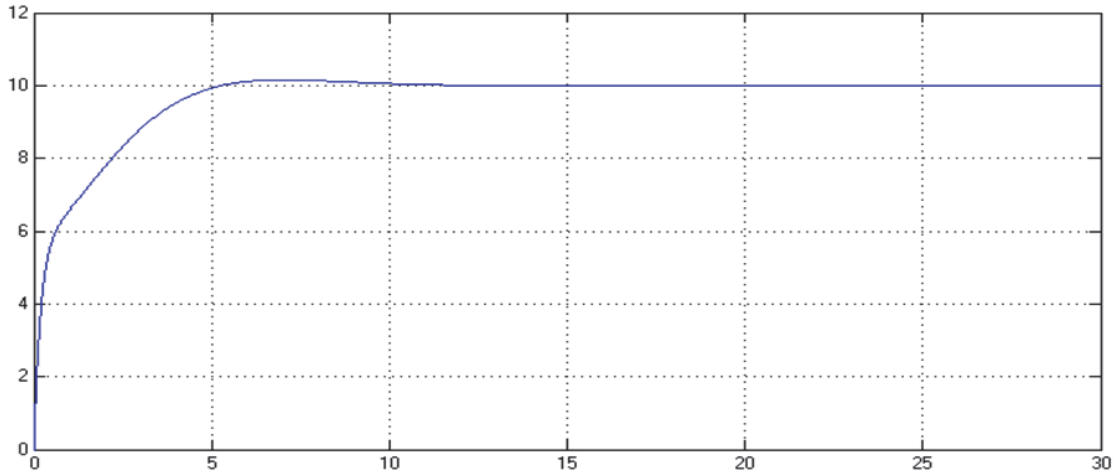


Рис. 5. воздействие регулятора, смоделированного с учетом фильтра низких частот ПИД-регулятора на систему 1 (sys1)

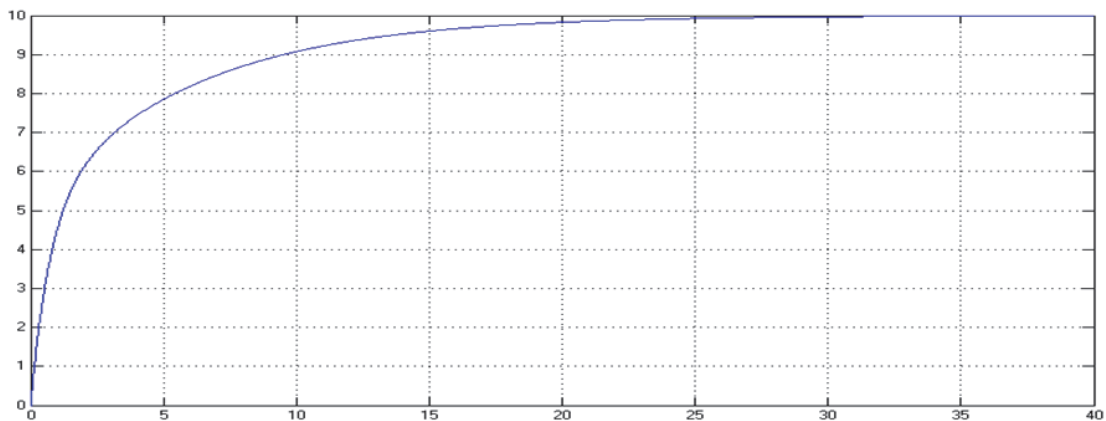


Рис. 6. воздействие обычного ПИД-регулятора на систему 2 (sys2)

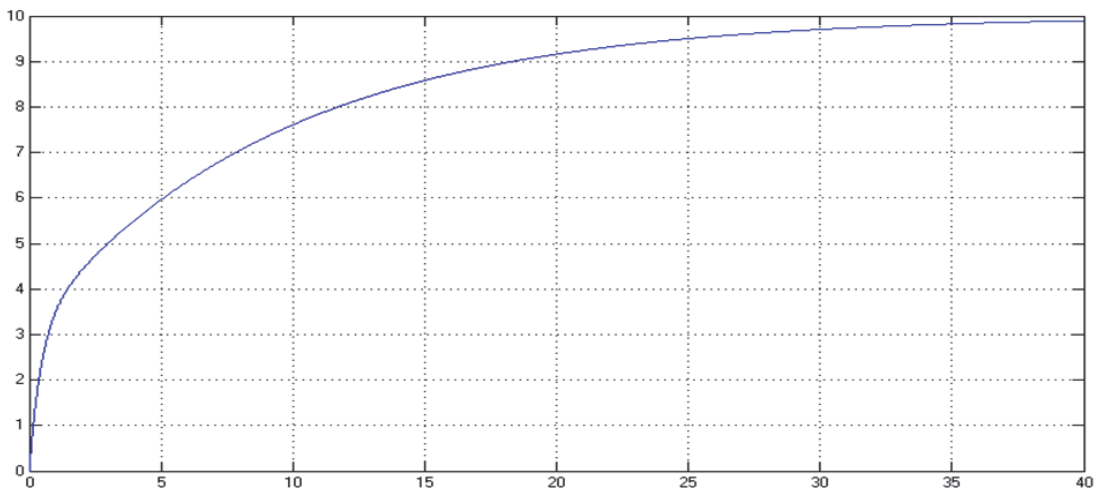


Рис. 7. Воздействие встроенного ПИД-регулятора на систему 2 (sys2)

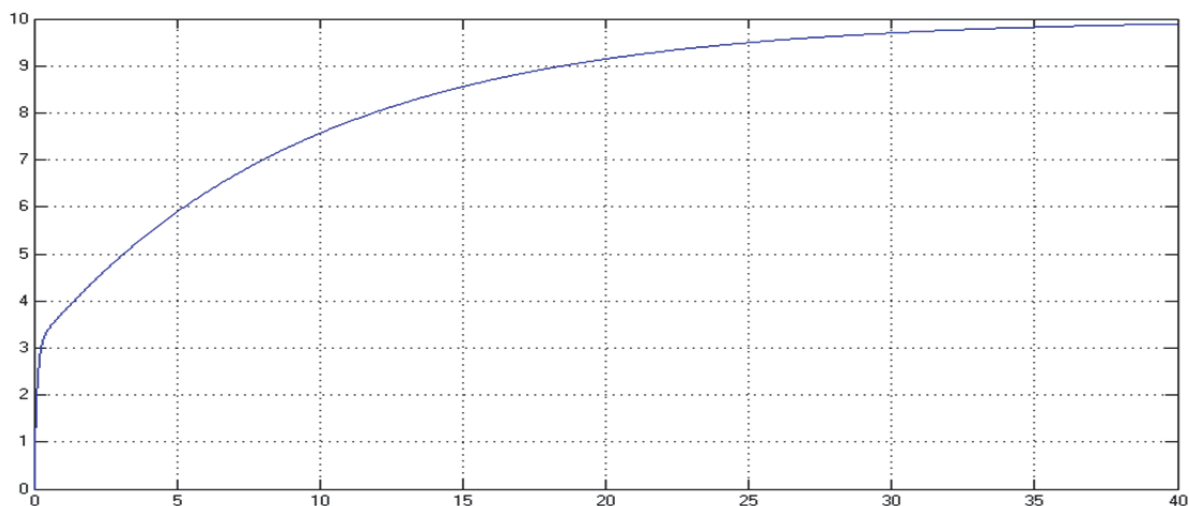


Рис. 8. Воздействие регулятора, смоделированного с учетом фильтра низких частот ПИД-регулятора на систему 2 (sys2)

– вниз, ManualSwitch3 – вверх, а положение остальных переключателей – произвольно; и значениях коэффициентов, вычисленных в табл. 3 во втором случае. Таким образом, наблюдается воздействие встроенного ПИД-регулятора на систему 2 (sys2).

На рис. 8 изображена реакция системы 2 (sys2) при следующем положении переключателей: ManualSwitch – вниз, ManualSwitch1 – вниз, ManualSwitch2 – вниз, ManualSwitch3 – вверх, а положение остальных переключателей – произвольно; и значениях коэффициентов, вычисленных в табл. 3 во втором случае. Таким образом, наблюдается воздействие ПИД-регулятора, смоделированного с учетом фильтра низких частот, на систему 2 (sys2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты исследований на основе простой и эффективной методики проектирования ПИД-регуляторов, основанной на знании параметров свободного движения объектов. Предложенная модель была протестирована на различных динамических системах, включая системы первого, второго, третьего и четвертого порядков, а также объектов первого порядка с запаздыванием. Приведены результаты численного моделирования: зависимости реакций систем на ступенчатый входной сигнал $10 \cdot 1(t)$.

Анализ результатов тестирования показывает, что важным компромиссом моделирования является компромисс между средней быстротой сглаживания выходного сигнала и приемлемым перерегулированием. Это позволяет получить требуемые показатели качества переходных процессов: аperiodичность выходного сигнала и минимальное время регулирования, а также определить величину критического транспорт-

ного запаздывания, при котором объект управления становится неустойчивым.

Ряд близких и смежных вопросов управления объектами различной природы рассмотрен в работах [3-14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сизых В.Н. Алгоритмы управления мобильным роботом по методу обратных задач динамики / В.Н. Сизых, М.В. Баканов // Инфраструктура и эксплуатация наземного транспорта. – Нижний Новгород, 2019. – С. 139-144.
2. Булгаков, В.В. Сравнительный анализ формализованных методов синтеза регулятора следящей системы / В.В. Булгаков, В.С. Кулабухов // Приборы. – 2013. – № 1(151). – С. 39-44.
3. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control // Proc. IFACWorkshop. Terassa, Spain, Apr. 5-7, 2000.
4. Антошкин, С.Б. Система управления авто-номного робота на основе метода обратных задач динамики / С.Б. Антошкин, М.В. Баканов, В.Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 2 (62). – С. 15-23.
5. Ким, Д.П. Алгебраический метод синтеза линейных непрерывных систем управления / Д.П. Ким // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 1. – С. 9-15.
6. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum setting for automatic controllers // Trans. ASME. – 1942. – № 64. – С. 759-768.
7. Farhan A.S. New efficient model-based PID design method // European Scientific Journal Edition. 2013. № 9(15). С. 181-190.
8. Сизых, В.Н. Ассоциативный автомат адаптивно-

- го управления технологическими процессами на основе нейронных сетей / В.Н. Сизых, А.Ю. Мухопад // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2014. – № 1(54). – С. 34-45.
9. Сизых, В.Н. Алгоритмы управления мобильным роботом на основе метода обратных задач динамики / В.Н. Сизых, М.В. Баканов, И.И. Белобров, Е.Ю. Беляев // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – № 1. – С. 284-288.
 10. Сизых, В.Н. Модальное управление мобильным роботом при дифференциальном отклонении колесной пары / В.Н. Сизых, М.В. Баканов // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2019. – № 1 (2). – С. 62-71.
 11. Сизых, В.Н. Математическая модель для адаптивного управления трёхколёсным мобильным роботом / В.Н. Сизых, М.В. Баканов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – Материалы I международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 9-18.
 12. Данеев А.В. К апостериорному моделированию нестационарных гиперболических систем / А.В. Данеев, В.А. Русанов, М.В. Русанов, В.Н. Сизых // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. – Т. 20. – № 1 (81). – С. 106-113.
 13. Sizykh V.N., Daneev A.V., Dambaev J.G. Methodology of approximately optimal synthesis of fuzzy controllers for circuit of improvement and localization // Far East Journal of Mathematical Sciences. 2017. Т. 101. № 3. С. 487-506.
 14. Агеев, А.М. Синтез оптимальных регуляторов системы управления самолетом через решение обратной задачи АКОР / А.М. Агеев, В.Н. Сизых // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2014. – № 3 (56). – С. 7-22.

INVESTIGATION OF A MODEL METHOD FOR CONSTRUCTING SIMULINK MODELS OF PID CONTROLLERS FOR FIRST-ORDER DYNAMIC SYSTEMS WITH TRANSPORT DELAY

© 2022 M.V. Bakanov, A.V. Daneev, V.N. Sizykh

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

The article discusses the methodology of designing modal PID controllers for reduced first-order dynamic systems and first-order dynamic objects with transport delay. A Simulink model is being developed for the study of such systems and objects. The results of the research and testing of the developed model in the Matlab/Simulink software environment are presented.

Keywords: modal control, PID controller, transport delay.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-2-90-96

REFERENCES

1. Sizykh V.N. Algoritmy upravleniya mobil'nym robotom po metodu obratnykh zadach dinamiki / V.N. Sizykh, M.V. Bakanov // Infrastruktura i ekspluatatsiya nazemnogo transporta. – Nizhnij Novgorod, 2019. – С. 139-144.
2. Bulgakov, V.V. Sravnitel'nyj analiz formalizovannykh metodov sinteza regul'yatora sledyashchej sistemy / V.V. Bulgakov, V.S. Kulabuhov // Pribory. – 2013. – № 1(151). – С. 39-44.
3. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control // Proc. IFACWorkshop. Terassa, Spain, Apr. 5-7, 2000.
4. Antoshkin, S.B. Sistema upravleniya avto-nomnogo robota na osnove metoda obratnykh zadach dinamiki / S.B. Antoshkin, M.V. Bakanov, V.N. Sizykh // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. – 2019. – № 2 (62). – С. 15-23.
5. Kim, D.P. Algebraicheskiy metod sinteza linejnyh nepreryvnykh sistem upravleniya / D.P. Kim // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. – 2011. № 1. – С. 9-15.
6. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum setting for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. № 64. С. 759-768.
7. Farhan A.S. New efficient model-based PID design method // European Scientific Journal Edition. 2013. № 9(15). С. 181-190.
8. Sizykh, V.N. Associativnyj avtomat adaptivnogo upravleniya tekhnologicheskimi processami na osnove nejronnykh setej / V.N. Sizykh, A.YU. Muhopad // Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2014. – № 1(54). – С. 34-45.
9. Sizykh, V.N. Algoritmy upravleniya mobil'nym robotom

- na osnove metoda obratnykh zadach dinamiki / V.N. Silyh, M.V. Bakanov, I.I. Belobrov, E.YU. Belyaev // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. – 2019. – № 1. – S. 284-288.
10. Silyh, V.N. Modal'noe upravlenie mobil'nym robotom pri differentsial'nom otklonenii kolesnoj pary / V.N. Silyh, M.V. Bakanov // Informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnyimi sistemami. – 2019. – № 1 (2). – S. 62-71.
 11. Silyh, V.N. Matematicheskaya model' dlya adaptivnogo upravleniya tryokkolyosnym mobil'nym robotom / V.N. Silyh, M.V. Bakanov // Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo. Materialy I mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2018. S. 9-18.
 12. Daneev A.V. K aposteriornomu modelirovaniyu nestacionarnykh giperbolicheskikh sistem / A.V. Daneev, V.A. Rusanov, M.V. Rusanov, V.N. Silyh // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2018. - T. 20. - № 1 (81). - S. 106-113.
 13. Silykh V.N., Daneev A.V., Dambaev J.G. Methodology of approximately optimal synthesis of fuzzy controllers for circuit of improvement and localization // Far East Journal of Mathematical Sciences. 2017. T. 101. № 3. S. 487-506.
 14. Ageev, A.M. Sintez optimal'nykh regulyatorov sistemy upravleniya samoletom cherez reshenie obratnoj zadachi AKOR / A.M. Ageev, V.N. Silyh // Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014. № 3 (56). S. 7-22.

Maxim Bakanov, Graduate Student.

E-mail: maximbakanov@imail.ru

Aleksey Daneev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security. E-mail: daneev@mail.ru

Viktor Silykh, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automation of Production Processes. E-mail: silykh_vn@mail.ru