

Программное обеспечение для моделирования сложных динамических систем управления с нестабильными параметрами

Т. А. Езангина*, С. А. Гайворонский

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
г. Томск, Российская Федерация

Адрес: 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, д. 30

* eza-tanya@yandex.ru

Аннотация

В статье описывается разработанный для исследования робастных свойств систем автоматического управления с интервальными параметрами программный комплекс SLIS. Данный программный комплекс позволяет при различных типах неопределенности коэффициентов характеристического полинома системы определять границы областей локализации полюсов и нулей; строить многопараметрические интервальные корневые годографы; получать переходные процессы и импульсные характеристики интервальных систем в вершинах многогранника коэффициентов характеристического полинома. Программный комплекс SLIS имеет возможность проводить имитационное моделирование систем управления с интервальными параметрами в автоматическом или диалоговом режимах. Работа программного комплекса SLIS апробирована на примере имитационного моделирования канала управления движением обитаемого подводного аппарата вдоль его продольной оси.

Ключевые слова: имитационное моделирование, программный комплекс, интервальные системы управления

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке ГЗ «Наука», в рамках проекта FSWW-2020-0014.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Езангина Т. А., Гайворонский С. А. Программное обеспечение для моделирования сложных динамических систем управления с нестабильными параметрами // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18, № 3. С. 528-536. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202203.528-536>

© Езангина Т. А., Гайворонский С. А., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Software for Modeling Complex Dynamic Control Systems with Unstable Parameters

T. A. Ezangina*, S. A. Gayvoronskiy

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Address: 30 Lenina Ave., Tomsk 634050, Russian Federation

* eza-tanya@yandex.ru

Abstract

The article describes the SLIS software package developed to study the robust properties of automatic control systems with interval parameters. This software package allows at various types of uncertainty in the coefficients of the characteristic polynomial of the system to determine the boundaries of the regions of localization of poles and zeros; to build multi-parameter interval root locus; to obtain transient processes and impulse responses of interval systems at the vertices of the polyhedron of coefficients of the characteristic polynomial. The SLIS software package has the ability to simulate control systems with interval parameters in automatic or interactive modes. The operation of the SLIS software package was tested on the example of simulation modeling of the channel for controlling the movement of an uninhabited underwater vehicle along its longitudinal axis.

Keywords: simulation modeling, software package, interval control systems

Funding: The study is funded by the Science State Program as part of the project No. FSWW-2020-0014.

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Ezangina T.A., Gayvoronskiy S.A. Software for Modeling Complex Dynamic Control Systems with Unstable Parameters. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022;18(3):528-536. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202203.528-536>



Введение

При моделировании сложных динамических систем управления с нестабильными параметрами желательно использовать современную вычислительную технику и программные продукты. На их основе создаются вычислительные среды, позволяющие описывать исследуемые интервальные системы управления (ИСУ), автоматически переводить это описание на язык компьютера, проводить необходимые исследования. Примером такой среды является пакет MATLAB¹ [1-5]. Следует отметить, что с расширением функциональных возможностей пакета появились программные модули² [6-10], которые позволяют исследовать ИСУ с интервальной неопределенностью коэффициентов интервального характеристического полинома (ИХП). Однако, в этих модулях отсутствует возможность имитационного моделирования при более реальных типах неопределенности коэффициентов ИХП. Поэтому для имитационного моделирования с различными типами неопределенности коэффициентов ИХП представляет интерес разработка программного комплекса, способного решать поставленные выше задачи.

Заметим, что каждый язык программирования имеет и преимущества, и недостатки. Критерии оценки могут быть как объективные (простота, гибкость, надежность), так и субъективные, если особые требования предъявляет, например, заказчик программного продукта³ [11]. С учетом этого в качестве основного языка программирования был выбран язык C++, а в качестве графического и вычислительного инструмента – язык программирования MATLAB.

Методы, используемые в программном модуле имитационного моделирования

В программном модуле вычислительные процедуры проводятся на основе следующих методов. Для построения области локализации полюсов и нулей интервальной СУ на первом этапе вычисляется количество итераций цикла для нулей и полюсов СУ. Для этого определяются длины интервальных коэффициентов полиномов числителя и знаменателя замкнутой передаточной функции (ПФ) СУ или ее интервального параметра, которые делятся на оптимальное число разбиений. Далее, с помощью встроенной математической функции roots() итерационно вычисляются нули и полюсы СУ и они отображаются на корневую плоскость, используя plot() встроенные графические возможности программной среды MATLAB.

Построение многопараметрического интервального корнево-

го годографа для полюсов СУ проводится аналогично процедуре построения областей локализации полюсов и нулей интервальной СУ.

При построении переходных процессов интервальной СУ используется встроенная в MATLAB функция step(). Далее полученные зависимости преобразуем в графический вид, используя встроенную функцию plot(). При этом количество итераций, необходимых для построения переходных процессов интервальной СУ, определяется так же, как в процедуре построения областей локализации полюсов и нулей СУ.

Построение импульсных характеристик интервальной СУ проводится в цикле на основе использования построенных в MATLAB функций impulse() и plot(). Количество итераций, необходимых для построения импульсных характеристик, определяется так же, как в процедуре построения областей локализации полюсов и нулей СУ.

Для нахождения вершины многогранника, определяющей наихудший режим работы СУ, используются методики и программные модули анализа показателей качества интервальной системы с различными типами неопределенностью ИХП⁴ [12-16].

Функции программного модуля имитационного моделирования

В данном программном модуле при различных типах неопределенности коэффициентов ИХП реализуются следующие функции:

- 1) Функция IBuild() для построения области локализации полюсов и нулей СУ с интервальным типом неопределенности (ИТН) коэффициентов ИХП.
- 2) Функция ABuild() для построения области локализации полюсов и нулей СУ с аффинным типом неопределенности (АТН) коэффициентов ИХП.
- 3) Функция PBuild() для построения области локализации полюсов и нулей СУ с полилинейным типом неопределенности коэффициентов ИХП.
- 4) Функция PIBuild() для построения области локализации полюсов и нулей СУ с полиномиальным типом неопределенности коэффициентов ИХП.
- 5) Функция IBuildCP() для построения многопараметрического интервального корневого годографа интервальной СУ с ИТН коэффициентов ИХП.
- 6) Функция ABuildCP() для построения многопараметрического интервального корневого годографа с АТН коэффициентов ИХП.

¹ Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем: Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002. 448 с.; Кондрашов В. Е., Королев С. Б. MATLAB как система программирования научно-технических расчетов. М.: Мир: Ин-т стратег. стабильности Минатома РФ, 2002. 350 с.; Поршнев С. В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB: учеб. пособие. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2011. 736 с.; Черных И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / под ред. В. Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.

² Автоматизация функционального проектирования электромеханических систем и устройств преобразовательной техники: монография / Ю. А. Шурыгин, В. М. Дмитриев, А. Г. Гарганеев, Т. Н. Зайченко. Томск: ТГУ, 2000. 286 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25788358> (дата обращения: 27.06.2022); Кунцевич А. В., Кунцевич В. М. Инструментальная система "Robust stability" анализа робастной устойчивости динамических систем // Автоматика. 1990. № 6. С. 3-8; Солодкин Г. И. Пакет прикладных программ исследования и синтеза динамических систем с переменными параметрами на основе использования корневых методов. Минск: ОИПИ НАНБ, 2005. 186 с.; Колесов Ю., Сениченков Ю. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 224 с.

³ Бен-Ари М. Языки программирования. Практический сравнительный анализ. М.: Мир, 2000. 366 с.

⁴ Журавлев С. С. Краткий обзор методов и средств имитационного моделирования производственных систем // Проблемы информатики. 2009. № 3(4). С. 47-53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15523074> (дата обращения: 27.06.2022).



- 7) Функция PBuildCP () для построения многопараметрического интервального корневого годографа с полилинейным типом неопределенности коэффициентов ИХП.
- 8) Функция PlBuildCP () для построения многопараметрического интервального корневого годографа с полиномиальным типом неопределенности коэффициентов ИХП.
- 9) Функция Istep () для построения переходных характеристик СУ с ИТН коэффициентов ИХП.
- 10) Функция Astep () для построения переходных характеристик СУ с АТН коэффициентов ИХП.
- 11) Функция Pstep () для построения переходных характеристик СУ с полилинейным типом неопределенности коэффициентов ИХП.
- 12) Функция Plstep () для построения переходных характеристик СУ с полиномиальным типом неопределенности коэффициентов ИХП.
- 13) Функция Iimpulse () для построения импульсных характеристик СУ с ИТН коэффициентов ИХП.
- 14) Функция Aimpulse () для построения импульсных характеристик СУ с АТН коэффициентов ИХП.
- 15) Функция Pimpulse () для построения импульсных характеристик СУ с полилинейным типом неопределенности коэффициентов ИХП.

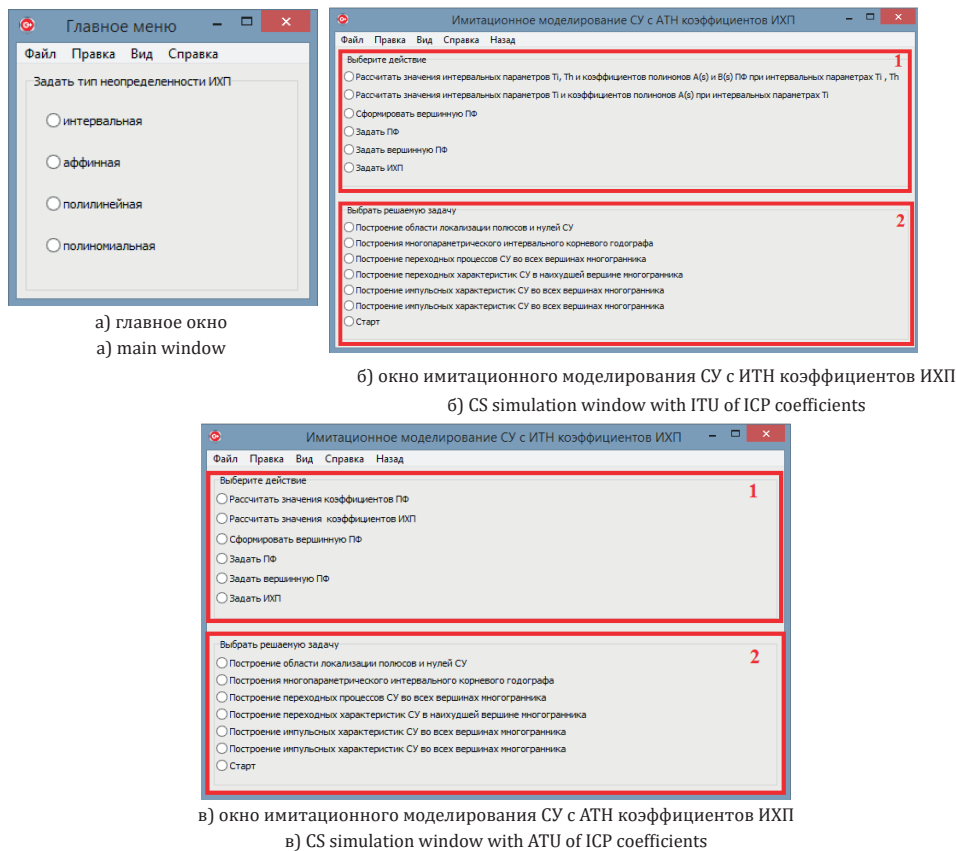
16) Функция Plimpulse () для построения импульсных характеристик СУ с полиномиальным типом неопределенности коэффициентов ИХП.

Принцип работы программного модуля имитационного моделирования

Программный модуль SLIS работает под управлением операционной системы Microsoft Windows. С его помощью можно проводить имитационное моделирование интервальной СУ в автоматическом или диалоговом режиме.

Для начала работы в программном модуле SLIS необходимо запустить файл SLIS.exe, после чего откроется главное окно программного модуля SLIS (рисунок 1а), где необходимо выбрать тип неопределенности коэффициентов ИХП.

После этого откроется окно имитационного моделирования (рисунок 1б или 1в). В поле 1 (рисунок 1б) необходимо выбрать действия для задания информации о СУ с ИТН коэффициентов ИХП, или же в соответствующем поле (рисунок 1в) задать исходную информацию о СУ с АТН коэффициентов ИХП. Далее в поле 2 (рисунок 1б или 1в) выбрать необходимую для решения задачу.



Р и с. 1. Окна программного модуля SLIS

На рисунке 16 обозначены: 1 – поле для задания информации о СУ с ИТН коэффициентов ИХП

F i g. 1. Windows of the SLIS software module

Figure 16 shows: 1 - Field for specifying information about SU with ITN of ICP coefficients (СУ – Control System; ИТН – ITU - interval type of uncertainty; ИХП – ICP - interval characteristic polynomial; АТН - ATU - affine type of uncertainty)



При выборе в поле 1 расчета значений коэффициентов ПФ замкнутой СУ вида:

$$W_{ov}(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{\sum_{h=0}^c [b_h] s^h}{\sum_{q=0}^w [a_q] s^q} \quad (1)$$

откроется окно, где пользователь может получить значения коэффициентов ПФ (1) по известным выражениям и значениям физических параметров. Расчет значений коэффициентов ИХП проводится так же, как и расчет значений коэффициентов ПФ СУ.

При задании вершинной ПФ предлагается ввести передаточную функцию вида:

$$W_{ov}(s) = \frac{B(s)^{V_g}}{A(s)^{V_g}} = \frac{\sum_{h=0}^c b_h^{V_g} s^h}{\sum_{q=0}^w a_q^{V_g} s^q} \quad (2)$$

где V - вершина многогранника интервальных коэффициентов ИХП,

g - номер вершины.

Задание ПФ СУ или ИХП с интервальной неопределенностью коэффициентов предусматривает ввод соответственно известной ПФ (1).

2- Поле выбора решаемой задачи.

На рисунке 1в обозначены:

1 - поле задания исходной информации о СУ с АТН коэффициентов ИХП. При выборе расчета значений коэффициентов ПФ замкнутой СУ вида:

$$W_{ov}(s) = \frac{B(s, [\bar{T}])}{A(s, [\bar{T}])} = \frac{\sum_{h=1}^c [T_h] B_h(s) + B_0}{\sum_{j=1}^w [T_j] A_j(s) + A_0(s)} \quad (3)$$

откроется окно, где пользователь сможет получить значения интервальных параметров $[T_h]$ и $[T_j]$, а также коэффициентов полиномов $B(s)$ и $A(s)$ ПФ (3) по известным выражениям и значениям физических параметров. Расчет значений коэффициентов ИХП проводится так же, как и расчет значений коэффициентов ПФ СУ.

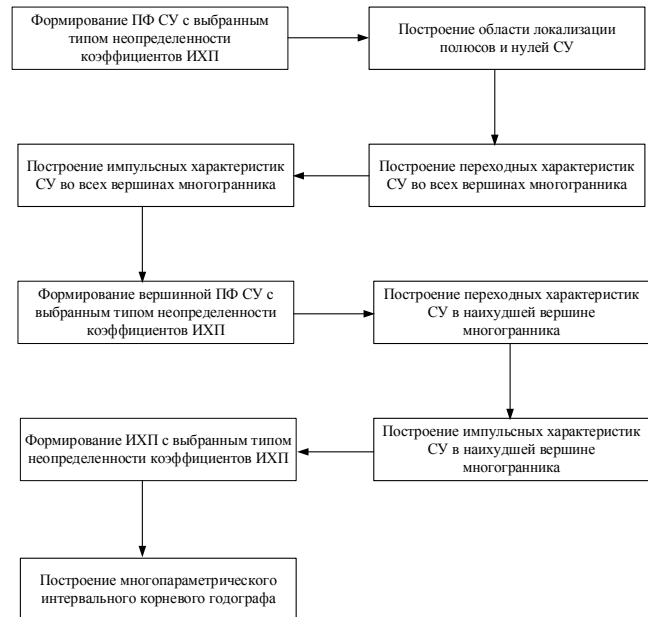
При задании вершинной ПФ предлагается ввести передаточную функцию вида:

$$W_{ov}(s) = \frac{B(s, [\bar{T}])^{V_g}}{A(s, [\bar{T}])^{V_g}} = \frac{\sum_{h=1}^c [T_h]^{V_g} B_h(s) + B_0}{\sum_{j=1}^w [T_j]^{V_g} A_j(s) + A_0(s)} \quad (4)$$

При задании ПФ СУ или ИХП необходимо задать соответственно передаточную функцию вида (3).

2 - Поле, аналогичное полю на рисунке 1б.

Если в поле 2 (рисунок 1б или 1в) выбрать опцию «Старт», то запускается автоматический режим выполнения операций в порядке, показанном на рисунке 2.



Р и с. 2. Порядок выполнений операций

Fig. 2. The order of operations

Окна имитационного моделирования СУ с полилинейным и полиномиальным типом неопределенности коэффициентов ИХП имеют такую же структуру, как и у окна имитационного моделирования СУ с аффинным типом неопределенности коэффициентов ИХП (рисунок 1в).

Пример применения модуля имитационного моделирования. Для применения программного модуля SLIS рассмотрим канал управления движением необитаемого подводного аппарата (НПА) вдоль его продольной оси. Модель такой системы включает в себя модель процесса движения НПА вдоль его продольной оси с учетом вязкости жидкости; модель части движительно-рулевого комплекса НПА, осуществляющей исследуемый тип движения, а также модель части навигационной системы, измеряющей регулируемую координату НПА. Рассмотрим моделирование перечисленных частей исследуемой системы [17-25].

При моделировании процесса движения НПА вдоль его продольной оси будем считать, что движение осуществляется только в указанной степени свободы. Уравнение такого движения имеет следующий вид [13]:

$$(m + \lambda_x) \cdot \frac{dv_x}{dt} = T_x - 0.5 \cdot c_x \cdot \rho \cdot V^{2/3} \cdot v_x^2, \quad (5)$$

где m - масса НПА, λ_x - присоединенная масса воды, v_x - скорость движения НПА вдоль его продольной оси, T_x - упор движителей НПА, c_x - гидродинамический коэффициент силы лобового сопротивления, ρ - плотность воды, V - водоизмещение НПА.



Пусть параметры λ_x и c_x будут интервальными. Тогда передаточная функция, связывающая упор маршевых движителей и скорость движения НПА, будет иметь вид:

$$W_{v,T}(s) = \frac{1}{(m + [\lambda_x]) \cdot s + 0.5 \cdot [c_x] \cdot k \cdot \rho \cdot V^{2/3}} \quad (6)$$

где k – коэффициент интервальной секторной линеаризации. Моделировать движитель НПА предлагается с помощью аperiодического звена первого порядка:

$$W_{\Delta}(s) = \frac{K_T}{T_T \cdot s + 1} \quad (7)$$

где K_T – передаточный коэффициент движителя;
 T_T – постоянная времени движителя.

Пусть при этом датчик в системе управления имеет единичный коэффициент передачи, а регулятор реализует ПИ-закон регулирования

$$W_{рег}(s) = \frac{K_p s + K_I}{s}$$

В результате получаем передаточную функцию вида:

$$W(s) = \frac{b_0 + b_1 \cdot s}{[a_4] \cdot s^4 + [a_3] \cdot s^3 + [a_2] \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \quad (8)$$

где $[a_4] = 2T_T(m + [\lambda_x])$;

$[a_3] = 2(m + [\lambda_x]) + [c_x]T_TV^{2/3}\rho k$;

$[a_2] = [c_x]V^{2/3}\rho k$;

$a_1 = 4K_p K_T$;

$a_0 = 4K_I K_T$;

$b_1 = 4K_p K_T$;

$b_0 = 4K_p K_T$.

Следовательно, ИХП системы управления НПА имеет вид:

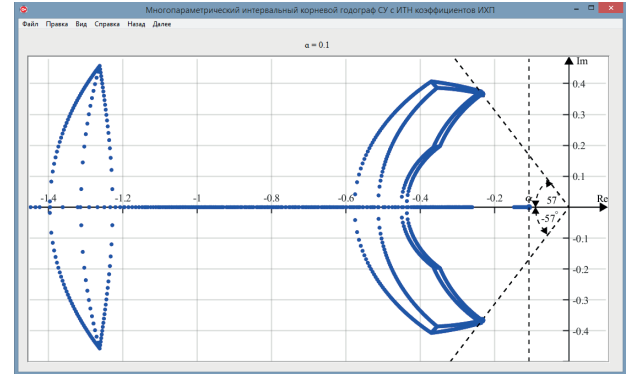
$$D(s) = d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0 \quad (9)$$

где $[d_4] = [a_4]$; $[d_3] = [a_3]$; $[d_2] = [a_2]$; $d_1 = a_1$; $d_0 = a_0$.

Пусть параметры НПА и системы управления имеют следующие значения: $T_T=1c$; $m=20$ кг; $V=0.02$ м³; $\rho=1000$ кг/м³; $k=2$; $K_T=2.5$; $c_x=[3; 4]$ и $\lambda_x=[50; 70]$ кг.

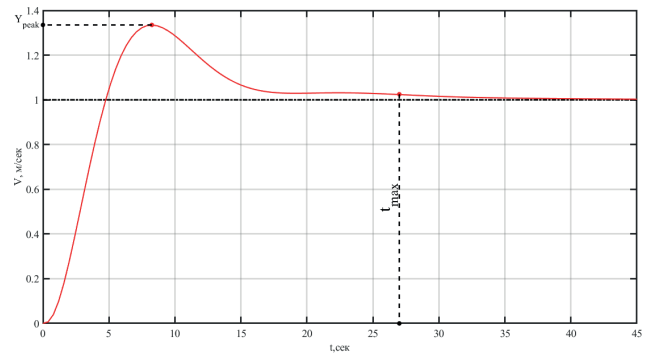
Требуется построить многопараметрический интервальный корневой годограф интервальной СУ и переходные характеристики СУ в вершине многогранника, определяющей наихудший режим работы системы.

На рисунках 3 и 4 приведены результаты применения программного модуля SLIS для решения поставленной задачи.



Р и с. 3. Многопараметрический интервальный корневой годограф интервальной СУ

Fig. 3. Multi-parameter interval root hodograph of interval CS



Р и с. 4. Переходная характеристика СУ в вершине многогранника, определяющей наихудший режим работы системы

Fig. 4. The transient response of the control system at the vertex of the polyhedron, which determines the worst operating mode of the system

Заключение

В работе описан программный комплекс SLIS, позволяющий для систем управления с интервальными параметрами проводить анализ их робастных свойств на основе построения областей локализации полюсов и нулей системы, а также ее многопараметрического интервального корневой годографа; исследовать указанные системы во временной области на основе построения переходных процессов и импульсных характеристик. Программный комплекс SLIS позволяет проводить имитационное моделирование интервальных систем как в автоматическом режиме, так и в диалоговом. Работа программного комплекса SLIS апробирована на примере имитационного моделирования управления движением подводного аппарата.



Список использованных источников

- [1] Grigut E., Kiriyakov I., Senichenkov Yu. Designing application-dependent tools for modeling and simulation on basis of universal modeling environment // Proceedings of the 3rd International Conference on Applications in Information Technology (ICAIT'2018). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018. P. 17-22. doi: <https://doi.org/10.1145/3274856.3274861>
- [2] Шорников Ю. В., Сениченков Ю. Б., Рыжов В. А. Сравнительный обзор сред компьютерного моделирования в рамках проекта InMotion // Университетский научный журнал. 2017. № 30. С. 58-65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35105050> (дата обращения: 27.06.2022).
- [3] Isakov A. A., Kolesov Yu. B., Senichenkov Yu. B. A new tool for visual modeling – Rand Model Designer 7 // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, issue 1. P. 661-662. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.102>
- [4] Бурак Т. И., Лукашевич М. М. Методика и программное средство анализа сложных динамических систем // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2016. № 6. С. 569-572. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30080368> (дата обращения: 27.06.2022).
- [5] Бурак Т. И., Кернога А. Л. Компьютерное моделирование динамических систем // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. 2014. Т. 2. С. 196-201. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23693623> (дата обращения: 27.06.2022).
- [6] Программный комплекс для исследования динамики и проектирования технических систем / О. С. Козлов, Д. Е. Кондаков, Л. М. Скворцов [и др.] // Информационные технологии. 2005. № 9. С. 20-25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20468025> (дата обращения: 27.06.2022).
- [7] Tsavnin A., Efimov S., Zamyatin S. Overshoot Elimination for Control Systems with Parametric Uncertainty via a PID Controller // Symmetry. 2020. Vol. 12, no. 7. Article number: 1092. P. 1-14. doi: <https://doi.org/10.3390/sym12071092>
- [8] Прокопьев А. П., Иванчура В. И., Емельянов Р. Т. Синтез ПИД-регулятора для объектов второго порядка с учетом расположения полюсов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2016. Т. 9, № 1. С. 50-60. doi: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-1-50-60>
- [9] Суходоев М. С., Гайворонский С. А., Замятин С. В. Анализ и синтез робастных систем автоматического управления в среде MATLAB // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 5. С. 61-66. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11170119> (дата обращения: 27.06.2022).
- [10] Метод синтеза регулятора робастного по перерегулированию для АСУ ТП с параметрической неопределенностью / А. В. Цавнин, А. Ю. Зарницын, С. В. Ефимов [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 4. С. 3-11. doi: <https://doi.org/10.25791/asu.4.2021.1270>
- [11] Determination of Vertices and Edges in a Parametric Polytope to Analyze Root Indices of Robust Control Quality / S. Gayvoronskiy [и др.] // International Journal of Automation and Computing. 2019. Vol. 16, issue 6. P. 828-837. doi: <https://doi.org/10.1007/s11633-019-1182-y>
- [12] Гайворонский, С. А. Вершинный анализ корневых показателей качества интервальной системы / С. А. Гайворонский // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 7. С. 6-9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9459044> (дата обращения: 27.06.2022).
- [13] Gayvoronskiy S. A., Khozhaev I. V., Ezangina T. A. Motion Control System for a Remotely Operated Vehicle with Interval Parameters // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2017. Vol. 6, no. 5. P. 378-384. doi: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.6.5.378-384>
- [14] Цавнин А. В., Ефимов С. В., Замятин С. В. Корневой подход к синтезу параметров ПИД-регулятора, гарантирующий отсутствие перерегулирования в переходной характеристике системы управления // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2019. Т. 22, № 2. С. 77-83. doi: <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2019-22-2-77-82>
- [15] Вадутов О. С. Синтез ПИД-регулятора в системах с запаздыванием методом условной оптимизации с ограничениями на размещение полюсов // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325, № 5. С. 16-22. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22860550> (дата обращения: 27.06.2022).
- [16] Смирнов Н. И., Шаровин И. М. О выборе критерия оптимальности в численных методах расчета САУ // Промышленные АСУ и контроллеры. 2009. № 5. С. 16-21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12364788> (дата обращения: 27.06.2022).
- [17] Лубенцова Е. В., Пиотровский Д. Л., Лубенцов В. Ф. Робастная нечеткая система автоматического управления с переменной структурой // Фундаментальные исследования. 2017. № 3. С. 53-59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29007770> (дата обращения: 27.06.2022).
- [18] Keel L. H., Bhattacharyya S. P. Robustness and fragility of high order controllers: A tutorial // Proceedings of IEEE Conference on Control Applications. Buenos Aires, Argentina : IEEE Computer Society, 2016. P. 191-202. doi: <https://doi.org/10.1109/CSA.2016.7587837>
- [19] Bhattacharyya S. P. Robust control under parametric uncertainty: An overview and recent results // Annual Reviews in Control. 2017. Vol. 44. P. 45-77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.05.001>
- [20] On robustly stabilizing PID controllers for systems with a certain class of multilinear parameter dependency / D. Mihalescu-Stoica [и др.] // Proceedings of the 26th Mediterranean Conference on Control and Automation. Zadar, Croatia : IEEE Computer Society, 2018. P. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/MED.2018.8442811>



- [21] Khalil A., Wang J. H., Mohamed O. Robust stabilization of load frequency control system under networked environment // International Journal of Automation and Computing. 2017. Vol. 14, issue 1. P. 93-105. doi: <https://doi.org/10.1007/s11633-016-1041-z>
- [22] Jiang Y., Dai J. Y. An adaptive regulation problem and its application // International Journal of Automation and Computing. 2017. Vol. 14, issue 2. P. 221-228. doi: <https://doi.org/10.1007/s11633-015-0900-3>
- [23] Nguyen N. H., Nguyen P. D. Overshoot and settling time assignment with PID for first-order and second-order systems // IET Control Theory & Applications. 2018. Vol. 12, issue 17. P. 2407-2416. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2018.5076>
- [24] Zhang X. Q., Li X. Y., Zhao J. Stability analysis and anti-windup design of switched systems with actuator saturation // International Journal of Automation and Computing. 2017. Vol. 14, issue 5. P. 615-625. doi: <https://doi.org/10.1007/s11633-015-0920-z>
- [25] Da Silva F. D. C., De Oliveira J. B., De Araujo A. D. Robust interval adaptive pole-placement controller based on variable structure systems theory // Proceedings of the 25th International Conference on Systems Engineering, Las Vegas, USA : IEEE Computer Society, 2017. P. 45-54. doi: <https://doi.org/10.1109/IC-SEng.2017.73>

Поступила 27.06.2022; одобрена после рецензирования 25.08.2022; принята к публикации 10.09.2022.

Об авторах:

Езангина Татьяна Александровна, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, д. 30), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4948-5972>, eza-tanya@yandex.ru

Гайворонский Сергей Анатольевич, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, д. 30), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7156-2807>, saga@tpu.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Grigut E., Kiriyakov I., Senichenkov Yu. Designing application-dependent tools for modeling and simulation on basis of universal modeling environment. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Applications in Information Technology (ICAIT'2018). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2018. p. 17-22. doi: <https://doi.org/10.1145/3274856.3274861>
- [2] Shornikov Yu.V., Senichenkov Yu.B., Ryzhov V.A. Comparative Analysis of Computer Modeling and Simulation Environments under the InMotion Project. *Humanities and Science University Journal*. 2017;(30):58-65. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35105050> (accessed 27.06.2022).
- [3] Isakov A.A., Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. A new tool for visual modeling – Rand Model Designer 7. *IFAC-PapersOnLine*. 2015;48(1):661-662. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.102>
- [4] Burak T.I., Lukashevich M.M. Methodology and software for semantic analysis of complex dynamical systems. In: International scientific and technical conference proceedings “Open Semantic Technologies for Intelligent Systems” (OSTIS). 2016;(6):569-572. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30080368> (accessed 27.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [5] Burak T.I., Kernoga A.L. Computer modeling of dynamic systems. In: Proceedings of the International Conference on Innovative technologies: theory, tools, practice. Vol. 2. Perm: PNRPU; 2014. p. 196-201. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23693623> (accessed 27.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [6] Kozlov O.S., Kondakov D.E., Skvortsov L.M., Timofeev K.A., Hodakovskii V.V. Software for Research Dynamics and Design of Technical Systems. *Information Technologies*. 2005;(9):20-25. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20468025> (accessed 27.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [7] Tsavnin A., Efimov S., Zamyatin S. Overshoot Elimination for Control Systems with Parametric Uncertainty via a PID Controller. *Symmetry*. 2020;12(7):1092. doi: <https://doi.org/10.3390/sym12071092>
- [8] Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Emelyanov R.T. Synthesis PID controller for objects second order with regard to the location poles. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2016;9(1):50-60. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-1-50-60>
- [9] Sukhodoev M.S., Gayvoronskiy S.A., Zamyatin S.V. Analysis and synthesis of automatic control robust systems in the MATLAB environment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2008;312(5):61-66. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11170119> (accessed 27.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [10] Tsavnin A.V., Zarnitsyn A.Yu., Efimov S.V., Podkovyrov I.A., Zamyatin S.V. Design approach for robust non-overshooting controller for ACS with parametric uncertainty. *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2021;(4):3-11. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25791/asu.4.2021.1270>



- [11] Gayvoronskiy S., Ezangina T., Khozhaev I., Kazmin V. Determination of Vertices and Edges in a Parametric Polytope to Analyze Root Indices of Robust Control Quality. *International Journal of Automation and Computing*. 2019;16(6):828-837. doi: <https://doi.org/10.1007/s11633-019-1182-y>
- [12] Gayvoronskiy S.A. Vertex analysis of root quality indexes of the system with interval parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2006;309(7):6-9. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9459044> (accessed 27.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [13] Gayvoronskiy S.A., Khozhaev I.V., Ezangina T.A. Motion Control System for a Remotely Operated Vehicle with Interval Parameters. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2017;6(5):378-384. doi: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.6.5.378-384>
- [14] Tsavnin A.V., Efimov S.V., Zamyatin S.V. PID-controller tuning approach guaranteeing non-overshooting step response. *Proceedings of TUSUR University*. 2019;22(2):77-83. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2019-22-2-77-82>
- [15] Vadutov O.S. Design of PID controller for delayed systems using optimization technique under pole assignment constraints. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2014;325(5):16-22. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22860550> (accessed 27.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [16] Smirnov N.I., Sharovin I.M. On optimality criterion selection in numerical computation of Automated Control Systems. *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2009;(5):16-21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12364788> (accessed 27.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [17] Lubentsova E.V., Piotrovskiy D.L., Lubentsov V.F. Robust fuzzy automatic control system with variable structure. *Fundamental research*. 2017;(3):53-59. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29007770> (accessed 27.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [18] Keel L.H., Bhattacharyya S.P. Robustness and fragility of high order controllers: A tutorial. In: Proceedings of IEEE Conference on Control Applications. Buenos Aires, Argentina: IEEE Computer Society; 2016. p. 191-202. doi: <https://doi.org/10.1109/CCA.2016.7587837>
- [19] Bhattacharyya S.P. Robust control under parametric uncertainty: An overview and recent results. *Annual Reviews in Control*. 2017;44:45-77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.05.001>
- [20] Mihailescu-Stoica D., Schrodell F., Vobetawinkel R., Adamy J. On robustly stabilizing PID controllers for systems with a certain class of multilinear parameter dependency. In: Proceedings of the 26th Mediterranean Conference on Control and Automation. Zadar, Croatia: IEEE Computer Society; 2018. p. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/MED.2018.8442811>
- [21] Khalil A., Wang J.H., Mohamed O. Robust stabilization of load frequency control system under networked environment. *International Journal of Automation and Computing*. 2017;14(1):93-105. doi: <https://doi.org/10.1007/s11633-016-1041-z>
- [22] Jiang Y., Dai J.Y. An adaptive regulation problem and its application. *International Journal of Automation and Computing*. 2017;14(2):221-228. doi: <https://doi.org/10.1007/s11633-015-0900-3>
- [23] Nguyen N.H., Nguyen P.D. Overshoot and settling time assignment with PID for first-order and second-order systems. *IET Control Theory & Applications*. 2018;12(17):2407-2416. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2018.5076>
- [24] Zhang X.Q., Li X.Y., Zhao J. Stability analysis and anti-windup design of switched systems with actuator saturation. *International Journal of Automation and Computing*. 2017;14(5):615-625. doi: <https://doi.org/10.1007/s11633-015-0920-z>
- [25] Da Silva F.D.C., De Oliveira J.B., De Araujo A.D. Robust interval adaptive pole-placement controller based on variable structure systems theory. In: Proceedings of the 25th International Conference on Systems Engineering. Las Vegas, USA: IEEE Computer Society; 2017. p. 45-54. doi: <https://doi.org/10.1109/ICSEng.2017.73>

Submitted 27.06.2022; approved after reviewing 25.08.2022; accepted for publication 10.09.2022.

About the authors:

Tatiana A. Ezangina, Associate Professor of the Division for Information Technology, School of Computer Science and Robotics, National Research Tomsk Polytechnic University (30 Lenina Ave., Tomsk 634050, Russian Federation), Cand.Sci. (Eng.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4948-5972>, eza-tanya@yandex.ru

Sergey A. Gayvoronskiy, Associate Professor of the Division for Information Technology, School of Computer Science and Robotics, National Research Tomsk Polytechnic University (30 Lenina Ave., Tomsk 634050, Russian Federation), Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7156-2807>, saga@tpu.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

