

Программное обеспечение для исследования робастных свойств и синтеза регуляторов систем автоматического управления с интервальными 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 разработан программный комплекс RASLIS, в основу которого положены полученные авторами алгоритмы робастного анализа и синтеза интервальных систем управления с аффинной неопределенностью коэффициентов характеристического полинома. Программный комплекс RASLIS позволяет формировать на основе многогранника коэффициентов полинома граничный вершинно-реберный маршрут и в результате его отображения на корневую плоскость определять корневые показатели робастного качества системы. Он также позволяет проводить параметрический синтез линейных робастных регуляторов на основе критерия максимальной степени робастной устойчивости. Программный комплекс RASLIS имеет возможность анализировать и синтезировать указанные системы в автоматическом или диалоговом режимах. Работа программного комплекса RASLIS апробирована на примере анализа корневых показателей робастного качества и синтеза робастного регулятора системы управления движительно-рулевым комплексом подводного аппарата.

Ключевые слова: исследования робастных свойств, синтез регуляторов, 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 исследования робастных свойств и синтеза регуляторов систем автоматического управления с интервальными параметрами // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18, № 4. С. 734-743. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202204.734-743>

© 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 Studying Robust Properties and Synthesis of Regulators of Automatic Control Systems with Interval 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

In the article, the RASLIS software package is developed, which is based on the algorithms of robust analysis and synthesis of interval control systems obtained by the authors with affine uncertainty of the coefficients of the characteristic polynomial. The RASLIS software package allows you to form a boundary vertex-edge route based on the polyhedron of polynomial coefficients and, as a result of its mapping to the root plane, determine the root indicators of the robust quality of the system. It also allows parametric synthesis of linear robust controllers based on the criterion of the maximum degree of robust stability. The RASLIS software package has the ability to analyze and synthesize these systems in automatic or interactive modes. The work of the RASLIS software package was tested on the example of the analysis of the root indicators of robust quality and the synthesis of a robust controller of the control system of the propulsion and steering complex of the underwater vehicle.

Keywords: research of robust properties, synthesis of controllers, 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 Studying Robust Properties and Synthesis of Regulators of Automatic Control Systems with Interval Parameters. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022;18(4):734-743. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202204.734-743>



Введение

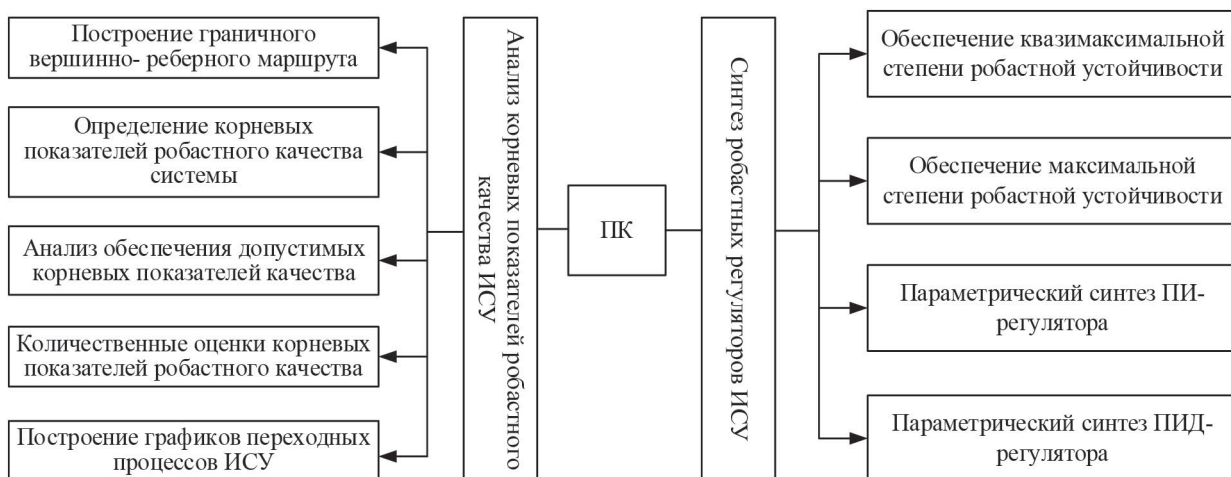
При исследовании сложных динамических систем управления с нестабильными параметрами желательно использовать современную вычислительную технику и программные продукты. На их основе создаются вычислительные среды, позволяющие описывать исследуемые интервальные системы управления (ИСУ), автоматически переводить это описание на язык компьютера, проводить необходимые вычисления. Примером такой среды является пакет MATLAB¹. Следует отметить, что с расширением функциональных возможностей пакета появились программные модули² [1-9], которые позволяют исследовать ИСУ с интервальной неопределенностью коэффициентов интервального характеристического полинома (ИХП). Однако, в этих модулях отсутствует возможность анализа показателей качества ИСУ и синтеза их регуляторов с учетом более реальной аффинной неопределенности коэффициентов ИХП, в выражения которых входят физические интервальные параметры ИСУ. Поэтому для анализа и синтеза ИСУ с аффинной

неопределенностью коэффициентов ИХП представляет интерес разработка программного комплекса, способного решать поставленные выше задачи [10].

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. С учетом этого в качестве основного языка программирования был выбран язык C++, а в качестве графического и вычислительного инструмента – язык программирования MATLAB.

Архитектура программного комплекса

Для реализации на ПЭВМ полученных в работах [11, 12] методик разработан программный комплекс Robust Analysis and Syntheses of the Liner Interval Systems (RASLIS). Структура программного комплекса RASLIS приведена на рисунке 1.



Р и с. 1. Структура программного комплекса RASLIS

F i g. 1. Structure of the RASLIS software package

Программный комплекс включает два основных модуля:

- модуль анализа корневых показателей робастного качества ИСУ;
- модуль синтеза робастных регуляторов ИСУ.

Модуль анализа позволяет выполнять следующие функции:

- формировать граничный вершинно-реберный маршрут [11] и на его основе определять прямые корневые показатели качества ИСУ;

- определять прямые корневые показатели качества ИСУ [11].

Модуль синтеза позволяет:

- проводить параметрический синтез робастных регуляторов при аффинной неопределенности коэффициентов ИХП на основе критерия максимальной степени робастной устойчивости [12].

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: 21.07.2022); 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.

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



Разработка модуля анализа линейных ИСУ с аффинным типом неопределённости коэффициентов ИХП

2.1. Методы, используемые в программном модуле

В модуле анализа корневых показателей робастного качества вычислительные процедуры проводятся на основе следующих методов. Для получения ИХП вида:

$$D(s) = \sum_{i=1}^m [T_i] A_i(s) + B(s) \quad (1)$$

где $[T_i] = [\underline{T}_i; \overline{T}_i]$, могут использоваться правила интервальной арифметики [13]. С помощью комбинаторного анализа⁴ создается массив из всех возможных комбинаций T_i , $T_i \in [\underline{T}_i, \overline{T}_i]$, которые соответствуют вершинам многогранника интервальных параметров. Для нахождения прямого граничного реберного маршрута с помощью выражений [11]:

$$\Theta_i^q = 180^\circ + \sum_{ze=1}^{vz} \Theta_{ze} \quad (2)$$

где Θ_{ze} – углы, определяемые векторами, выходящими из T_i^q соответственно к ze -ому нулю функции $W_i^q(\Delta T_i, s) = \frac{\Delta T_i A_i(s)}{D^q(s)}$, $D^q(s) = \sum_{i=1}^m T_i^q \cdot A_i(s) + B(s)$ – вер-

шинный характеристический полином;

$$\Theta_i^q = \sum_{ze=1}^{vz} \Theta_{ze} \quad (3)$$

полученных из основного фазового соотношения метода корневого годографа, вычисляются углы выхода Θ_i^q и проверяется выполнение условия граничности корневого узла [11]: $|\Theta_m^{Vq} - \Theta_1^{Vq}| < 180^\circ$. (4)

Если вершина оказывается граничной, то с помощью сортировки массива Θ_i^q функцией *sort()* из библиотеки *algorithm*⁵ определяется последовательность Θ_i^q и формируется соответствующий ей прямой реберный маршрут. Для анализа возможности пересечения реберных ветвей на граничном маршруте формируются массивы $A_i(s)$ по количеству переменных T_i . Для выбранной вершины, используя алгебру комплексных чисел⁶, ИХП разделяется на вещественную и мнимую части и далее проверяется выполнение условий [11]:

$$\begin{aligned} &(a_{1i} a_{2j} - a_{2i} a_{1j})(a_{0i} a_{1j} - a_{1i} a_{0j}) \geq (a_{0i} a_{2j} - a_{2i} a_{0j})^2; \\ &a_{1i} a_{2j} - a_{2i} a_{1j} \leq 0; \quad 4(a_{0i} a_{1j} - a_{1i} a_{0j})(a_{1i} a_{2j} - a_{2i} a_{1j}) \geq 0. \\ &a_{1i} a_{2j} (a_{0i} a_{1j} - a_{1i} a_{0j}) \geq (a_{0i} a_{2j})^2; \\ &4a_{1i} a_{2j} (a_{0i} a_{1j} - a_{1i} a_{0j}) \geq 0. \\ &a_{2i} a_{1j} (a_{1i} a_{0j} - a_{0i} a_{1j}) \geq (a_{2i} a_{0j})^2; \\ &4a_{2i} a_{1j} (a_{1i} a_{0j} - a_{0i} a_{1j}) \geq 0. \end{aligned}$$

или на основе метода Гаусса⁷ решается система уравнений [12]:

$$\begin{cases} \operatorname{Re} A_i(\alpha, \beta) \operatorname{Im} A_j(\alpha, \beta) - \operatorname{Re} A_j(\alpha, \beta) \operatorname{Im} A_i(\alpha, \beta) = 0; \\ \operatorname{Re} A_i(\alpha, \beta) \operatorname{Im} \left[\sum_k T_k^q A_k(\alpha, \beta) + B(\alpha, \beta) \right] - \operatorname{Im} A_i(\alpha, \beta) \operatorname{Re} \left[\sum_k T_k^q A_k(\alpha, \beta) + B(\alpha, \beta) \right] = 0. \end{cases}$$

С помощью дифференциального исчисления⁸ и алгебры комплексных чисел⁹ на основе [11]:

$$\frac{\partial \arg((\overline{T}_i - \underline{T}_i) A_i(j\beta))}{\partial \beta} \leq \left| \frac{\sin(2 \arg((\overline{T}_i - \underline{T}_i) A_i(j\beta)))}{2\beta} \right|$$

проводится анализ типа реберных ветвей. Добавление и удаление ребер в маршруте производится с помощью метода поиска в глубину¹⁰. Для отображения на корневую плоскость полученного граничного вершинно-реберного маршрута используются встроенные графические (*plot()*) и математические (*roots()*) возможности программной среды MATLAB¹¹.

2.2. Функции и алгоритмы модуля

Функции *ConstructionDT(double *D, int summ)* по правилам интервальной арифметики формируют ИХП соответственно вида (5.1).

Функция *ConstructionT(double *Tmt, int mc1)* создает массив минимальных и максимальных параметров *Tmt[mc]*, где *mc = m min + m max* – количество интервальных параметров.

Функция *ConstructionRT(double *RTmt, int mc1)* создает массив ребер *RTmt[mc1]*, где ребра определяются как возрастающими, так и убывающими интервальными параметрами (*mc1 = m1 min + m1 max* – количество ребер).

Функция *ConstructionV(double *V, int q1)* возвращает массив из всех возможных комбинаций интервальных параметров, которые соответствуют вершинам многогранника интервальных

⁴ Черных И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / под ред. В. Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.; Белашов В. Ю., Чернова Н. М. Эффективные алгоритмы и программы вычислительной математики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1997. 160 с.

⁵ Черных И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / под ред. В. Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.

⁶ Окулов С. М. Программирование в алгоритмах. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2002. 341 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28372781> (дата обращения: 21.07.2022); Кострикин А. И. Введение в алгебру. Ч. I. Основы алгебры: учеб. для вузов. М.: Физико-математическая литература, 2000. 272 с.; Яцкин Н. И. Алгебра. Теоремы и алгоритмы: учеб. пособие. Иваново: ИвГУ, 2006. 506 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19450611> (дата обращения: 21.07.2022).

⁷ Белашов В. Ю., Чернова Н. М. Эффективные алгоритмы и программы вычислительной математики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1997. 160 с.

⁸ Кострикин А. И. Введение в алгебру. Ч. I. Основы алгебры: учеб. для вузов. М.: Физико-математическая литература, 2000. 272 с.

⁹ Там же.

Яцкин Н. И. Алгебра. Теоремы и алгоритмы: учеб. пособие. Иваново: ИвГУ, 2006. 506 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19450611> (дата обращения: 21.07.2022).

¹⁰ Березина Л. Ю. Графы и их применение. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 146 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20046438> (дата обращения: 21.07.2022); Цапко И. В. Структуры и алгоритмы обработки данных: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 184 с.

¹¹ Черных И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / под ред. В. Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.



параметров.

Функция $Calculationphi(double*phi, int mphi)$ вычисляет углы выхода и возвращает массив их значений.

Функция $Sortroute(double*RTs, int ms, double*Vs, int q2)$ реализует сортировку и возвращает отсортированные массивы ребер $RTs[ms]$ и вершин $Vs[q2]$.

Функция $Sroute(double*RTres, int mres, double*Vres, int qres, int q, double Vq)$ строит прямой реберный маршрут. Она возвращает массивы ребер $RTres[mres]$, вершин $Vres[qres]$ и интервальных параметров $Vq[q]$ в граничной вершине q .

Функция $SGroute(double*GG, int gmres)$ анализирует возможности пересечения реберных ветвей одной грани и возвращает массив граней $GG[gmres]$, образы ребер которых могут пересекаться.

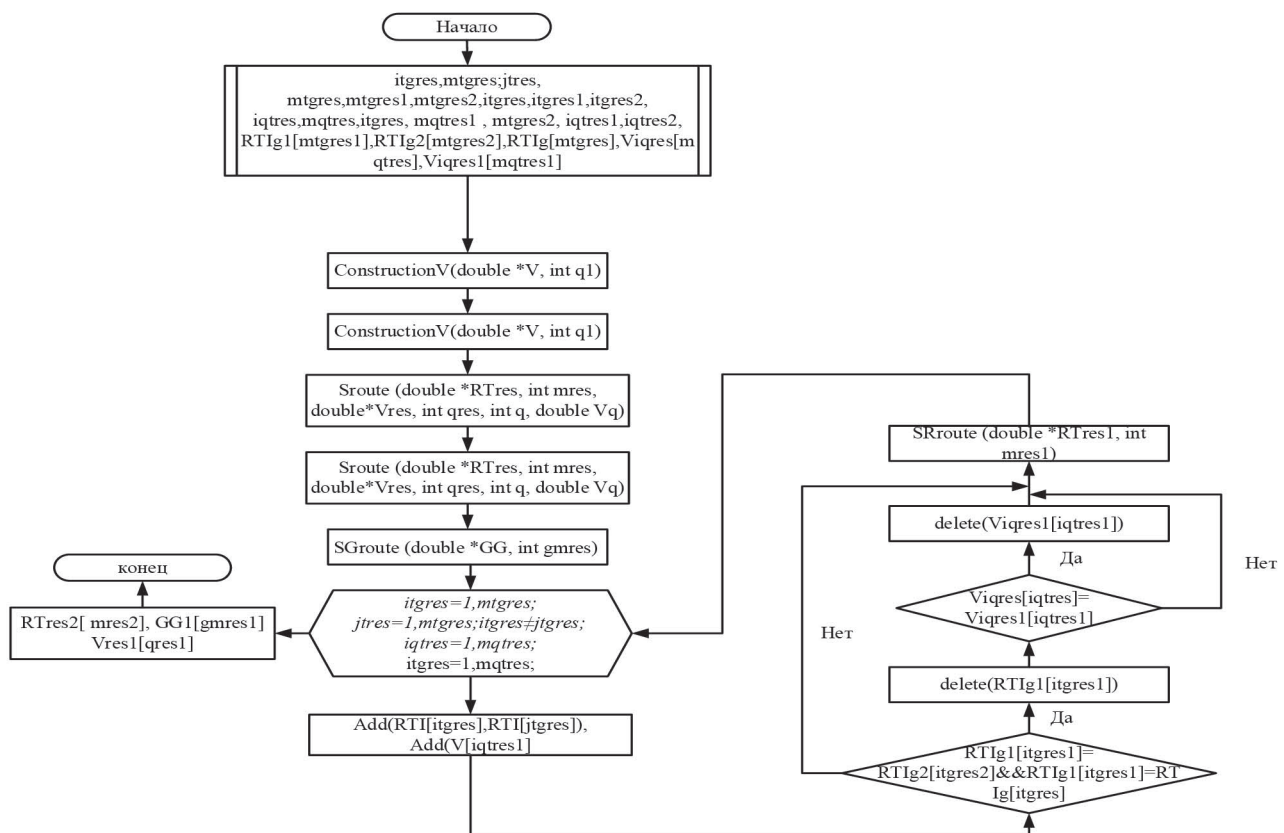
Функция $SRroute(double*RTres1, int mres1)$ анализирует тип

реберных ветвей одной грани и возвращает массив ребер второго типа.

Функция $SGRroute(double*RTres2, int mres2, double*GG1, int gmres1, double*Vres1, int qres1)$ строит граничный вершинно-реберный маршрут. Она возвращает массивы ребер $RTres2[mres2]$, граней $GG1[gmres1]$ и вершин $Vres1[qres1]$.

Функция $Analys(double alpha, double beta, double*Vqalpha, int iqalpha, double TRalpha, int imqalpha)$ отображает граничный вершинно-реберный маршрут на корневую плоскость и возвращает значение степени робастной устойчивости α , значение степени робастной колебательности β , номер вершины или номер ребра.

Блок-схема алгоритма формирования граничного вершинно-реберного маршрута представлена на рисунке 2.



Р и с. 2. Блок-схема формирования граничного вершинно-реберного маршрута

Fig. 2. Flow diagram of the boundary vertex-edge route formation

На рисунке 2 обозначены: $RTIg1[mtgres1]$ – массив ребер после добавления ребер граней и удаления повторяющихся ребер, $mtgres1$ – количество элементов массива ребер граничного маршрута $RTIg1$, $itgres1$ – номер элемента массива ребер $RTIg1$, $RTIg2[mtgres2]$ – вспомогательный массив ребер, $mtgres2=mtgres$ – количество элементов массива $RTIg2$, $itgres2$ – номер элемента массива ребер $RTIg2$, $RTIg[mtgres]$ – массив ребер, образованный после добавления ребер граней, $mtgres$ – суммарное количество элементов массива ребер прямого

маршрута и добавленных ребер, $itgres$ – номер элемента массива ребер $RTIg$, $Viqres[mqtres]$ – массив вершин после добавления вершин граней, $mqtres$ – суммарное количество элементов массива вершин прямого маршрута и добавленных вершин, $iqtres$ – номер элемента массива вершин $Viqres$, $Viqres1[mqtres1]$ – массив вершин после добавления и удаления вершин граней, $mqtres1$ – количество элементов массива вершин граничного маршрута, $iqtres1$ – номер элемента массива вершин $Viqres1$.



Разработка модуля параметрического синтеза линейного робастного регулятора ИСУ

3.1. Методы, используемые в программном модуле

Для определения максимальной степени робастной устойчивости и обеспечивающих ее настроек регулятора с помощью алгебры комплексных чисел¹² разделяется на вещественную и мнимую части и дифференциального исчисления формируются ИХП вида $D^q(\bar{k}, \alpha, \beta) = \text{Re} D^q(\bar{k}, \alpha, \beta) + \text{Im} D^q(\bar{k}, \alpha, \beta)$.

Далее на основе метода Гаусса-Зейделя¹³ решается система [12]:

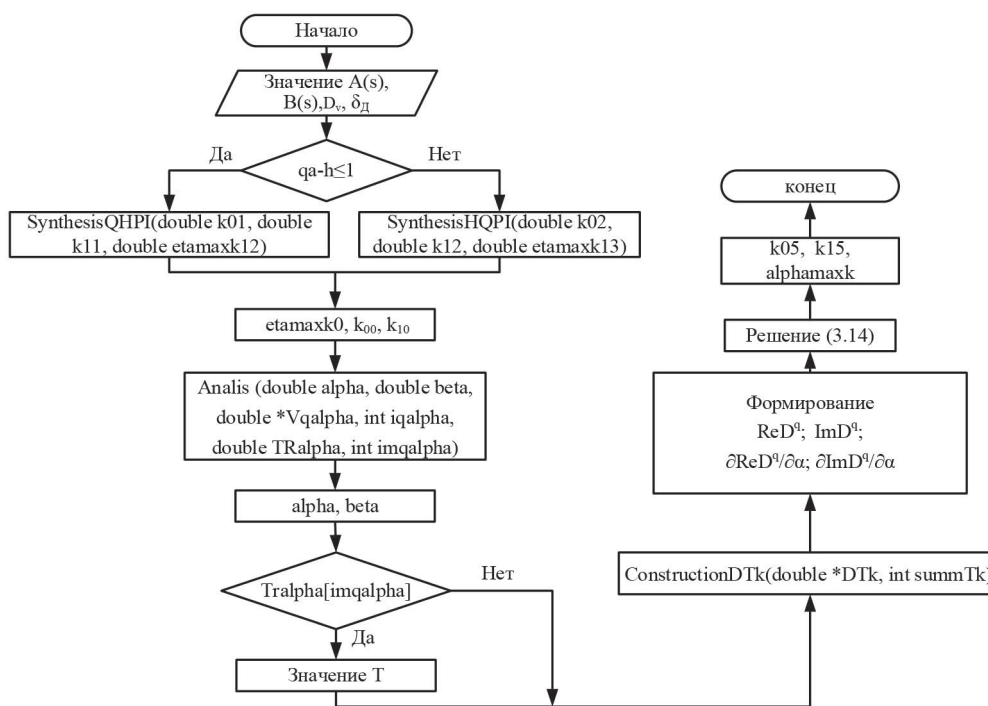
$$\begin{cases} \text{Re} D^q(\bar{k}, \alpha, \beta) = 0; \\ \text{Im} D^q(\bar{k}, \alpha, \beta) = 0; \\ \partial \text{Re} D^q(\bar{k}, \alpha, \beta) / \partial \alpha = 0; \\ \partial \text{Im} D^q(\bar{k}, \alpha, \beta) / \partial \alpha = 0; \\ \dots \\ \partial^c \text{Re} D^q(\bar{k}, \alpha, \beta) / \partial \alpha^c = 0; \\ \partial^c \text{Im} D^q(\bar{k}, \alpha, \beta) / \partial \alpha^c = 0. \end{cases} \quad (3)$$

3.2. Функции и алгоритмы модуля

Функции *SynthesisQHPI(double k01, double k11, double etamaxk12)* и *SynthesisHQPI(double k02, double k12, double etamaxk13)* реализуют синтез робастных ПИ-регуляторов квазimaxимальной степени η_{\max} робастной устойчивости при ограничении на максимальную колебательность [14-23] и соответственно при условиях $q - h \leq 1$ и $q - h \geq 2$

Функции *SynthesisQHPID(double k03, double k13, double k2, double etamaxk14)* и *SynthesisHQPID(double k04, double k14, double k21, double etamaxk15)* реализуют синтез робастных ПИД-регуляторов квазimaxимальной степени η_{\max} робастной устойчивости при ограничении на колебательность и добротность [22] соответственно при условиях $q - h \leq 2$ и $q - h \geq 3$.

Функции *SynthesisPI(double k05, double k15, double alphamaxk)* и *SynthesisPID(double k06, double k16, double k23, double alphamaxk1)* реализуют синтез соответственно робастных ПИ и ПИД-регуляторов максимальной степени α робастной устойчивости при аффинной неопределенности коэффициентов ИХП. Блок-схема указанной функции для ПИ-регулятора приведена на рисунке 3.



Р и с. 3. Блок-схема алгоритма синтеза робастных ПИ-регуляторов
F i g. 3. Flow Diagram of Robast PI Regulator Synthesis Algorithm

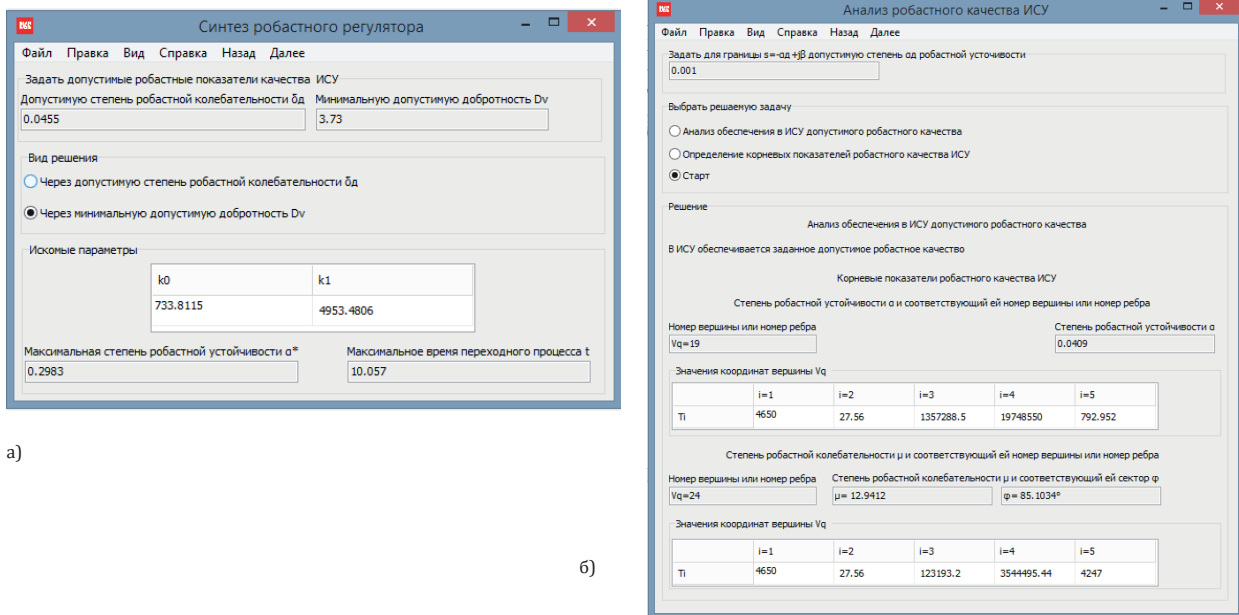
¹² Кострикин А. И. Введение в алгебру. Ч. I. Основы алгебры : учеб. для вузов. М.: Физико-математическая литература, 2000. 272 с.; Яцкин Н. И. Алгебра. Теоремы и алгоритмы : учеб. пособие. Иваново : ИВГУ, 2006. 506 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19450611> (дата обращения: 21.07.2022).

¹³ Кочегурова Е. А. Теория и методы оптимизации : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2013. 134 с.



4. Применение программного комплекса для анализа и синтеза ИСУ ДРК НПА

На рисунке 4 приведены результаты применения программных дулей для анализа и синтеза ПИ-регулятора СУ движительно-рулевого комплекса необитаемого подводного аппарата (ДРК НПА) [24, 25]. Структурная схема данной системы приведена в работе [24].



Р и с. 4. Результаты применения программного комплекса:

а) синтез робастного регулятора; б) анализ показателей качества

F i g. 4. Results of application of the software package: а) robust controller synthesis; б) analysis of quality indicators

Заключение

На основе полученных алгоритмов анализа [11] и синтеза [12] ИСУ с аффинной неопределенностью коэффициентов ИХП разработан программный комплекс RASLIS, позволяющий:

– формировать граничный вершинно-реберный маршрут и на его основе определять корневые показатели робастного качества ИСУ;

– проводить синтез линейных робастных регуляторов при аффинной неопределенности коэффициентов ИХП на основе критерия максимальной степени робастной устойчивости. Программный комплекс RASLIS позволяет анализировать и синтезировать ИСУ как в автоматическом режиме, так и в диалоговом. Работа программного комплекса RASLIS апробирована на примере анализа корневых показателей робастного качества и синтеза робастного регулятора СУ ДРК НПА.

Список использованных источников

- [1] Grigut E., Kiriyaikov 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] 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>
- [3] 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: 21.07.2022).
- [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: 21.07.2022).



- [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: 21.07.2022).
- [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: 21.07.2022).
- [7] Кунцевич А. В., Кунцевич В. М. Инструментальная система «Robust stability» анализа робастной устойчивости динамических систем // Автоматика. 1990. Т. 23, № 6. С. 1-6. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31157147> (дата обращения: 21.07.2022).
- [8] 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>
- [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: 21.07.2022).
- [10] Метод синтеза регулятора робастного по перегулированию 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] Khozhaev I. V., Gayvoronskiy S. A., Ezangina T. A. Parametric synthesis of a robust controller on a base of mathematical programming method // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1016, issue 1. Article number: 012010. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1016/1/012010>
- [13] Banjerdpongchai D., How J. P. LMI synthesis of parametric robust /spl Hscr//sub /spl infin// controllers // Proceedings of the 1997 American Control Conference (Cat. No.97CH36041). Albuquerque, NM, USA : IEEE Computer Society, 1997. Vol. 1. P. 493-498. doi: <https://doi.org/10.1109/ACC.1997.611848>
- [14] Цавнин А. В., Ефимов С. В., Замятин С. В. Корневой подход к синтезу параметров ПИД-регулятора, гарантирующий отсутствие перегулирования 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: 21.07.2022).
- [16] Смирнов Н. И., Шаровин И. М. О выборе критерия оптимальности в численных методах расчета САР // Промышленные АСУ и контроллеры. 2009. № 5. С. 16-21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12364788> (дата обращения: 21.07.2022).
- [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: 21.07.2022).
- [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/CSSA.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. Mihailescu-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] Gayvoronskiy S. A., Ezangina T., Pushkarev M. Parametric Synthesis of a Robust Controller for Maximising the Response of an Interval Control System. International Review of Automatic Control. 2022. Vol. 15, no. 2. P. 58-69. doi: <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.20560>
- [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] 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, issue 5. P. 378-384. doi: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.6.5.378-384>
- [25] 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>

Поступила 21.07.2022; одобрена после рецензирования 28.09.2022; принята к публикации 19.11.2022.



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., Kiriyaikov 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] 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>
- [3] 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 21.07.2022).
- [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 21.07.2022). (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 21.07.2022). (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 21.07.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [7] Kuntsevich A.V., Kuntsevich V.M. “Robust stability” tool system for the analysis of the robust stability of dynamic systems. *Soviet Journal of Automation and Information Sciences*. 1990;23(6):1-6. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31157147> (accessed 21.07.2022).
- [8] 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>
- [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 21.07.2022). (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] Khozhaev I.V., Gayvoronskiy S.A., Ezangina T.A. Parametric synthesis of a robust controller on a base of mathematical programming method. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1016(1):012010. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1016/1/012010>
- [13] Banjerdpongchai D., How J.P. LMI synthesis of parametric robust /spl Hscr//sub /spl infin// controllers. In: Proceedings of the 1997 American Control Conference (Cat. No.97CH36041). Albuquerque, NM, USA: IEEE Computer Society; 1997. Vol. 1. p. 493-498. doi: <https://doi.org/10.1109/ACC.1997.611848>
- [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 21.07.2022). (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 21.07.2022). (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 21.07.2022). (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., Schrodel 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] Gayvoronskiy S.A., Ezangina T., Pushkarev M. Parametric Synthesis of a Robust Controller for Maximising the Response of an Interval Control System. *International Review of Automatic Control*. 2022;15(2):58-69. doi: <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.20560>
- [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] 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>
- [25] 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>

Submitted 21.07.2022; approved after reviewing 28.09.2022; accepted for publication 19.11.2022.

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.

