УДК 681.50

МАКСИМИЗАЦИЯ РОБАСТНОЙ СТЕПЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ С ИНТЕРВАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ ПОЛИНОМОМ

Соболь Александр Васильевич[1],
avs127@tpu.ru

Гайворонский Сергей Анатольевич[1],
saga@tpu.ru

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

В статье рассматривается применение критических корневых диаграмм для синтеза однопараметрического робастного регулятора, обеспечивающего максимальную степень устойчивости в системе третьего порядка с интервальными параметрами. Для синтеза регулятора используется характеристический полином системы, коэффициенты которого заданы своими интервалами. На критических корневых диаграммах доминирующие корни характеристического полинома расположены на одной вертикальной прямой, определяющей максимальную степень устойчивости. Разработан алгоритм синтеза регулятора в вершинах многогранника коэффициентов полинома, являющихся возможными прообразами доминирующих полюсов критических диаграмм. Приведен числовой пример.

Ключевые слова: *робастная степень устойчивости, максимизация степени устойчивости, интервальные коэффициенты характеристического полинома, критические корневые диаграммы.*

Введение

Критерий максимальной степени устойчивости (МСУ) является одним из основных критериев при синтезе систем автоматического управления (САУ) [1, 2]. Для стационарных САУ n-го порядка с k настраиваемыми параметрами МСУ определяется полюсами, заданными критическими корневыми диаграммами (ККД) [3]. ККД можно использовать при синтезе линейного регулятора максимальной степени устойчивости по методу, предложенному в [4]. В этой работе задаются в общем виде комплексно-сопряженные или вещественные полюса, определяющие степень устойчивости САУ, а также настройки регулятора. Эти параметры находятся из решения системы уравнений, полученной из действительной и мнимой частей характеристического полинома САУ, а также их производных по степени устойчивости. Число уравнений системы определяется количеством искомых параметров.

Очевидна актуальность обеспечения МСУ в нестационарных САУ, где некоторые параметры заданы интервалами, внутри которых они могут изменяться по заранее неизвестным законам. С учетом этого в таких интервальных САУ (ИСАУ) необходимо обеспечить максимальную степень робастной устойчивости, то есть максимум минимально возможной степени устойчивости системы. Такая задача на основе коэффициентного метода решена в [5, 6] для ИСАУ с интервальным характеристическим полиномом (ИХП), коэффициенты которого заданы своими интервалами.

Однако получающиеся в результате параметрического синтеза данным методом настройки робастного регулятора оказываются слишком грубыми, что может привести к большой степени консерватизма ИСАУ. С целью его уменьшения представляет интерес модификация указанного выше метода максимизации степени устойчивости стационарных систем на основе интервального расширения и применения ККД.

Вершины-кандидаты на робастную степень устойчивости

Для стационарной САУ третьего порядка с одним параметром настройки регулятора максимальная степень устойчивости может определяться двумя видами расположения полюсов на двух ККД. Первый представлен на рис. 1, где все три полюса лежат на одной вертикальной прямой, определяющей степень устойчивости [3].

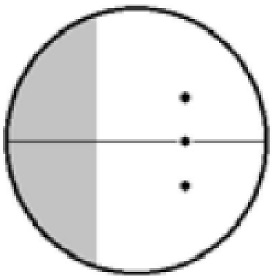

Рис. 1. *Критическая корневая диаграмма с полюсами на одной линии*

Fig. 1. *Critical root diagram with poles on the same line*

Рассмотрим вторую ККД с двумя кратными полюсами (рис. 2). Третий полюс находится в серой зоне.

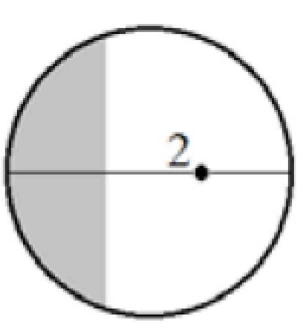

Рис. 2. *Критическая корневая диаграмма с кратными полюсами*

Fig. 2. *Critical root diagram with multiple poles*

Очевидно, что в определенных вершинах многогранника интервальных коэффициентов ИХП третьего порядка при изменении параметра линейного регулятора можно получить первую или вторую ККД, определяющую степень устойчивости.

При изменении коэффициентов ИХП полюса ККД могут смещаться вправо, снижая степень устойчивости ИСАУ. Однако есть вершины, в которых степень устойчивости минимальна, а при изменении коэффициентов она возрастает. Назовем такие вершины вершинами-кандидатами на минимальную (робастную) степень устойчивости и определим их координаты для приведенных ККД. На основании [7] можно сделать вывод, что комплексные полюса ККД на рис. 1 могут быть образами следующих вершин-кандидатов:

$$\underline{\alpha_3}\,\overline{\alpha_2}\,\underline{\alpha_1}\,\overline{\alpha_0}; \tag{1}$$

$$\overline{\alpha_3}\,\underline{\alpha_2}\,\underline{\alpha_1}\,\overline{\alpha_0}; \tag{2}$$

$$\overline{\alpha_3}\,\overline{\alpha_2}\,\underline{\alpha_1}\,\overline{\alpha_0}. \tag{3}$$

При этом вещественный полюс ККД является образом вершины

$$\overline{\alpha_3}\,\underline{\alpha_2}\,\overline{\alpha_1}\,\underline{\alpha_0}. \tag{4}$$

Два кратных вещественных полюса ККД на рис. 2 являются образами следующих вершин:

$$\underline{\alpha_3}\,\overline{\alpha_2}\,\underline{\alpha_1}\,\overline{\alpha_0}; \tag{5}$$

$$\overline{\alpha_3}\,\underline{\alpha_2}\,\overline{\alpha_1}\,\underline{\alpha_0}. \tag{6}$$

Заметим, что вершины (5) и (6) совпадают соответственно с вершинами (1) и (4).

Максимизация робастной степени устойчивости

Для решения этой задачи воспользуемся следующими свойствами степени устойчивости ИСАУ:

1. Зависимость степени устойчивости от параметра регулятора $\alpha_i(k)$, где i – номер вершины параметрического многогранника коэффициентов характеристического полинома, является унимодальной функцией [8].
2. Минимальная степень устойчивости ИСАУ с ИХП находится в вершинах многогранника коэффициентов ИХП [9].
3. Максимум минимальной степени устойчивости ИСАУ является максимумом подграфика функций $\alpha_i(k)$, где i – номер вершины.

Заметим, что разработчик ИСАУ заранее не знает, какая из двух представленных выше ККД получится в результате синтеза регулятора системы третьего порядка. Следовательно, синтез параметров регулятора необходимо проводить для обеих ККД. На основе указанных выше свойств степени устойчивости максимум минимальной степени устойчивости следует находить при изменении параметра регулятора для каждой вершины-кандидата. Для ее поиска необходимо для каждой из двух возможных ККД в соответствии с [4] составить и решить системы уравнений. Так, для ККД на рис. 1 следует сформировать вершинные характеристические полиномы и представить их в виде суммы вещественной $R(k,\alpha,\omega)$ и мнимой $I(k,\alpha,\omega)$ частей. Затем из них составить следующие системы уравнений:

$$i = 1 \div 4, \begin{cases} R_i(k_i, \alpha_i, \omega_i) = 0; \\ I_i(k_i, \alpha_i, \omega_i) = 0; \\ \dfrac{dR_i(k_i, \alpha_i, \omega_i)}{d\alpha_i} = 0; \end{cases} \tag{7}$$

где k_i – настроечный параметр регулятора; α_i – степень усточивости системы; ω_i – частота; i – номер вершинного полинома. Для ККД на рис. 2 системы будут иметь вид:

$$i = 1 \div 2, \begin{cases} R_i(k_i, \alpha_i, \omega_i) = 0; \\ I_i(k_i, \alpha_i, \omega_i) = 0; \\ \dfrac{dR_i(k_i, \alpha_i, \omega_i)}{d\alpha_i} = 0. \end{cases}$$

Затем из найденных в результате решения систем уравнений значений степеней устойчивости выбирается минимальная и соответствующая ей вершина. Далее при найденном параметре регулятора определяются значения степеней устойчивости во всех других вершинах-кандидатах. Если эти значения оказываются больше найденного минимального, то задача определения максимума робастной степени устойчивости решена. Если же хотя бы в одной из вершин-кандидатов степень устойчивости при найденном параметре получается меньшей, чем найденная минимальная степень устойчивости, то задачу нельзя считать решенной. В таком случае минимальная степень устойчивости будет находиться в точке пересечения двух кривых, отражающих изменение степени устойчивости системы $\alpha_i(k)$ при изменении параметра настройки регулятора в двух различных вершинах-кандидатах.

В этом случае для поиска пересечений функций степени устойчивости $\alpha_i(k)$ необходимо составить следующие системы уравнений:

1) для ККД на рис. 1

$$i = 1 \div 4, m = 1 \div 4, i \neq m, \begin{cases} R_i(k, \alpha, \omega_i) = 0; \\ I_i(k, \alpha, \omega_i) = 0; \\ R_m(k, \alpha, \omega_m) = 0; \\ I_m(k, \alpha, \omega_m) = 0. \end{cases}$$

2) для ККД на рис. 2

$$\begin{cases} R_1(k, \alpha, \omega_1) = 0; \\ I_1(k, \alpha, \omega_1) = 0; \\ R_2(k, \alpha, \omega_2) = 0; \\ I_2(k, \alpha, \omega_2) = 0. \end{cases}$$

Таким образом, алгоритм синтеза регулятора максимальной робастной степени устойчивости с использованием критических корневых диаграмм содержит следующие этапы:

1) получение интервалов значений коэффициентов характеристического полинома системы управления на основе известных постоянных параметров системы и интервалов ее нестабильных параметров;
2) формирование вершинных характеристических полиномов для всех вершин-кандидатов (1)–(6) на робастную степень устойчивости для ККД на рис. 1, 2;

3) составление систем уравнений для каждого вершинного полинома;
4) решение систем уравнений п. 3 и нахождение для каждой из них значения параметра регулятора и соответствующего ему значения максимальной степени устойчивости ИСАУ;
5) выбор из результатов п. 4 наименьшей максимальной степени устойчивости и соответствующей ей вершины;
6) поиск степени устойчивости во всех других вершинах-кандидатах. Если в них она будет больше найденной в п. 5, то процесс синтеза регулятора максимальной робастной степени устойчивости завершен;
7) если степень устойчивости в какой-либо вершине окажется меньше найденной в п. 5, то для дальнейшей максимизации робастной степени устойчивости следует находить точки пересечения графиков $\alpha_i(k)$ для всех пар вершин-кандидатов. В этом случае также необходимо сравнение получаемых значений степени устойчивости с ее значениями в других вершинах-кандидатах;
8) выбор максимального и обеспечивающего его значения параметра регулятора из полученных в п. 7 значений степени устойчивости. На этом процесс максимизации робастной степени устойчивости системы считается завершенным.

Пример

Рассмотрим ИСАУ третьего порядка, описываемую следующим ИХП:

$$a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0 = 0,$$

где $a_3 \in [0.9;\ 1]$, $a_2 \in [96;\ 97]$, $a_1 \in [2205;\ 2210]$, $a_0 \in [13100+2000k;\ 13200+2000k]$; k – коэффициент регулятора. Четыре вершинных ХП с коэффициентами (1)–(4) имеют следующий вид:

$$0.9s^3 + 97s^2 + 2205s + 13200 + 2000k = 0,$$
$$s^3 + 96s^2 + 2210s + 13100 + 2000k = 0,$$
$$s^3 + 96s^2 + 2205s + 13200 + 2000k = 0,$$
$$s^3 + 97s^2 + 2205s + 13200 + 2000k = 0.$$

Необходимо максимизировать робастную степень устойчивости этой системы, выбирая оптимальное значение k. Для этого сначала составим и решим системы уравнений (7), предполагая, что графики $\alpha_i(k)$ не пересекаются. Эти системы имеют вледующий вид

$$\begin{cases} R_1(k_1,\alpha_1,\omega_1)=0; \\ I_1(k_1,\alpha_1,\omega_1)=0; \\ \dfrac{\partial R_1(k_1,\alpha_1,\omega_1)}{\partial\alpha}=0. \end{cases} \quad \begin{cases} R_2(k_2,\alpha_2,\omega_2)=0; \\ I_2(k_2,\alpha_2,\omega_2)=0; \\ \dfrac{\partial R_2(k_2,\alpha_2,\omega_2)}{\partial\alpha}=0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_3(k_3,\alpha_3,\omega_3)=0; \\ I_3(k_3,\alpha_3,\omega_3)=0; \\ \dfrac{\partial R_3(k_3,\alpha_3,\omega_3)}{\partial\alpha}=0. \end{cases} \quad \begin{cases} R_4(k_4,\alpha_4,\omega_4)=0; \\ I_4(k_4,\alpha_4,\omega_4)=0; \\ \dfrac{\partial R_4(k_4,\alpha_4,\omega_4)}{\partial\alpha}=0. \end{cases}$$

Решив эти системы уравнений, получим α=14,15, k=0,56. Вершина-кандидат, обеспечивающая такую степень устойчивости, имеет координаты $\underline{\alpha_3}\overline{\alpha_2}\underline{\alpha_1}\overline{\alpha_0}$. Предположим, что это минимальная степень устойчивости. Подставив k=0,56 в четыре ХП (1)–(4), получим их корни (табл. 1).

Таблица 1. *Корни характеристических полиномов при k=0,56*
Table 1. *Roots of characteristic polynomials at k=0,56*

Вершинные характеристические полиномы Vertex characteristic polynomials	Значения корней Root values		
[a_3=0,9; a_2=97; a_3=2205; a_0=13200+2000k];	–79,47	–14,16	–14,15
[a_3=1; a_2=96; a_3=2210; a_0=13100+2000k];	–65,63	–18,90	–11,47
[a_3=1; a_2=96; a_3=2205; a_0=13200+2000k];	–65,80	–18,31	–11,90
[a_3=1; a_2=97; a_3=2205; a_0=13200+2000k];	–67,46	–17,1545	–12,38
k=0,56			

Степень устойчивости в других вершинах оказалась меньше. Это означает, что робастная степень устойчивости будет в точке пересечения пар графиков $\alpha_i(k)$. Исследуем все пересечения и затем найдем параметры, обеспечивающие максимальную робастную степень устойчивости. Для этого составим системы уравнений для всех пар вершинных полиномов (1)–(4)

$$\begin{cases} R_1(k,\alpha,\omega_1)=0; \\ I_1(k,\alpha,\omega_1)=0; \\ R_2(k,\alpha,\omega_2)=0; \\ I_2(k,\alpha,\omega_2)=0. \end{cases} \begin{cases} R_1(k,\alpha,\omega_1)=0; \\ I_1(k,\alpha,\omega_1)=0; \\ R_3(k,\alpha,\omega_3)=0; \\ I_3(k,\alpha,\omega_3)=0. \end{cases} \begin{cases} R_1(k,\alpha,\omega_1)=0; \\ I_1(k,\alpha,\omega_1)=0; \\ R_4(k,\alpha,\omega_4)=0; \\ I_4(k,\alpha,\omega_4)=0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_2(k,\alpha,\omega_2)=0; \\ I_2(k,\alpha,\omega_2)=0; \\ R_4(k,\alpha,\omega_4)=0; \\ I_4(k,\alpha,\omega_4)=0. \end{cases} \begin{cases} R_2(k,\alpha,\omega_2)=0; \\ I_2(k,\alpha,\omega_2)=0; \\ R_3(k,\alpha,\omega_3)=0; \\ I_3(k,\alpha,\omega_3)=0. \end{cases} \begin{cases} R_3(k,\alpha,\omega_3)=0; \\ I_3(k,\alpha,\omega_3)=0; \\ R_4(k,\alpha,\omega_4)=0; \\ I_4(k,\alpha,\omega_4)=0. \end{cases}$$

Решив эти системы уравнений, получим α=14,07, k=0,89. Подставляя этот коэффициент в четыре ХП (1)–(4), получаем их корни (табл. 2). Вершины-кандидаты, обеспечивающие такую общую степень устойчивости, имеют координаты $\underline{\alpha_3}\overline{\alpha_2}\underline{\alpha_1}\overline{\alpha_0}$ и $\overline{\alpha_3}\underline{\alpha_2}\overline{\alpha_1}\underline{\alpha_0}$. Это означает, что данная система имеет ККД на рис. 2.

Таблица 2. *Корни характеристических полиномов при k=0,89*
Table 2. *Roots of characteristic polynomials at k=0,89*

Вершинные характеристические полиномы Vertex characteristic polynomials	Значения корней Root values		
[a_3=0,9; a_2=97; a_3=2205; a_0=13200+2000k];	–79,64	–14,07–j3,31	–14,07+j3,31
[a_3=1; a_2=96; a_3=2210; a_0=13100+2000k];	–65,88	–16,05	–14,07
[a_3=1; a_2=96; a_3=2205; a_0=13200+2000k];	–66,05	–14,98–j1,57	–14,98+j1,57
[a_3=1; a_2=97; a_3=2205; a_0=13200+2000k];	–67,70	–14,65–j2,56	–14,65+j2,56
k=0,89			

Как видно из табл. 2, наибольшая робастная степень устойчивости получена в точке пересечения функций $\alpha_i(k)$. Расстояние от ближайшего корня до оси равно 14,07. Для проверки результата решения задачи построим области локализации полюсов рассматриваемой системы по ее интервальному характеристическому полиному при найденном значении параметра регулятора (рис. 3).

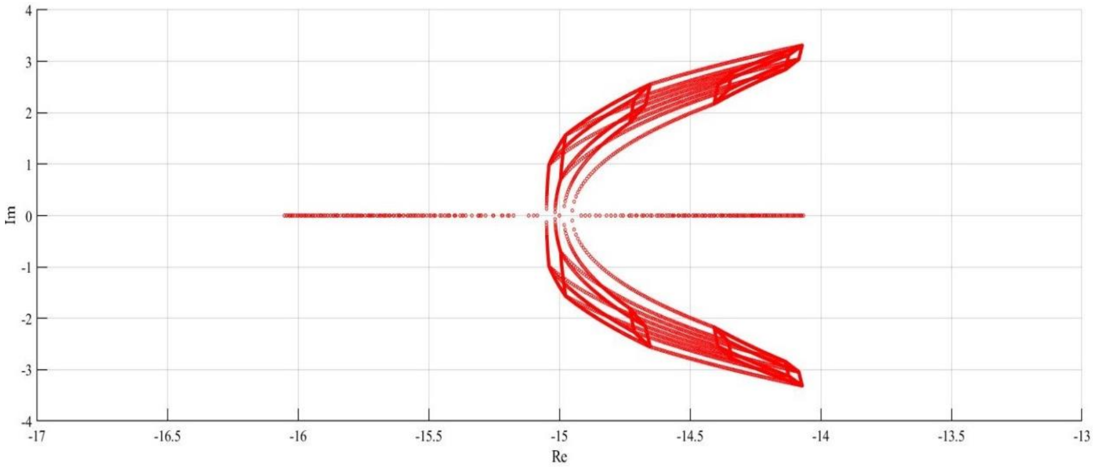

Рис. 3. *Области локализации полюсов системы с ИХП*
Fig. 3. *Areas of localization of the poles of the system with ICP*

Как видно из рис. 3, ближайшие к мнимой оси полюса системы, характеризующие ее максимальную робастную степень устойчивости, лежат на одной вертикальной прямой и совпадают с табличными.

Заключение

Для системы управления третьего порядка, заданной интервальным характеристическим полиномом, разработан алгоритм определения параметра регулятора, обеспечивающего максимально возможную степень устойчивости системы при наихудшем сочетании значений интервальных коэффициентов характеристического полинома. В основу параметрического синтеза регулятора положено использование критических корневых диаграмм и знание вершин многогранника коэффициентов полинома, образы которых определяют минимальную степень устойчивости интервального характеристического полинома. Разработанный алгоритм параметрического синтеза робастного регулятора предусматривает максимизацию минимальной степени устойчивости в указанных вершинах. Приведенный числовой пример наглядно иллюстрирует применение разработанной методики максимизации робастной степени устойчивости системы с интервальным характеристическим полиномом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00737).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шубладзе А.М. Способы синтеза систем управления максимальной степени устойчивости // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 1. – С. 28–37.
2. Волков А.Н., Загашвили Ю.В. Метод синтеза систем автоматического управления с максимальной степенью устойчивости при наличии ограничений // Известия РАН. Сер. Теория и системы управления. – 1997. – № 3. – С. 12–19. EDN: LEDOWP
3. Воевода А.А., Чехонадских А.В. Построение списка критических расположений полюсов систем автоматического управления // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 2–3 (23–24). – С. 7–18.
4. Татаринов А.В., Цирлин А.М. Задачи математического программирования, содержащие комплексные переменные, и предельная степень устойчивости динамических систем // Известия РАН, сер. Теория и системы управления. – 1995. – № 1. – С. 28–33.
5. Ezangina T.A., Gayvoronskiy S.A. Ensuring maximum stability degree in the systems with interval parameters // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 752–753. – P. 955–961. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.752-753.955
6. Pushkarev M.I., Gaivoronsky S.A. Maximizing stability degree of control systems under interval uncertainty using a coefficient method // Reliable Computing. – 2014. – V. 19. – № 3. – P. 248–260.
7. Определение вершинных полиномов для анализа степени робастной устойчивости интервальной системы / С.А. Гайворонский, Т.А. Езангина, И.В. Хожаев, А.А. Несенчук // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – № 5. – С. 266–273. EDN: WCHZXW. DOI: 10.17587/mau.20.266-273
8. Кузнецов В.П., Кукареко Е.П., Фурман Ф.В. Численная процедура получения экспоненциальных оценок в линейных непрерывных системах с неопределенными параметрами // Автоматика и телемеханика. – 1987. – № 5. – С. 183–186.
9. Анализ и синтез линейных интервальных динамических систем (состояние проблемы). I. Анализ с использованием интервальных характеристических полиномов / Ю.М. Гусев, В.Н. Ефанов, В.Г. Крымский, В.Ю. Рутковский // Известия академии наук СССР. Техническая кибернетика. – 1991. – № 1. – С. 3–30. EDN: WFCCPN

Поступила: 10.05.2023 г.
Принята: 20.06.2023 г.

Информация об авторах

Соболь А.В., аспирант отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гайворонский С.А., кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 681.50

MAXIMIZING THE ROBUST STABILITY DEGREE OF SYSTEM WITH INTERVAL CHARACTERISTIC POLYNOMIAL

Alexander V. Sobol[1],
avs127@tpu.ru

Sergey A. Gayvoronskiy[1],
saga@tpu.ru

[1] National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The article considers the use of critical root diagrams for the synthesis of a one-parameter robust controller that provides the maximum stability degree in a third-order system with interval parameters. For the synthesis of the controller, the characteristic polynomial of the system is used, the coefficients of which are given by their own intervals. On critical root diagrams, the dominant roots of the characteristic polynomial are located on one vertical straight line, which determines the maximum degree of stability. The authors have developed the algorithm for synthesizing a controller at the vertices of a polyhedron of polynomial coefficients, which are possible prototypes of the dominant poles of critical diagrams. A numerical example is given.

Key words: *robust stability degree, maximization of stability degree, interval coefficients of the characteristic polynomial, critical root diagrams.*

The research was financial supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-29-00737).

REFERENCES

1. Shubladze A.M. Techniques for design of a maximally stable control systems. *Avtomat. i Telemekh*., 1980, no. 1, pp. 28–37. In Rus.
2. Volkov A.N., Zagashvili Yu.V. A method of synthesis of automatic control systems with maximum stability degree under constraints. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 1997, no. 3, pp. 12–19. In Rus. EDN: LEDOWP.
3. Voevoda A.A., Chekhonadskikh A.V. Postroenie spiska kriticheskikh raspolozhenii poliusov sistem avtomaticheskogo upravleniia [Construction of the critical location list of automatic control system poles]. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2014, no. 2–3 (23–24), pp. 7–18. In Rus.
4. Tatarinov A.V., Tsirlin A.M. Mathematical programming problems containing complex variables and the limiting stability degree of linear dynamic systems. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 1995, no. 1, pp. 28–33. In Rus.
5. Ezangina T.A., Gayvoronskiy S.A. Ensuring maximum stability degree in the systems with interval parameters. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 752–753, pp. 955–961. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.752-753.955
6. Pushkarev M.I., Gaivoronsky S.A. Maximizing stability degree of control systems under interval uncertainty using a coefficient method. *Reliable Computing*, 2014, vol. 19, no. 3, pp. 248–260.
7. Gayvoronskiy S.A., Ezangna T.A., Khozhaev I.V., Nesenchuk A.A. Analyzing robust stability of an interval control system on the basis of vertex polynomials. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 5, pp. 266–273. EDN: WCHZXW. DOI: 10.17587/mau.20.266-273. In Rus.
8. Kuznetsov V.P., Kukareko Y.P., Furman F.V. A numerical procedure for obtaining exponential estimates in linear continuous systems whose parameters are indefinite. *Avtomat. i Telemekh*., 1987, no. 5, 183–186. In Rus.
9. Gusev Yu.M., Efanov V.N., Krymskiy V.G., Rutkovskiy V.Yu. Analiz i sintez lineynykh intervalnykh dinamicheskikh sistem (sostoyaniye problemy). I. Analiz s ispolzovaniyem intervalnykh kharakteristicheskikh polinomov [Analysis and synthesis of linear interval dynamical systems (state of the problem). I. Analysis using interval characteristic polynomials]. *Izvestiya akademii nauk SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika*, 1991, no. 1, pp. 3–30. EDN: WFCCPN.

Received: 10 May 2023.
Reviewed: 20 June 2023.

Information about the authors

Alexander V. Sobol, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey A. Gayvoronskiy, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.