УДК 681.5.013
DOI: 10.18799/29495407/2024/3/64
Шифр специальности ВАК: 2.3.1

Получение монотонного переходного процесса в системе с интервальным характеристическим полиномом

С.А. Гайворонский✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉saga@tpu.ru

Аннотация. Рассматривается характеристический полином системы управления с интервальными коэффициентами. В них входят изменяющиеся в известных пределах параметры объекта управления и постоянные параметры модального робастного регулятора, которыми необходимо обеспечить и сохранять в системе монотонные переходные процессы допустимой длительности. Для их получения интервальная система должна иметь робастную степень апериодической устойчивости, определяемую правой границей отрезка доминирующего вещественного полюса при условии вещественности и всех других полюсов. Решение задачи получения монотонного переходного процесса основано на разделении параметров модального робастного регулятора на свободные и зависимые. Зависимые параметры задают отрезок доминирующего полюса, а свободные располагают отрезки остальных полюсов в заданной области на основе метода A-разбиения.

Ключевые слова: интервально-неопределенные параметры, интервальный характеристический полином, модальный робастный регулятор, монотонный переходный процесс, доминирующий вещественный полюс, робастная степень апериодической устойчивости

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-0737, https://rscf.ru/project/23-29-0737

Для цитирования: Гайворонский С.А. Получение монотонного переходного процесса в системе с интервальным характеристическим полиномом // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2024. – Т. 2. – № 3. – С. 28–35. DOI: 10.18799/29495407/2024/3/64

UDC 681.5.013
DOI: 10.18799/29495407/2024/3/64

Obtaining monotonic transient process in a system with an interval characteristic polynomial

S.A. Gayvoronskiy✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉saga@tpu.ru

Abstract. The paper considers the characteristic polynomial of a control system with interval coefficients. They include parameters of the control object changing within known limits and constant parameters of the modal robust controller, which are necessary to ensure and maintain monotonic transient processes of admissible duration in the system. To obtain them, the interval system must have a robust degree of aperiodic stability determined by the right boundary of the segment of the dominant real pole under the condition of the reality of all other poles. The solution to the problem of obtaining a monotonic transient process is based on dividing the parameters of the modal robust controller into free and dependent ones. Dependent parameters define the segment of the dominant pole, and free ones arrange the segments of the remaining poles in a given region based on the A-partition method.

Key words: interval-uncertain parameters, interval characteristic polynomial, modal robust controller, monotonic transient process, dominant real pole, robust degree of aperiodic stability

Acknowledgements: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-29-0737, https://rscf.ru/project/23-29-0737

For citation: Gayvoronskiy S.A. Obtaining monotonic transient process in a system with an interval characteristic polynomial. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2024, vol. 2, no. 3, pp. 28–35. DOI: 10.18799/29495407/2024/3/64

Введение

Задача синтеза динамических регуляторов систем автоматического управления (САУ) в условиях параметрических возмущений заключается в получении переходных процессов с допустимыми показателями качества [1–3]. Такими, как правило, являются апериодические переходные процессы. При этом для ряда САУ промышленными объектами стремятся получить строго апериодические (монотонные) переходные процессы заданной длительности [4]. В них отсутствуют не только колебания, но и перерегулирование, что часто необходимо для определенных технологических процессов. Так как вид переходного процесса определяется расположением полюсов САУ на комплексной плоскости, для получения требуемого вида переходного процесса применяют модальный (корневой) метод [5]. Для стационарных САУ указанная задача может быть решена на основе модального подхода, при котором монотонные переходные процессы в системе обеспечиваются вещественностью всех ее полюсов. При этом для получения требуемого времени переходного процесса необходимо задать соответствующий доминирующий вещественный полюс и отодвинуть от него в желаемые точки все другие вещественные полюса. Расположить указанным образом все полюса стационарной системы можно модальным регулятором полного порядка, у которого число параметров равно порядку системы, или регулятором пониженного порядка [6, 7].

Известно, что реальные САУ являются, как правило, нестационарными, их параметры изменяются по заранее неизвестным законам в определенных диапазонах. Для таких САУ разработаны различные методы синтеза робастных регуляторов на основе интервальных характеристических полиномов систем [8–11]. При этом следует выделить работы [12–15], где для нестационарных САУ разработаны методики синтеза робастных регуляторов апериодической степени устойчивости. Однако особый интерес представляет получение в интервальных нестационарных САУ монотонных переходных процессов. Так, в [16] разработана методика синтеза модального робастного регулятора (МРР) полного порядка по выходу для системы с интервально-неопределенными параметрами. Однако такая методика подходит главным образом для систем низкого порядка. В случае же интервальной системы высокого порядка может быть применен подход из [7, 17] и на основе принципа доминирующих полюсов и метода D-разбиения [18] синтезирован МРР пониженного порядка по выходу, одна группа параметров которого управляет локализацией доминирующих полюсов, а другая – размещением всех остальных полюсов системы.

Постановка задачи

Пусть САУ с нестационарным объектом управления (ОУ) и МРР по сигналу отклонения представлена структурной схемой, приведенной на рис. 1.

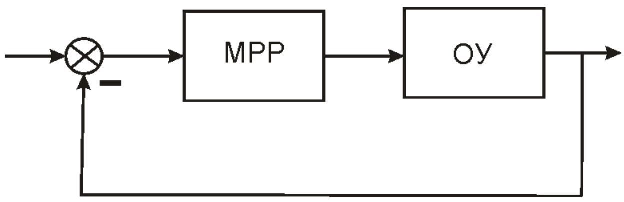

Рис. 1. *Структура САУ с МРР*
Fig. 1. *Structure of automatic control system with modal robust controller*

В общем виде МРР имеет передаточную функцию $W(p)=C(p)/D(p)$, коэффициентами которой являются настраиваемые параметры регулятора. Вместе с интервальными параметрами нестационарного ОУ они входят в коэффициенты характеристического полинома системы. На основе правил интервальной математики приведем этот полином к интервальному виду [10], когда его коэффициенты задаются числовыми интервалами.

Многогранник интервальных коэффициентов характеристического полинома в общем случае является гиперпараллелепипедом P_a. Для САУ второго порядка, характеристический полином которой имеет три интервальных коэффициента, такой многогранник показан на рис. 2.

При отображении P_a на корневую плоскость образуются замкнутые области локализации корней полинома [19]. Очевидно, что для гарантирования в системе монотонного переходного процесса все области локализации корней должны быть отрезками на вещественной оси. При этом, согласно [20], для обеспечения допустимого времени монотонного переходного процесса следует обеспечить расположение доминирующего корня в заданном отрезке и отодвинуть от него отрезки остальных корней (рис. 3).

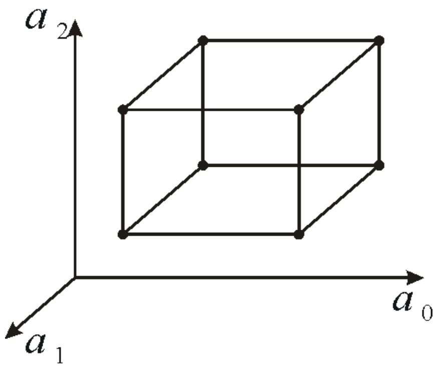

Рис. 2. *Область возможных значений коэффициентов полинома*
Fig. 2. *Range of possible values of the polynomial coefficients*

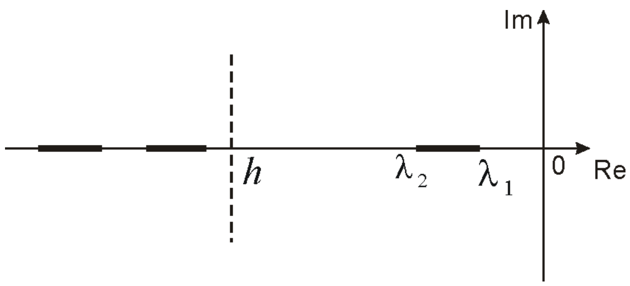

Рис. 3. *Расположение отрезков вещественных корней*
Fig. 3. *Location of segments of real roots*

Приведем интервальное характеристическое уравнение системы к виду

$$\sum_{i=1}^{r} k_i \ A_i(p) + B(p) = 0, \qquad (1)$$

где k_i, i=1,2,…,r – параметры МРР, значения которых необходимо выбрать так, чтобы обеспечить требуемое расположение отрезков полюсов, $A_i(p)$, i=1,2,…,r, $B(p)$ – полиномы с интервальными коэффициентами.

Следуя методике [7], параметры регулятора k_1,k_2,…k_r, являющиеся коэффициентами полиномов $C(p)$ и $D(p)$, разобьем на две группы. В первую включим один или два параметра, которые назовем свободными. С их помощью будем обеспечивать размещение отрезков свободных полюсов в желаемой области, используя метод A-разбиения [21]. При помощи метода A-разбиения на основе получаемой границы желаемой области отрезков свободных полюсов формируется параметрическая область, внутри которой выбираются значения свободных параметров регулятора.

Поскольку отрезок доминирующего полюса имеет две границы, во вторую группу параметров МРР включим два параметра и назовем их зависимыми. Их значения будут рассчитываться после выбора свободных параметров регулятора из условия, чтобы границы отрезка доминирующего полюса системы приняли предписанные значения.

Таким образом, вектор $\bar{g} = (k_1,..., k_r)^T$ параметров МРР оказывается разбитым на два вектора: вектор $\bar{g}_1 = (k_1,..., k_c)^T$ свободных параметров размерностью c=1 или c=2 и вектор $\bar{g}_2 = (k_{c+1}, k_{c+2})^T$ зависимых параметров размерностью два. То есть r=c+2. С учетом сказанного характеристическое уравнение (1) системы преобразуем к виду

$$\sum_{i=1}^{c} k_i \cdot A_i(p) + \sum_{i=c+1}^{c+2} k_i \cdot A_i(p) + B(p) = 0. \qquad (2)$$

Окончательно задачу данной работы сформулируем следующим образом. Задано уравнение системы вида (2), имеющее степень n. Необходимо найти значения C свободных и двух зависимых параметров МРР, при которых заданные границы доминирующего полюса системы принимают предписанные значения λ_j, j=1,2, а свободные полюса лежат слева от заданной на вещественной отрицательной полуоси точки.

Правило определения прообразов границ отрезков вещественных полюсов

Параметрический многогранник P_a характеристического полинома системы – это гиперпараллелепипед с вершинами, координатами которых являются предельные значения интервальных коэффициентов. Для определения тех из них, которые отображаются на границы доминирующего отрезка, получено следующее правило.

Правило. Вершины многогранника интервальных коэффициентов, являющиеся прообразами границ отрезков вещественных полюсов, имеют чередующиеся координаты, причем у правых границ нечетных отрезков, считая от мнимой оси, координаты чередуются, начиная с минимального значения коэффициента $\underline{a}_0$, а у правых границ четных отрезков – начиная с $\overline{a}_0$. Левые границы всех отрезков имеют координаты, противоположные координатам для правых границ.

Доказательство этого правила основано на уравнениях углов выхода ветвей корневых годографов из действительных полюсов, полученных из основного уравнения фаз, а также свойстве ветвей корневых годографов находиться в тех частях действительной оси, справа от которых расположено нечетное общее число действительных нулей и полюсов разомкнутой системы [22].

Выражение зависимых параметров МРР через свободные параметры

Пусть ММР имеет один свободный и два зависимых параметра. Представим характеристическое уравнение системы с таким регулятором в виде

$$k_1 \cdot A_1(s) + \sum_{i=2}^{3} k_i \cdot A_i(s) + B(s) = 0, \qquad (3)$$

где k_1 – свободный параметр, k_2, k_3 – зависимые параметры. На основе сформулированного выше правила на правую границу λ_1 доминирующего отрезка системы отображается вершина $V_1 = (\underline{a_0}, \overline{a_1}, \underline{a_2}, \overline{a_3}, \ldots)$, а на левую границу λ_2 – вершина $V_2 = (\overline{a_0}, \underline{a_1}, \overline{a_2}, \underline{a_3}, \ldots)$. Сделаем в уравнении (3) подстановку $s=\lambda_j$, j=1,2 и соответствующих λ_j координат вершин V_q, q=1,2, многогранника P_a. В результате получим два уравнения:

$$k_1 \cdot A_1^{V_1}(\lambda_1) + \sum_{i=2}^{3} k_i \cdot A_i^{V_1}(\lambda_1) + B^{V_1}(\lambda_1) = 0, \qquad (4)$$

$$k_1 \cdot A_1^{V_2}(\lambda_2) + \sum_{i=2}^{3} k_i \cdot A_i^{V_2}(\lambda_2) + B^{V_2}(\lambda_2) = 0. \qquad (5)$$

Уравнения (4) и (5) связывают параметры k_i, i=1,2,3 регулятора с заданными границами доминирующего отрезка λ_j, j=1,2 в соответствующих вершинах V_q, q=1,2 многогранника P_a. Представим уравнения (4) и (5) в матричной форме

$$\mathbf{Q}_{11}(\boldsymbol{\lambda}) \cdot k_1 + \mathbf{Q}_{12}(\boldsymbol{\lambda}) \cdot \overline{\mathbf{g}}_2 = \mathbf{R}_1(\boldsymbol{\lambda}), \qquad (6)$$

где

$$\mathbf{Q}_{11}(\boldsymbol{\lambda}) = \begin{bmatrix} A_1^{V_1}(\lambda_1) \\ A_1^{V_2}(\lambda_2) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Q}_{12}(\boldsymbol{\lambda}) = \begin{bmatrix} A_2^{V_1}(\lambda_1) & A_3^{V_1}(\lambda_1) \\ A_2^{V_2}(\lambda_2) & A_3^{V_2}(\lambda_2) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{g}_2 = \begin{bmatrix} k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_1(\boldsymbol{\lambda}) = \begin{bmatrix} -B^{V_1}(\lambda_1) \\ -B^{V_2}(\lambda_2) \end{bmatrix}.$$

Из (6) выразим вектор зависимых параметров k_2, k_3 регулятора через свободный параметр k_1

$$\mathbf{g}_2 = \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\boldsymbol{\lambda}) \cdot \mathbf{R}_1(\boldsymbol{\lambda}) - \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\boldsymbol{\lambda}) \cdot \mathbf{Q}_{11}(\boldsymbol{\lambda}) \cdot k_1. \qquad (7)$$

При синтезе регулятора может случиться так, что одним свободным параметром МРР не удается отодвинуть свободные полюса от доминирующего отрезка за заданную границу. Для решения этой проблемы следует добавить в МРР второй свободный параметр. Выразим у такого регулятора два зависимых параметра через два свободных. Для этого представим характеристическое уравнение системы в виде

$$\sum_{i=1}^{2} k_i \cdot A_i(s) + \sum_{i=3}^{4} k_i \cdot A_i(s) + B(s) = 0. \qquad (8)$$

Подставим в (8) значения границ доминирующего отрезка и координат соответствующих вершин P_a

$$\sum_{i=1}^{2} k_i \cdot A_i^{V_1}(\lambda_1) + \sum_{i=3}^{4} k_i \cdot A_i^{V_1}(\lambda_1) + B^{V_1}(\lambda_1) = 0, \qquad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{2} k_i \cdot A_i^{V_2}(\lambda_2) + \sum_{i=3}^{4} k_i \cdot A_i^{V_2}(\lambda_2) + B^{V_2}(\lambda_2) = 0. \qquad (10)$$

Запишем уравнения (9) и (10) в матричном виде:

$$\mathbf{Q}_{11}(\boldsymbol{\lambda}) \cdot \mathbf{g}_1 + \mathbf{Q}_{12}(\boldsymbol{\lambda}) \cdot \mathbf{g}_2 = \mathbf{R}_1(\boldsymbol{\lambda}). \qquad (11)$$

где

$$\mathbf{g}_1 = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \end{bmatrix}^T; \quad \mathbf{g}_2 = \begin{bmatrix} k_3 & k_4 \end{bmatrix}^T;$$

$$\mathbf{R}_1(\boldsymbol{\lambda}) = \begin{bmatrix} -B^{V_1}(\lambda_1) \\ \cdots \\ -B^{V_2}(\lambda_2) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_{11}(\boldsymbol{\lambda}) = \begin{bmatrix} A_1^{V_1}(\lambda_1) & A_2^{V_1}(\lambda_1) \\ A_1^{V_2}(\lambda_2) & A_1^{V_2}(\lambda_2) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_{12}(\boldsymbol{\lambda}) = \begin{bmatrix} A_3^{V_1}(\lambda_1) & A_4^{V_1}(\lambda_1) \\ A_3^{V_2}(\lambda_2) & A_4^{V_2}(\lambda_2) \end{bmatrix}.$$

Из (11) выразим вектор $\mathbf{g}_2=[k_3\ k_4]^T$ через вектор $\mathbf{g}_1=[k_1\ k_2]^T$

$$\mathbf{g}_2 = \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\boldsymbol{\lambda}) \cdot \mathbf{R}_1(\boldsymbol{\lambda}) - \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\boldsymbol{\lambda}) \cdot \mathbf{Q}_{11}(\boldsymbol{\lambda}) \cdot g_1. \qquad (12)$$

Определение области свободных параметров МРР на основе А-разбиения

Обеспечить одним свободным параметром МРР расположение отрезков всех свободных полюсов левее желаемой точки на отрицательной вещественной полуоси, как правило, затруднительно. В этом случае следует добавить в регулятор второй свободный параметр. Поиск двух свободных параметров МРР будем проводить на основе робастного А-разбиения. Согласно приведенному выше правилу проверочной вершиной для этого является правая вершина второго отрезка с координатами $V_1 = (\overline{a_0}, \underline{a_1}, \overline{a_2}, \underline{a_3}, \overline{a_4})$, отображающаяся на границу области расположения свободных отрезков.

Для построения области А-разбиения по двум параметрам сформируем на основе характеристического полинома $D(s,k)$ систему двух уравнений

$$D(s,k)=0,\qquad \frac{dD(s,k)}{ds}=0. \tag{13}$$

Пусть

$$\frac{dD(s,k)}{ds}=\sum_{i=1}^{2}k_i\cdot C_i^{V_1}(s)+\sum_{i=3}^{4}k_i\cdot C_i^{V_1}(s)+F^{V_1}(s).$$

Тогда система (13) будет иметь вид

$$\sum_{i=1}^{2}k_i\cdot A_i^{V_1}(s)+\sum_{i=3}^{4}k_i\cdot A_i^{V_1}(s)+B^{V_1}(s)=0,$$
$$\sum_{i=1}^{2}k_i\cdot C_i^{V_1}(s)+\sum_{i=3}^{4}k_i\cdot C_i^{V_1}(s)+F^{V_1}(s)=0. \tag{14}$$

В качестве границы А-разбиения зададим выражение $s(\alpha)=-h-\alpha$, $0\le\alpha<\infty$, где $s=-h$ является точкой на вещественной оси, ограничивающей справа расположение свободных отрезков. С учетом того, что $\mathbf{g}_1=[k_1\ \ k_2]^T$ и $\mathbf{g}_2=[k_3\ \ k_4]^T$, запишем систему (14) в матричной форме

$$\mathbf{Q}_{21}(\alpha)\cdot\mathbf{g}_1+\mathbf{Q}_{22}(\alpha)\mathbf{g}_2=\mathbf{R}_2(\alpha), \tag{15}$$

где

$$\mathbf{Q}_{21}(\alpha)=\begin{bmatrix}A_1^{V_1}(\alpha) & A_2^{V_1}(\alpha)\\ C_1^{V_1}(\alpha) & C_2^{V_1}(\alpha)\end{bmatrix};$$
$$\mathbf{Q}_{22}(\alpha)=\begin{bmatrix}A_3^{V_1}(\alpha) & A_4^{V_1}(\alpha)\\ C_3^{V_1}(\alpha) & C_4^{V_1}(\alpha)\end{bmatrix};$$
$$\mathbf{R}_2(\alpha)=\begin{bmatrix}-B^{V_1}(\alpha)\\ -F^{V_1}(\alpha)\end{bmatrix}.$$

Далее из уравнений (11) и (15) составим систему

$$\mathbf{Q}_{11}(\boldsymbol{\lambda})\,\mathbf{g}_1+\mathbf{Q}_{12}(\boldsymbol{\lambda})\,\mathbf{g}_2=\mathbf{R}_1(\boldsymbol{\lambda});$$
$$\mathbf{Q}_{21}(\alpha)\,\mathbf{g}_1+\mathbf{Q}_{22}(\alpha)\,\mathbf{g}_2=\mathbf{R}_2(\alpha). \tag{16}$$

Из первого уравнения системы (16) выразим вектор $\mathbf{g}_2$ зависимых параметров

$$\mathbf{g}_2=\mathbf{Q}_{12}^{-1}(\boldsymbol{\lambda})\cdot\mathbf{R}_1(\boldsymbol{\lambda})-\mathbf{Q}_{12}^{-1}(\boldsymbol{\lambda})\cdot\mathbf{Q}_{11}(\boldsymbol{\lambda})\cdot\mathbf{g}_1. \tag{17}$$

Уравнение границы D-разбиения найдем из второго уравнения системы (16) с учетом (17)

$$\mathbf{g}_1=\begin{bmatrix}k_1(\alpha)\\ k_2(\alpha)\end{bmatrix}=$$
$$=\left[\mathbf{Q}_{21}(\alpha)-\mathbf{Q}_{22}(\alpha)\cdot\mathbf{Q}_{12}^{-1}(\boldsymbol{\lambda})\cdot\mathbf{Q}_{11}(\boldsymbol{\lambda})\right]^{-1}\times$$
$$\times\left[\mathbf{R}_2(\alpha)-\mathbf{Q}_{22}(\alpha)\cdot\mathbf{Q}_{12}^{-1}(\boldsymbol{\lambda})\cdot\mathbf{R}_1(\boldsymbol{\lambda})\right]. \tag{18}$$

Для построения кривой А-разбиения в плоскости свободных параметров МРР необходимо в (17) задавать значения $0\le\alpha<\infty$ и находить для каждого из них значения k_1 и k_2.

Методика параметрического синтеза МРР

На основе проведенных исследований для систем с интервальными параметрами разработана методика параметрического синтеза МРР, обеспечивающих в системе монотонные переходные процессы. Методика содержит следующие этапы.

1. Разделение параметров МРР на зависимые и свободные.
2. Задание значений λ_i, i=1,2 границ отрезка доминирующего полюса системы и уравнения $s(\alpha)=-\sigma-\alpha$ границы желаемой области локализации отрезков свободных полюсов.
3. Представление интервального характеристического полинома системы в виде (3) или (8), соответствующем заданному числу свободных параметров МРР.
4. Формирование необходимых для синтеза регулятора матриц $\mathbf{Q}_{11}(\lambda)$,$\mathbf{Q}_{12}(\lambda)$ и вектора $\mathbf{R}_1(\lambda)$.
5. Формирование необходимых для А-разбиения матриц $\mathbf{Q}_{21}(\alpha)$,$\mathbf{Q}_{22}(\alpha)$, и вектора $\mathbf{R}_2(\alpha)$.
6. Построение на основании выражения (18) области А-разбиения.
7. Выбор значений свободных параметров МРР из полученных в п. 6 области.
8. Расчет двух зависимых параметров МРР на основе выражений (7) при одном свободном параметре или (12) при двух свободных параметрах.
9. Проверка полученных результатов построением многопараметрического интервального корневого годографа системы с синтезированным регулятором.

Заключение

В результате проведенных исследований для САУ с интервальными параметрами разработана методика параметрического синтеза МРР пониженного порядка. Он обеспечивает локализацию всех полюсов САУ в вещественных отрезках и их расположение, соответствующее монотонному переход процессу системы.

Исследования показали, что для этого МРР должен содержать два зависимых параметра, задающих границы доминирующего отрезка, и один или два свободных параметра, гарантирующих выполнение принципа доминирующих полюсов.

Если в качестве МРР использовать типовые линейные ПИ- и ПИД-регуляторы, количество разделяемых на группы настраиваемых параметров МРР будет равно, соответственно, двум и трем. В этом случае при параметрическом синтезе МРР по разработанной выше методике может возникнуть проблема, вызванная нехваткой параметров регулятора для желаемого расположения отрезков полюсов САУ. Решить эту проблему можно, оставив незакрепленной левую границу доминирующего отрезка САУ. Такое решение позволит уменьшить число зависимых параметров МРР до одного. Для этого в процедуре параметрического синтеза регулятора необходимо в выражениях (6) и (11) вектор $\mathbf{g}_2$ зависимых параметров заменить на скаляр.

Анализируя полученные результаты, следует также отметить, что в случае затруднений при получении желаемого размещения отрезков полюсов САУ есть возможность перераспределить параметры МРР между группами свободных и зависимых параметров и повторить процедуру параметрического синтеза регулятора.

Используемый в работе при синтезе МРР переход от интервальных параметров нестационарного объекта управления к интервальным коэффициентам характеристического полинома САУ приводит к консерватизму получаемого решения. Объясняется это тем фактом, что для желаемого размещения отрезков полюсов САУ допускается независимое изменение коэффициентов полинома при изменении входящих в эти коэффициенты параметров объекта. Для повышения точности параметрического синтеза МРР следует использовать характеристический полином САУ с аффинной интервальной неопределенностью его коэффициентов. При этом необходимо рассматривать реальную область параметрических возмущений, являющуюся многогранником интервальных параметров объекта управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фокин А.Л. Синтез робастных систем управления технологическими процессами с типовыми регуляторами // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2014. – № 27 (53). – С. 101–106.
2. Рыбин И.А., Рубанов В.Г. Синтез робастного регулятора для мобильного робота с интервальными параметрами и временным запаздыванием // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 10 (129). – С. 40–52. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-40-52
3. Опейко О.Ф. Управление по выходу с пропорционально-дифференцирующим адаптивным регулятором // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 3. – С. 35–39.
4. 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. 77–82.
5. Римский Г.В. Корневой метод решения задач устойчивости интервальных систем // Вести АН Белоруси. Сер. физ.-техн. наук. – 1994. – № 4. – С. 80–85.
6. Куликов В.Е. Решение обратной задачи модального управления при синтезе регулятора минимальной размерности для режима стабилизации вертикальной скорости полета самолета // Навигация и управление летательными аппаратами. – 2022. – № 38. – С. 39–59.
7. Вадутов О.С., Гайворонский С.А. Решение задачи размещения полюсов системы методом D-разбиения // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2004. – № 5. – С. 23–27.
8. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Частотные критерии робастной устойчивости и апериодичности линейных систем // Автоматика и телемеханика. – 1990. – № 9. – С. 45–54.
9. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
10. Анализ и синтез линейных интервальных динамических систем (состояние проблемы). Анализ с использованием интервальных характеристических полиномов / Ю.М. Гусев, В.Н. Ефанов, В.Г. Крымский, В.Ю. Рутковский // Известия АН СССР Техническая кибернетика. – 1991. – № 1. – С. 3–23.
11. Жабко А.П., Харитонов В.Л. Необходимые и достаточные условия устойчивости линейного семейства полиномов // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 10. – С. 125–134.
12. Parametrical synthesis of linear controllers in aperiodical systems on basis of decomposition approach / S.A. Gayvoronskiy, I. Khozhaev, M. Pushkarev, T. Ezangina // International Review of Automatic Control. – 2019. – Vol. 12. – № 4. – P. 192–199.
13. Гайворонский С.А., Суходоев М.С. Определение настроек линейных робастных регуляторов, обеспечивающих апериодические переходные процессы в интервальных системах // Известия Томского политехнического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2010. – Т. 316. – № 5. – С. 12–15.
14. Nikou A., Verginis C.K., Heshmati-Alamdari S. An aperiodic prescribed performance control scheme for uncertain nonlinear systems // 30th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). – Vouliagmeni, Greece, 2022. – P. 221–226. DOI: 10.1109/MED54222.2022.9837225
15. Gayvoronskiy S. A., Ezangina T., Khozhaev I. Providing a robust aperiodic transient process in motion control system unmanned underwater vehicle with interval parameters // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Т. 51. – № 29. – С. 220–225.
16. Соболь А.В., Гайворонский С.А. Синтез модального робастного регулятора, обеспечивающего монотонный переходный процесс в системе с интервальными параметрами // Молодежь и современные информационные технологии: сборник

трудов XXI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 15–18 апреля 2024. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2024. – С. 787–791.
17. Скворцов Л.М. Интерполяционный метод решения задачи назначения доминирующих полюсов при синтезе одномерных регуляторов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1996. – № 4. – С. 10–13.
18. Петров Н.П., Поляк Б.Т. Робастное D-разбиение // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 11. – С. 41–53.
19. Корневые методы исследования интервальных систем / под ред. Г.В. Римского. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 186 с.
20. Ezangina T., Gayvoronskiy S.A., Khozhaev I. Providing an aperiodicity of transient process in a interval control system on a base of pole domination principle // ACM International Conference Proceeding Series. – Beijing, 26–28 December 2018. – P. 122–126.
21. Грязина Е.Н., Поляк Б.Т., Тремба А.А. Современное состояние метода D-разбиения // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 12. – С. 3–40.
22. Удерман Э.Г. Метод корневого годографа в теории автоматических систем. – М.: Наука, 1972. – 448 с.

Информация об авторах

Гайворонский Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, отделение автоматизации и робототехники, Инженерная школа информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. saga@tpu.ru https://orcid.org/0000-0002-7156-2807

Поступила: 20.07.2024
Принята: 29.08.2024
Опубликована: 30.09.2024

REFERENCES

1. Fokin A.L. The synthesis of robust control systems of technological processes with standard regulators. *Bulletin of the Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2014, no. 27 (53), pp. 101–106. (In Russ.)
2. Rybin I.A., Rubanov V.G. Synthesis of a robust controller for a mobile robot with interval parameters and time delay. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 10, pp. 40–52. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-40-52
3. Opeiko O.F. Output control with adaptive-proportional differential controller. *Systems Analysis and Applied Computer Science*, 2016, no. 3, pp. 35–39. (In Russ.)
4. Tsavnin A.V., Efimov S.V., Zamyatin S.V. Root approach to the synthesis of PID controller parameters, guaranteeing the absence of overshoot in the transient response of the control system. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 77–82. (In Russ.)
5. Rimsky G.V. Root method for solving problems of stability of interval systems. *News of the Academy of Sciences of Belarus. Ser. Phys.-Techn. Sci*., 1994, no. 4, pp. 80–85. (In Russ.)
6. Kulikov V.E. Inverse problem of modal control solution using reduced-dimension controller synthesis for aircraft vertical speed hold. *Navigation and control of aircraft*, 2022, no. 38, pp. 39–59. (In Russ.)
7. Vadutov O.S., Gaivoronskii S.A. Solving the problem of allocation of poles of a system by the d-partition method. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2004, vol. 43, no. 5, pp. 681–685.
8. Polyak B.T., Tsypkin Ya.Z. Frequency criteria for robust stability and aperiodicity of linear systems. *Automation and Telemechanics*, 1990, no. 9, pp. 45–54. (In Russ.)
9. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. *Robust stability and control*. Moscow, Nauka Publ., 2002. 303 p. (In Russ.)
10. Gusev Yu.M., Efanov V.N., Krymsky V.G., Rutkovsky V.Yu. Analysis and synthesis of linear interval dynamic systems (state of the problem). Analysis using interval characteristic polynomials. Bulletin of the USSR Academy of Sciences Technical Cybernetics, 1991, no. 1, pp. 3–23. (In Russ.)
11. Zhabko A.P., Kharitonov V.L. Necessary and sufficient conditions for the stability of a linear family of polynomials. *Automation and Telemechanics*, 1994, no. 10, pp. 125–134. (In Russ.)
12. Gayvoronskiy S.A., Khozhaev I., Pushkarev M., Ezangina T. Parametrical synthesis of linear controllers in aperiodical systems on basis of decomposition approach. International Review of Automatic Control, 2019, vol. 12, no. 4, pp. 192–199.
13. Gaivoronsky S.A., Sukhodoev M.S. Determination of settings of linear robust controllers providing aperiodic transient processes in interval systems. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Series: Control, computing engineering and informatics, 2010, vol. 316, no. 5, pp. 12–15. (In Russ.)
14. Nikou A., Verginis C.K., Heshmati-Alamdari S. An aperiodic prescribed performance control scheme for uncertain nonlinear systems. *30th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED).* Vouliagmeni, Greece, 2022. pp. 221–226. DOI: 10.1109/MED54222.2022.9837225
15. Gayvoronskiy S.A., Ezangina T., Khozhaev I. Providing a robust aperiodic transient process in motion control system unmanned underwater vehicle with interval parameters. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 29, pp. 220–225.
16. Sobol A.V., Gaivoronsky S.A. Synthesis of a modal robust controller providing a monotonic transient process in a system with interval parameters. *Youth and modern information technologies. Collection of works of the XXI International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists.* Tomsk, April 15–18, 2024. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2024. pp. 787–791. (In Russ.)
17. Skvortsov L.M. Interpolation method for solving the problem of assigning dominant poles in the synthesis of one-dimensional controllers. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems, 1996, no. 4, pp. 10–13. (In Russ.)

18. Petrov N.P., Polyak B.T. Robust D-partition. *Automation and telemechanics*, 1991, no. 11, pp. 41–53. (In Russ.)
19. Root methods for studying interval systems. Ed. by G.V. Rimsky. Minsk, Institute of Technical Cybernetics of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 1999. 186 p. (In Russ.)
20. Ezangina T., Gayvoronskiy S.A., Khozhaev I. Providing an aperiodicity of transient process in a interval control system on a base of pole domination principle. ACM International Conference Proceeding Series. Beijing, December 26–28, 2018. pp. 122–126.
21. Gryazina E.N., Polyak B.T., Tremba A.A. Current state of the D-partition method. *Automation and Telemechanic*, 2008, no. 12, pp. 3–40. (In Russ.)
22. Uderman E.G. *The root hodograph method in the theory of automatic systems*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 448 p. (In Russ.)

Information about the authors

Sergey A. Gaivoronsky, Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation saga@tpu.ru https://orcid.org/0000-0002-7156-2807

Received: 20.07.2024
Revised: 29.08.2024
Accepted: 30.09.2024