

Многокритериальный синтез законов траекторной адаптации параметров трехканальной системы стабилизации беспилотного летательного аппарата

**Е.М. Воронов¹, В.А. Серов², М.А. Клишин²,
К.К. Любавский¹, А.М. Савчук^{1,3}**

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: emvoronov@mail.ru

² Московский технологический университет (МИРЭА),
Москва, Российская Федерация
e-mail: ser_off@inbox.ru

³ АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»,
Московская обл., Королев, Российская Федерация
e-mail: lechiy_81@list.ru

Разработана формализованная методика формирования рабочей области варьируемых параметров системы стабилизации беспилотного летательного аппарата на основе комплекса генетических алгоритмов многокритериальной оптимизации. Такую методику применяют для решения задачи синтеза законов траекторной адаптации параметров системы стабилизации. Представлены результаты тестирования, подтверждающие эффективность разработанных вычислительных процедур.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, система стабилизации, показатели эффективности, беспилотный летательный аппарат, генетический алгоритм, тестирование.

Multicriteria Synthesis of Trajectory Adaptation Rules for the Three Channel Stabilization System Parameters of Unmanned Aircraft

**E.M. Voronov¹, V.A. Serov², M.A. Klishin²,
K.K. Lyubavskiy¹, A.M. Savchuk^{1,3}**

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: emvoronov@mail.ru

² Moscow Technological University (MIREA), Moscow, Russian Federation
e-mail: ser_off@inbox.ru

³ Tactical Missiles Corporation, Korolev, Moscow Region, Russian Federation
e-mail: lechiy_81@list.ru

The purpose of this research was to develop a formalized procedure for forming the work space of the adjustable parameters of unmanned aircraft stabilization system on the basis of multicriteria optimization genetic algorithms set. This approach is applied to solve the problem of trajectory adaptation rules synthesis for the three channel stabilization system parameters. The findings of the research illustrate the efficiency of the developed computational procedures.

Keywords: multicriteria optimization, stabilization system, efficiency indices, unmanned aircraft, genetic algorithm, testing.

Формирование рабочих областей варьируемых параметров является одной из ключевых задач, решаемых при исследовании и разработке систем управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА). При формализации постановки этой задачи целесообразно ее рассматривать в контексте более общей проблемы обеспечения робастного качества, гарантирующего заданный уровень эффективности функционирования системы управления в условиях параметрической неопределенности на всем диапазоне условий ее эксплуатации. Подробные обзоры результатов по робастности, из которых следует, что конструктивное построение требуемых рабочих областей возможно лишь в частных случаях, приведены в работах [1, 2]. Методики, основанные на формализации исходной постановки в виде линейной оптимизационной задачи, где целевая функция характеризует запас работоспособности системы, и на построении вычислительных оптимизационных процедур, реализованных на симплексном методе, предложены в работах [3–6]. Оптимальное решение указанной задачи характеризует точку, соответствующую максимальной степени работоспособности системы и расположенную внутри симплекса ограничений на параметры.

Особенность рассматриваемой в настоящей работе задачи формирования рабочей области варьируемых параметров для трехканальной нелинейной системы стабилизации (ССт) БЛА заключается в том, что она формализуется в виде системы нелинейных функциональных неравенств. Согласно предварительным исследованиям, область, в которой обеспечивается заданный уровень робастного качества, представляет собой невыпуклое многосвязное множество. Это обстоятельство делает невозможным применение известных оптимизационных подходов и обуславливает необходимость разработки новых вычислительных технологий.

В статье рассмотрена формализованная методика решения задачи формирования рабочей области варьируемых параметров трехканальной ССт БЛА в виде системы интервальных ограничений-неравенств. Исходная задача сформулирована в виде задачи многокритериальной оптимизации, в которой в качестве целевых функций использованы показатели степени технической устойчивости в каналах ССт как наиболее чувствительные к изменениям варьируемых параметров [7].

Для решения поставленной задачи разработана вычислительная процедура, в основе которой лежит комплекс генетических алгоритмов многокритериальной оптимизации [8]. Эффективность разработанных вычислительных процедур подтверждена на тестовых задачах.

Модель трехканальной системы стабилизации. Структурная схема ССт БЛА построена в среде Simulink (рис. 1). Модель ССт включает в себя продольный и боковой каналы, канал крена.

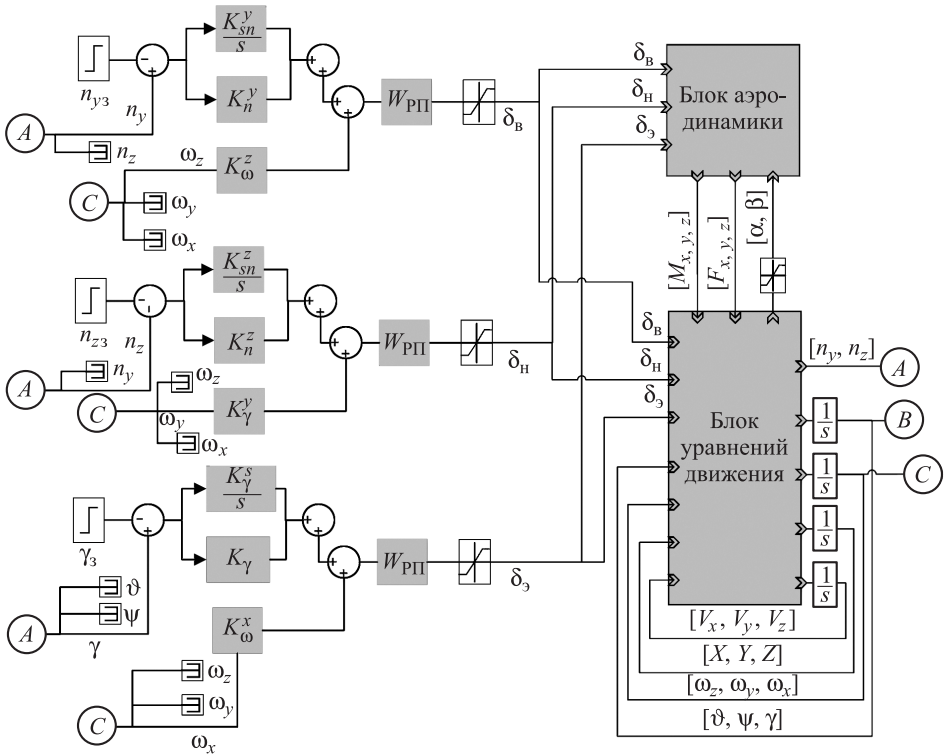


Рис. 1. Структурная схема ССт БЛА:

$W_{\text{ПП}}$ — передаточная функция рулевого привода (ПП); $\delta_B, \delta_H, \delta_3$ — углы отклонения рулей высоты, рулей направления и элеронов; $\mathbf{V} = [V_x, V_y, V_z]^T$ — вектор скорости в связанной системе координат; $\mathbf{n} = [n_y, n_z]^T$ — вектор перегрузок в продольном и боковом каналах БЛА; $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ — вектор угловых скоростей БЛА; ϑ, ψ, γ — углы тангажа, рыскания, крена; n_{y3}, n_{z3}, γ_3 — заданные значения перегрузок и угла крена

Сигналами управления для продольного и бокового каналов являются перегрузка продольного и бокового каналов соответственно. Сигнал управления для канала крена — угол крена.

В каждом канале ССт замыкается двумя обратными связями. Продольный и боковой каналы замыкаются по перегрузке и угловой скорости, канал крена — по углу крена и угловой скорости. Между каналами действуют перекрестные связи, формируемые блоком уравнений движения.

Каналы стабилизации формируют сигналы на отклонение рулей. Выходными сигналами рулевых приводов являются отклонение руля высоты, руля направления и элеронов. Сигналы отклонения рулей необходимы для расчета аэродинамики летательного аппарата.

Блок уравнений движения осуществляет интегрирование системы уравнений движения БЛА, которая имеет следующий вид.

1. Уравнения динамики

$$\begin{aligned}\dot{V}_x &= g(n_x - \sin \vartheta) - (V_z \omega_y - V_y \omega_z); \\ \dot{V}_y &= g(n_y - \cos \gamma \cos \vartheta) - (V_x \omega_z - V_z \omega_x); \\ \dot{V}_z &= g(n_z + \cos \vartheta \sin \gamma) - (V_y \omega_x - V_x \omega_y); \\ \dot{\omega}_x &= \frac{M_x - (J_z - J_y) \omega_z \omega_y}{J_x}; \\ \dot{\omega}_y &= \frac{M_y - (J_x - J_z) \omega_x \omega_z}{J_y}; \\ \dot{\omega}_z &= \frac{M_z - (J_y - J_x) \omega_y \omega_x}{J_z}.\end{aligned}$$

2. Уравнения кинематики

$$\begin{aligned}\dot{\vartheta} &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma; \\ \dot{\psi} &= \frac{\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma}{\cos \vartheta}; \\ \dot{\gamma} &= \omega_x - \frac{\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma}{\cos \vartheta} \sin \vartheta; \\ \dot{X} &= \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \cos \Theta \cos \Psi; \\ \dot{Y} &= \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \sin \Theta; \\ \dot{Z} &= -\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \cos \Theta \sin \Psi.\end{aligned}$$

3. Геометрические соотношения

$$\begin{aligned}\Theta &= \arcsin(\sin \vartheta \cos \alpha \cos \beta - \cos \vartheta \cos \gamma \sin \alpha \cos \beta - \cos \vartheta \sin \gamma \sin \beta); \\ \Psi &= \arcsin\left(\frac{\sin \psi \cos \vartheta \cos \alpha \cos \beta + \cos \psi \sin \gamma \sin \alpha \cos \beta}{\cos \Theta} + \right. \\ &\left. + \frac{\sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma \sin \alpha \cos \beta - \cos \psi \cos \gamma \sin \beta + \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma \sin \beta}{\cos \Theta}\right); \\ \alpha &= \operatorname{arctg} \frac{-V_y}{V_x}; \quad \beta = \operatorname{arctg} \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}}.\end{aligned}$$

4. Уравнения для расчета перегрузок

$$n_x = \frac{F_x}{mg}; \quad n_y = \frac{F_y}{mg}; \quad n_z = \frac{F_z}{mg}.$$

Показатели эффективности. Рабочая область варьируемых параметров должна обеспечивать требуемую степень технической устойчивости ССт, характеризующей работоспособность системы во всем диапазоне изменения условий ее эксплуатации [9–16]. Оценка степени технической устойчивости ССт осуществлялась по переходным процессам по перегрузкам n_y , n_z , γ в каналах тангажа, рыскания, крена с учетом интегральной квадратической ошибки переходного процесса и степени колебательности переходного процесса.

Интегральную квадратическую ошибку переходного процесса представим в виде

$$f = \int_0^{\infty} e_{\text{п}}^2(t) dt,$$

где $e_{\text{п}}(t) = e(t) - e_{\text{уст}}$ — переходная составляющая ошибки.

С учетом того, что установившееся значение перегрузок в режиме стабилизации стремится к нулю, интегральные показатели каждого канала будут иметь вид

$$f_{1\text{инт}} = \int_0^{t_{\text{п}}} n_y^2(t) dt; \quad f_{2\text{инт}} = \int_0^{t_{\text{п}}} n_z^2(t) dt; \quad f_{3\text{инт}} = \int_0^{t_{\text{п}}} \gamma^2(t) dt$$

($t_{\text{п}}$ — время окончания переходного процесса).

Возможны ситуации, когда при малом значении интегральной квадратической ошибки имеет место значительная колебательность по перегрузкам n_y , n_z , γ . Формально, такой переходной процесс будет характеризовать устойчивую, но с позиции практики непригодную и труднореализуемую систему. В связи с этим целесообразно использовать дополнительный показатель степени устойчивости, имеющий «смысл» числа колебаний переходной характеристики за время переходного процесса.

Степень колебательности переходного процесса каждого канала имеет вид

$$f_{1\text{колеб}} = N_{\vartheta}, \quad f_{2\text{колеб}} = N_{\psi}, \quad f_{3\text{колеб}} = N_{\gamma},$$

где

$$\begin{aligned} \{\tau_1 \quad \dots \quad \tau_{N_{\vartheta}}\} &= \{\tau_n\}_{n=1}^{n=N_{\vartheta}}; \\ \{\tau_1 \quad \dots \quad \tau_{N_{\psi}}\} &= \{\tau_n\}_{n=1}^{n=N_{\psi}}; \\ \{\tau_1 \quad \dots \quad \tau_{N_{\gamma}}\} &= \{\tau_n\}_{n=1}^{n=N_{\gamma}} \end{aligned}$$

— последовательности моментов времени, для которых справедливо

$$\left. \frac{dn_y(t)}{dt} \right|_{t=\tau_i} = 0; \quad \left. \frac{dn_z(t)}{dt} \right|_{t=\tau_i} = 0; \quad \left. \frac{d\gamma(t)}{dt} \right|_{t=\tau_i} = 0.$$

Для формулировки задачи определения рабочей области варьируемых параметров в соответствии с выбранной формой векторного показателя степени технической устойчивости осуществляется экспертное задание констант

$$\mathbf{C}_{\text{инт}} = [c_{1\text{инт}}, c_{2\text{инт}}, c_{3\text{инт}}]^T; \quad \mathbf{C}_{\text{колеб}} = [c_{1\text{колеб}}, c_{2\text{колеб}}, c_{3\text{колеб}}]^T$$

для каждого показателя

$$\mathbf{F}_{\text{инт}} = [f_{1\text{инт}}, f_{2\text{инт}}, f_{3\text{инт}}]^T; \quad \mathbf{F}_{\text{колеб}} = [f_{1\text{колеб}}, f_{2\text{колеб}}, f_{3\text{колеб}}]^T,$$

определяющих допустимые уровни значений в соответствующем критериальном пространстве, превышение которых означает потерю устойчивости ССт.

Постановка задачи. Заданы два векторных показателя эффективности

$$\mathbf{F}_{\text{инт}}(\mathbf{q}) = [f_{1\text{инт}}, f_{2\text{инт}}, f_{3\text{инт}}]^T; \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_{\text{колеб}}(\mathbf{q}) = [f_{1\text{колеб}}, f_{2\text{колеб}}, f_{3\text{колеб}}]^T,$$

где $\mathbf{q} \in \mathbf{E}^r$ — вектор варьируемых параметров ССт.

Требуется определить рабочую область варьируемых параметров \mathbf{Q} в виде системы линейных интервальных ограничений-неравенств

$$\mathbf{Q} = \{ \mathbf{q} \in \mathbf{E}^r \mid \mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max} \}. \quad (2)$$

Область имеет максимально возможный объем и удовлетворяет требованиям

$$\forall \mathbf{q} \in \mathbf{Q}: \begin{cases} \mathbf{F}_{\text{инт}}(\mathbf{q}) \leq \mathbf{C}_{\text{инт}}; \\ \mathbf{F}_{\text{колеб}}(\mathbf{q}) \leq \mathbf{C}_{\text{колеб}}. \end{cases} \quad (3)$$

Преобразуем компоненты показателей (1) к безразмерному виду по правилу

$$\hat{f}_{i\text{инт}}(\mathbf{q}) = \begin{cases} 0, & \text{если } f_{i\text{инт}}(\mathbf{q}) \leq c_{i\text{инт}}; \\ \mu_{i\text{инт}} \frac{f_{i\text{инт}}(\mathbf{q}) - c_{i\text{инт}}}{c_{i\text{инт}}}, & \text{если } f_{i\text{инт}}(\mathbf{q}) > c_{i\text{инт}}; \end{cases} \quad (4)$$

$$\hat{f}_{i\text{колеб}}(\mathbf{q}) = \begin{cases} 0, & \text{если } f_{i\text{колеб}}(\mathbf{q}) \leq c_{i\text{колеб}}; \\ \mu_{i\text{колеб}} \frac{f_{i\text{колеб}}(\mathbf{q}) - c_{i\text{колеб}}}{c_{i\text{колеб}}}, & \text{если } f_{i\text{колеб}}(\mathbf{q}) > c_{i\text{колеб}}, \end{cases} \quad (5)$$

$$i = \overline{1, 3},$$

где $\mu_{i_{\text{инт}}}, \mu_{i_{\text{колеб}}} > 0$ — коэффициенты штрафа за нарушение соответствующих ограничений (3).

Построим векторный показатель $\mathbf{F}(\mathbf{q}) = [F_1(\mathbf{q}), F_2(\mathbf{q})]^T$, компоненты которого определим как

$$F_1(\mathbf{q}) = \max_{i=1,3} \{\hat{f}_{i_{\text{инт}}}(\mathbf{q})\}; \quad F_2(\mathbf{q}) = \max_{i=1,3} \{\hat{f}_{i_{\text{колеб}}}(\mathbf{q})\}. \quad (6)$$

Сформулируем задачу многокритериальной оптимизации:

$$\text{определить } \min_{\mathbf{q} \in E'} \mathbf{F}(\mathbf{q}). \quad (7)$$

Если решение задачи (1)–(3) существует, то с учетом (4), (5) оптимальным решением задачи (7) является множество $\hat{\mathbf{Q}}$, удовлетворяющее требованиям

$$\forall \mathbf{q} \in \hat{\mathbf{Q}} : \mathbf{F}_1(\mathbf{q}) = \mathbf{F}_2(\mathbf{q}) = 0. \quad (8)$$

Таким образом, исходная постановка задачи сведена к задаче многокритериальной оптимизации (7).

В соответствии с постановкой задачи (1)–(3) требуется определить гиперпараллелепипед $\hat{\Pi} \subset \hat{\mathbf{Q}}$, для которого выполняются требования (8).

Алгоритм построения рабочей области варьируемых параметров трехканальной системы стабилизации. Для решения задачи построения рабочей области \mathbf{Q} варьируемых параметров ССт вида (2) разработана вычислительная процедура, включающая в себя два этапа.

Этап 1. Построение множества $\hat{\mathbf{Q}}$, удовлетворяющего условиям (8). Для решения поставленной задачи применялся генетический алгоритм многокритериальной оптимизации [8]. Согласно анализу результатов моделирования, множество $\hat{\mathbf{Q}}$ является невыпуклым. Поэтому необходимо выполнить дополнительные построения для получения множества $\hat{\mathbf{Q}} \subset \mathbf{Q}$ вида (2).

Этап 2. Построение множества $\mathbf{Q} \subset \hat{\mathbf{Q}}$ вида (2). Для этого был разработан итерационный алгоритм построения гиперпараллелепипеда $\hat{\Pi} \subset \hat{\mathbf{Q}}$, удовлетворяющего условиям (2). Полагаем $\mathbf{Q} = \hat{\Pi}$.

Алгоритм построения гиперпараллелепипеда $\hat{\Pi} \subset \hat{\mathbf{Q}}$. Идея этого алгоритма заключается в построении последовательности вложенных друг в друга гиперпараллелепипедов

$$\Pi_0 \supset \Pi_1 \supset \dots \supset \Pi_n = \hat{\Pi}. \quad (9)$$

Геометрическая интерпретация алгоритма построения гиперпараллелепипеда $\hat{\Pi} \subset \hat{Q}$ (рис. 2) включает в себя следующие основные шаги.

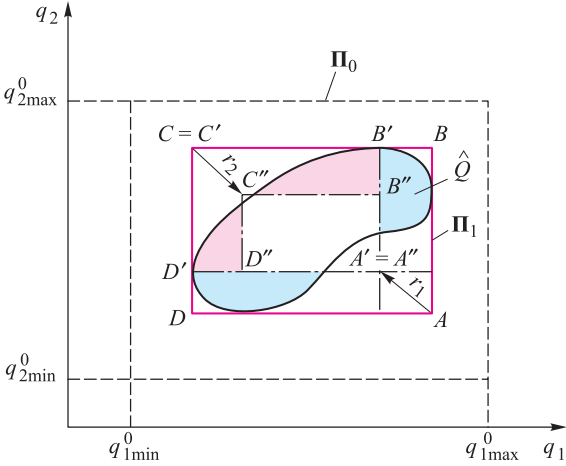


Рис. 2. Геометрическая интерпретация алгоритма построения гиперпараллелепипеда

Шаг 1. Назначить расширенные интервальные ограничения вида (2), соответствующие гиперпараллелепипеду Π_0 , для которого заведомо выполняется условие $\hat{Q} \subset \Pi_0$. Это необходимо для эффективной работы генетического алгоритма.

Шаг 2. Построить множество \hat{Q} , являющееся решением задачи (7). Принять $\hat{Q}_1 = \hat{Q}$.

Шаг 3. Построить множество Π_1 , удовлетворяющее условию $\hat{Q} \subset \Pi_1$, границы которого определяются решением в области варьируемых параметров последовательности задач:

$$\begin{aligned} &\text{определить } \min_{q \in \hat{Q}_1} q_i \Rightarrow q_{i \min}; \\ &\text{определить } \max_{q \in \hat{Q}_1} q_i \Rightarrow q_{i \max}, \quad i = \overline{1, r}. \end{aligned}$$

Гиперпараллелепипед Π_1 имеет $R = 2^r$ вершин, координаты которых вычисляются по алгоритму (табл. 1).

Шаг 4. Выбрать вершину π_k , наиболее удаленную от множества \hat{Q} , из вершин $\{\pi_j, j = \overline{0, (r-1)}\}$ гиперпараллелепипеда Π_1 на основе анализа таблицы, аналогичной табл. 1,

$$d_k = \max \{d_0, \dots, d_r\}$$

(см. рис. 2, вершина A).

Координаты вершин гиперпараллелепипеда Π_1 для $r = 3$

Номер вершины π_i	Двоичный код	Координаты вершины			Расстояние от вершины до множества \hat{Q}
		q_1	q_2	q_3	d
0	0 0 0	$q_{1\min}$	$q_{2\min}$	$q_{3\min}$	d_0
1	0 0 1	$q_{1\min}$	$q_{2\min}$	$q_{3\max}$	d_1
2	0 1 0	$q_{1\min}$	$q_{2\max}$	$q_{3\min}$	d_2
3	0 1 1	$q_{1\min}$	$q_{2\max}$	$q_{3\max}$	d_3
4	1 0 0	$q_{1\max}$	$q_{2\min}$	$q_{3\min}$	d_4
5	1 0 1	$q_{1\max}$	$q_{2\min}$	$q_{3\max}$	d_5
6	1 1 0	$q_{1\max}$	$q_{2\max}$	$q_{3\min}$	d_6
7	1 1 1	$q_{1\max}$	$q_{2\max}$	$q_{3\max}$	d_7

Шаг 5. Сместить вершину π_k на вектор \mathbf{r}_1 , координаты которого пропорциональны сторонам гиперпараллелепипеда Π_1 , а модуль равен установленной заранее константе r . Для нового гиперпараллелепипеда Π_2 (см. рис. 2, прямоугольник $A'B'C'D'$) должно выполняться включение $\Pi_2 \subset \Pi_1$.

Шаг 6. Построить множество $\hat{Q}_2 = \hat{Q}_1 \cap \Pi_2$.

Шаг 7. Выбрать вершину π_k , наиболее удаленную от множества \hat{Q}_2 , из вершин $\{\pi_j, j = 0, (r-1)\}$ гиперпараллелепипеда Π_2 на основе анализа таблицы, аналогичной табл. 1.

Шаг 8. Сместить вершину π_k на вектор \mathbf{r}_2 , координаты которого пропорциональны сторонам гиперпараллелепипеда Π_2 , а модуль равен установленной заранее константе r . Для нового гиперпараллелепипеда Π_3 (см. рис. 2, прямоугольник $A''B''C''D''$) должно выполняться включение $\Pi_3 \subset \Pi_2$ и т. д.

В результате итерационного процесса будет построена последовательность гиперпараллелепипедов вида (9), где окончание итерационного процесса происходит при условии $\hat{Q} \subset \Pi_n$, гарантируя, что объем результирующей области будет не равен нулю.

Тестовые задачи. Для проверки эффективности вычислительной процедуры формирования рабочей области варьируемых параметров ССт были разработаны и решены три тестовые задачи, охватывающие следующие возможные виды множества ограничений на параметры:

выпуклое множество \hat{Q} ; невыпуклое множество \hat{Q} ; многосвязное множество \hat{Q} .

Тестовая задача 1. Выпуклая область ограничений на параметры. Исходные критерии $J_1(x) = 0,2(x_1 - 40)^2 + 0,8(x_2 - 40)^2$; $J_2(x) = 0,2(x_1 - 80)^2 + 0,8(x_2 - 60)^2$. Ограничения на значения критериев

$$J_1(x) \leq C_1, \quad C_1 = 200; \quad (10)$$

$$J_2(x) \leq C_2, \quad C_2 = 200. \quad (11)$$

Область поиска $0 \leq x_1 \leq 79, 0 \leq x_2 \leq 79$. Вспомогательные критерии

$$F_1(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } J_1(x) \leq C_1, \\ \mu_1 \frac{F_1(x) - C_1}{C_1}, & \text{если } J_1(x) > C_1; \end{cases}$$
$$F_2(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } J_2(x) \leq C_2, \\ \mu_2 \frac{F_2(x) - C_2}{C_2}, & \text{если } J_2(x) > C_2. \end{cases}$$

Параметры алгоритма:

- размер популяции тестовых точек-особей (ТТО) 500;
- максимальное число поколений ТТО 15;
- длина хромосомы 64;
- вероятность кроссовера 0,90;
- вероятность инверсии 0,01;
- вероятность мутации 0,075;
- $\mu_1 = \mu_2 = 1$.

Критерий останова алгоритма — превышение доли элитных ТТО уровня 50 %. Результаты решения тестовой задачи представлены на рис. 3.

Множество, представленное на рис. 3, δ , достаточно точно аппроксимирует выпуклое множество, заданное системой ограничений (10), (11).

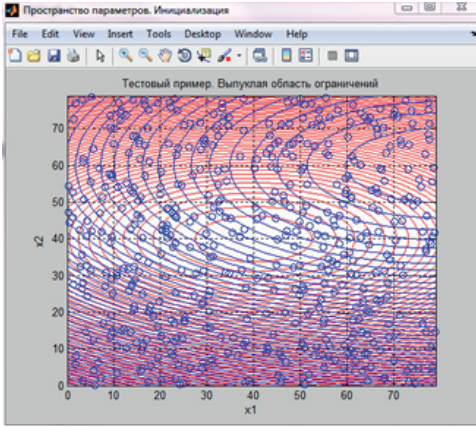
Тестовая задача 2. Невыпуклая область ограничений на параметры. Исходные критерии (функция Розенброка): $J(x) = (1 - x_1)^2 + 100(x_2 - x_1^2)^2$. Ограничения на значения критерия

$$J(x) \leq C, \quad C = 10. \quad (12)$$

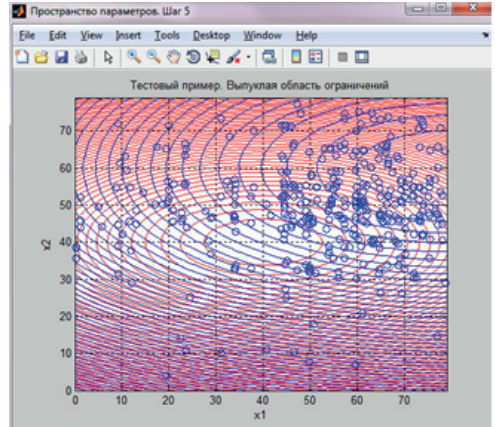
Область поиска $-2 \leq x_1 \leq 2, -2 \leq x_2 \leq 2$. Параметры алгоритма:

- размер популяции ТТО 1 000;

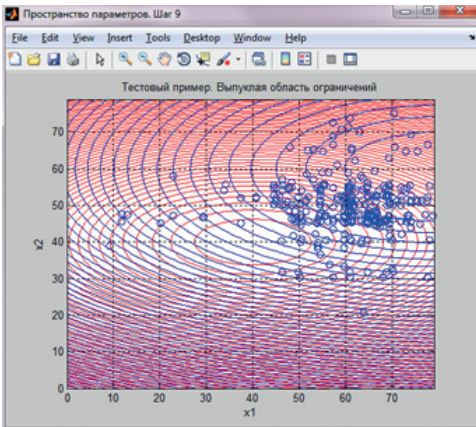
- максимальное число поколений 15;
- длина хромосомы 64;
- вероятность кроссовера 0,90;
- вероятность инверсии 0,01;
- вероятность мутации 0,075;
- $\mu = 1$.



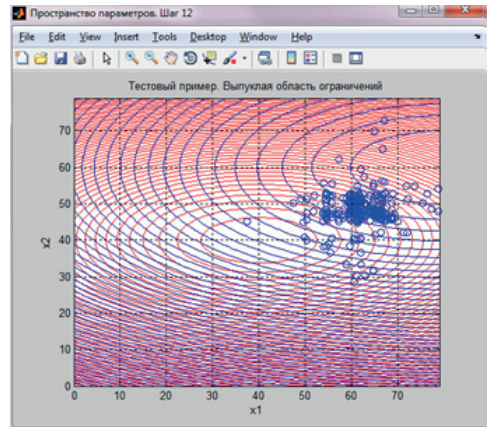
а



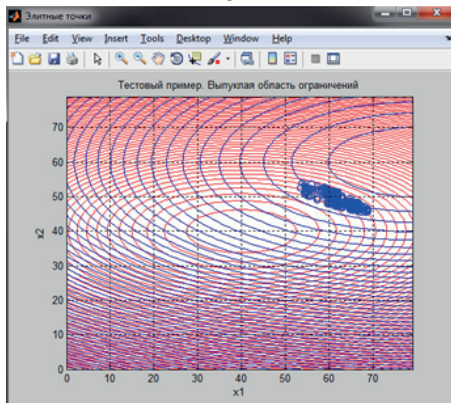
б



в



г



д

Рис. 3. Результаты решения тестовой задачи 1:

а — начальная популяция ТТО; *б* — пятое поколение ТТО (6,4 % элитных ТТО); *в* — девятое поколение (26 % элитных ТТО); *г* — 12-е поколение ТТО (53,4 % элитных ТТО); *д* — множество элитных ТТО

Критерий останова алгоритма — превышение доли элитных ТТО уровня 70 %. Результаты решения тестовой задачи 2 представлены на рис. 4. Множество, представленное на рис. 4, δ , является достаточно точной аппроксимацией невыпуклого множества, заданного ограничением (12).

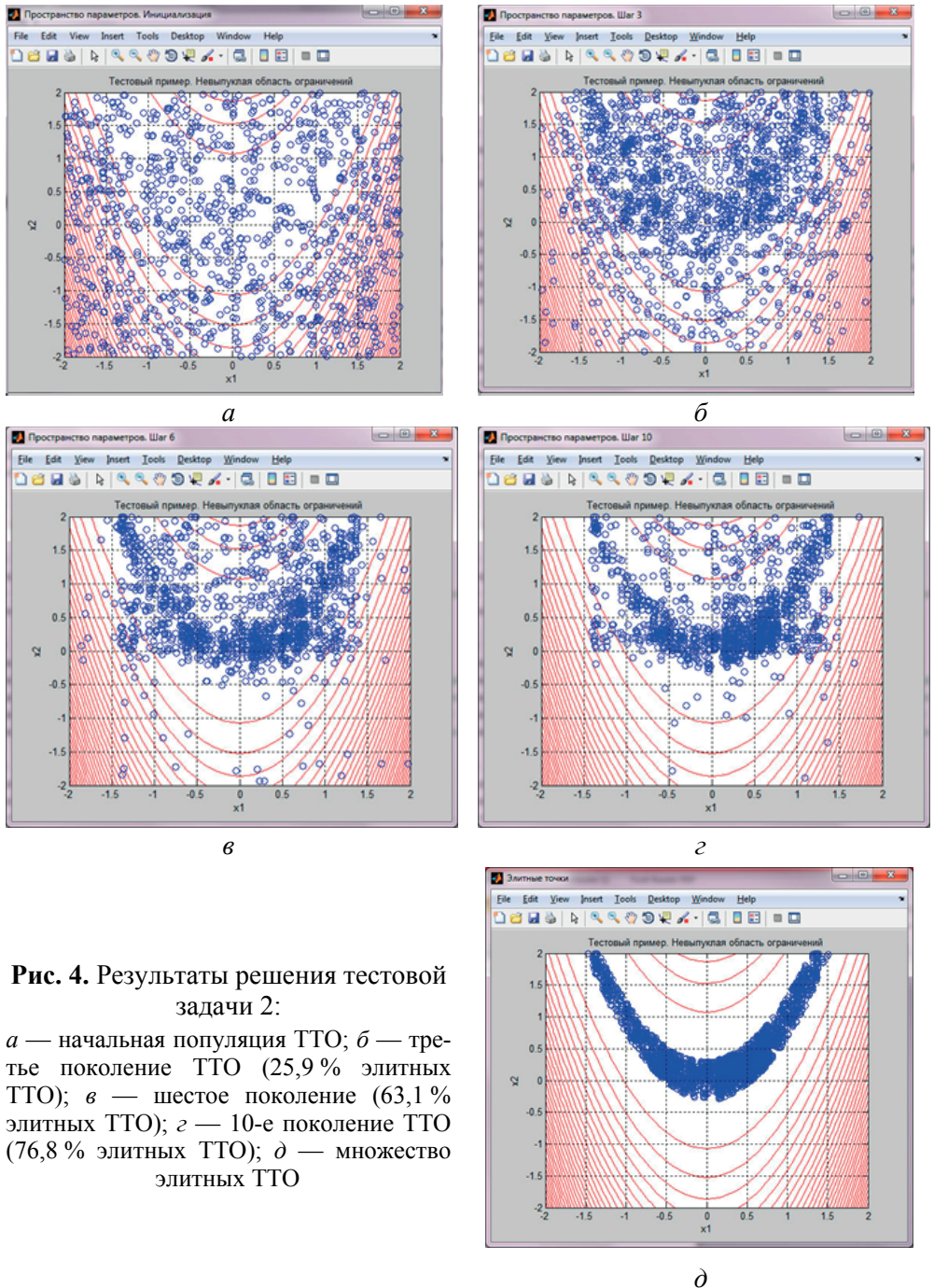


Рис. 4. Результаты решения тестовой задачи 2:

а — начальная популяция ТТО; *б* — третье поколение ТТО (25,9 % элитных ТТО); *в* — шестое поколение (63,1 % элитных ТТО); *г* — 10-е поколение ТТО (76,8 % элитных ТТО); *д* — множество элитных ТТО

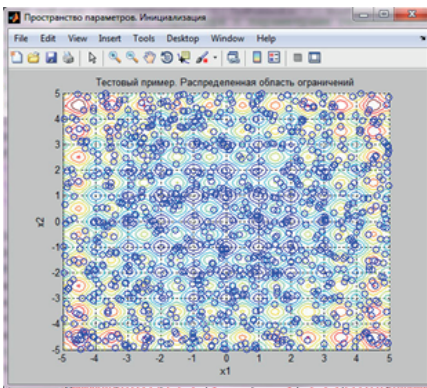
Тестовая задача 3. Многосвязная область ограничений на параметры. Исходные критерии (функция Растригина): $J(x) = 20 + x_1^2 + x_2^2 - 10(\cos(2\pi x_1) + \cos(2\pi x_2))$. Область ограничений на значения критериев

$$J(x) \leq C, \quad C = 5. \quad (13)$$

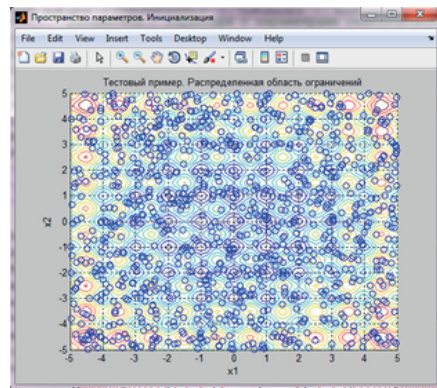
Область поиска $-5 \leq x_1 \leq 5, -5 \leq x_2 \leq 5$. Параметры алгоритма:

- размер популяции ТТО 2000;
- максимальное число поколений 15;
- длина хромосомы 64;
- вероятность кроссовера 0,90;
- вероятность инверсии 0,01;
- вероятность мутации 0,075;
- $\mu = 1$.

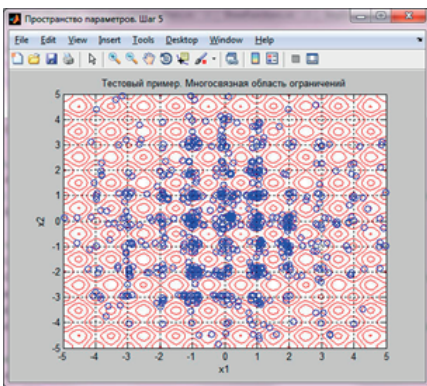
Критерий останова алгоритма — превышение доли элитных ТТО уровня 80 %. Результаты решения тестовой задачи 3 представлены на рис. 5. Множество, представленное на рис. 5, д, достаточно точно аппроксимирует многосвязное множество, заданное ограничением (13).



a



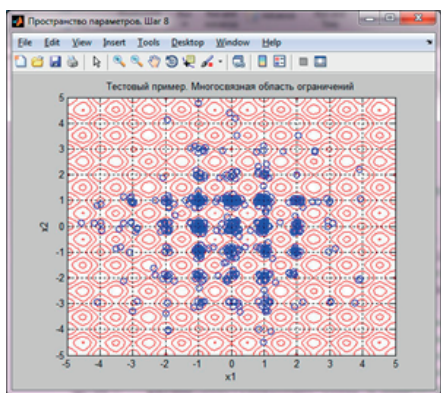
б



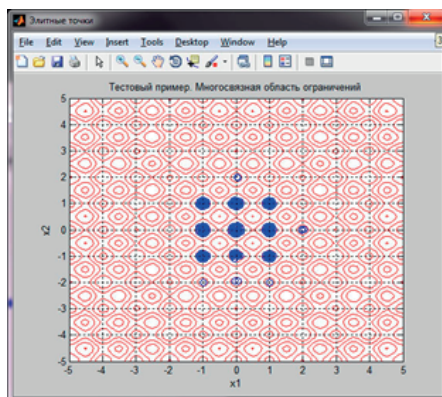
в

Рис. 5 (начало). Результаты решения тестовой задачи 3:

a — начальная популяция ТТО; *б* — пятое поколение ТТО (5,3 % элитных ТТО); *в* — восьмое поколение (26,6 % элитных ТТО); *г* — 12-е поколение ТТО (91,5 % элитных ТТО); *д* — множество элитных ТТО



г



д

Рис. 5 (окончание)

Результаты формирования рабочей области варьируемых параметров системы стабилизации. Зона применимости БЛА в координатах скорость–высота показана на рис. 6. Задача формирования рабочей области Q варьируемых параметров ССт решена для 18 точек зоны применимости БЛА, выделенных на рис. 6 и соответствующих различным режимам полета БЛА.

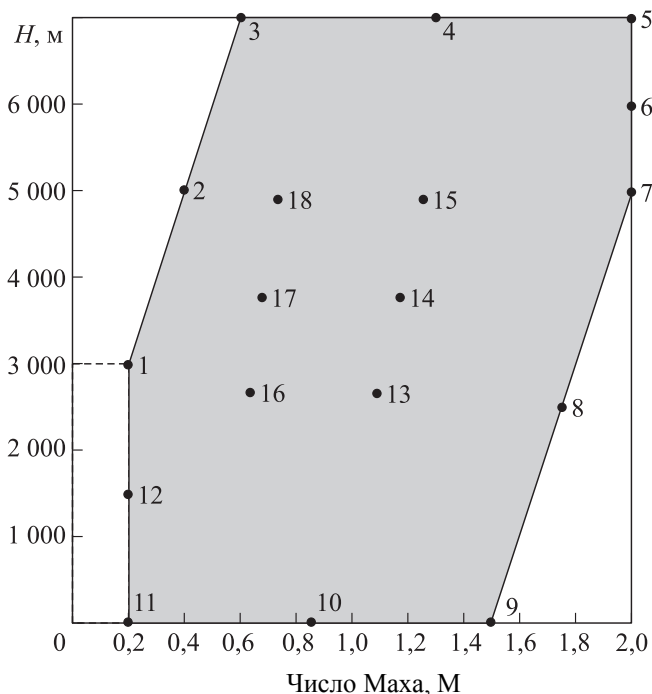


Рис. 6. Зона применимости БЛА в координатах скорость–высота (1–18 — точки, соответствующие различным режимам полета БЛА)

Результаты применения двухэтапной вычислительной процедуры формирования рабочей области варьируемых параметров трехканальной ССт в виде системы интервальных ограничений представлены в табл. 2. Ограничения приведены для точек № 1, 3, 5, 7, 8, 13.

Таблица 2

Результаты применения двухэтапной вычислительной процедуры формирования рабочей области варьируемых параметров трехканальной ССт БЛА в виде системы интервальных ограничений q_{\min} (числитель), q_{\max} (знаменатель)

Варьируемый параметр	Точка					
	№ 1	№ 3	№ 5	№ 7	№ 8	№ 13
K_{ω}^z	0,32/0,80	0,18/0,65	0,092/0,150	0,097/0,119	0,085/0,110	0,062/0,190
K_n^y	31/70	12/34	1,2/3,3	1,113/2,1	0,29/0,97	1,3/3,7
K_{sn}^y	15/30	7,6/70	0,8/18	10/18	0,45/4,60	0,2/12,0
K_{ω}^y	0,17/0,7	0,18/0,54	0,11/0,19	0,082/0,130	0,061/0,130	0,065/0,16
K_n^z	30/37	15/33	1,7/3,5	1,3/2,3	0,67/0,94	1,4/4,0
K_{sn}^z	0,49/1,6	5,3/67	0,58/12	0,46/22	0,03/0,35	0,056/9,30
K_{ω}^x	0,20/0,76	0,10/0,24	0,014/0,070	0,012/0,057	0,03/0,05	0,018/0,054
K_{γ}	8,1/11,0	5,1/13,0	0,79/4,40	1,4/3,6	0,53/1,42	1,6/3,9
$K_{s\gamma}$	3,9/22,0	3,2/25,0	0,27/2,20	0,8/3,5	1,148/1,690	1,52/19,0

Анализ полученных результатов показывает, что размеры и положение рабочей области Q в пространстве параметров $K_{\omega}^z, K_n^y, K_{sn}^y, K_{\omega}^y, K_n^z, K_{sn}^z, K_{\omega}^x, K_{\gamma}, K_{s\gamma}$ ССт существенно зависят от условий полета, соответствующих различным точкам зоны применимости БЛА. Таким образом, необходима адаптация параметров ССт к условиям полета БЛА. Задача многокритериальной оптимизации параметров ССт должна решаться отдельно для каждой выделенной точки зоны применения БЛА с последующей интерполяцией в виде поверхностей адаптации.

Заключение. Разработана формализованная методика формирования рабочей области варьируемых параметров ССт БЛА на основе представления исходной задачи в виде задачи многокритериальной оптимизации и применения комплекса генетических алгоритмов многокритериальной оптимизации.

Решена задача формирования рабочей области варьируемых параметров трехканальной ССт для различных точек зоны применения БЛА, что обеспечивает возможность планирования законов траекторной адаптации параметров ССт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 303 с.
2. Weinmann A. Uncertain models and robust control. Wien: Springer, 1991.
3. Саушев А.В. Методы линейной аппроксимации граничных точек областей работоспособности технических систем // Журнал университета водных коммуникаций. 2013. Вып. 3(19). С. 41–51.
4. Саушев А.В. Параметрический синтез технических систем на основе линейной аппроксимации области работоспособности // Автометрия. 2013. № 1. С. 61–67.
5. Дуго Г.Б., Дуго Н.Б. Использование эллипсоидов для описания области работоспособности // Информатика и системы управления. 2008. № 1(15). С. 9–16.
6. Шарая И.А. Строение допустимого множества решений интервальной линейной системы // Вычислительные технологии. 2005. № 5(10). С. 103–119.
7. Зубов В.И. Математические методы исследования систем автоматического регулирования. Л.: Машиностроение, 1974. 336 с.
8. Серов В.А. Генетические алгоритмы оптимизации управления многокритериальными системами в условиях неопределенности на основе конфликтных равновесий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2007. № 4. С. 70–80.
9. Методы робастного нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 744 с.
10. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems — Pearson Education, N.J.: Upper Saddle River, 2008.
11. Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных игровых решений. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 576 с.
12. Серов В.А., Хитрин В.В. Эволюционная вычислительная технология, многокритериальная оптимизация и управления динамическими системами // Труды Института системного анализа РАН. Динамика неоднородных систем; под ред. Ю.С. Попкова. М.: КомКнига, 2008. Вып. 32(3). С. 61–71.
13. Аксенов А.С., Воронов Е.М., Любавский К.К., Сычев С.И. Многокритериальная параметрическая оптимизация трехканальной системы стабилизации летательного аппарата с перекрестными связями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. № 3. С. 16–36.
14. Многокритериальная оптимизация трехканальной системы стабилизации противокорабельной ракеты с учетом динамического влияния ее перекрестных связей / К.К. Любавский, Е.М. Воронов, А.С. Аксенов, С.И. Сычев, В.А. Серов, М.А. Клишин // Навигация, наведение и управление летательными аппаратами: Тезисы докладов Второй Всероссийской научно-технической конференции (Москва–Раменское, 22–23 сентября 2015 г.). М.: Научтехлитиздат, 2015. С. 71–74.
15. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. Chichester, West Sussex, England, UK: John Wiley & Sons, 2005.
16. Durham Wayne. Aircraft Flight Dynamics and Control. Wiley, 2013.

REFERENCES

- [1] Polyak B.T., Shcherbakov P.S. Robastnaya ustoychivost' i upravlenie [Robust Stability and Control]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 303 p.
- [2] Weinmann A. Uncertain models and robust control. Wien, Springer, 1991.
- [3] Saushev A.V. Methods of linear approximation of boundary points of areas of operability of technical systems. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy*, 2013, iss. 3(19), pp. 41–51 (in Russ.).

- [4] Saushev A.V. Parametric synthesis of technical systems based on the linear approximation of the operational capability range. *Optoelectronics, instrumentation and data processing*, 2013, no. 1, pp. 61–67.
- [5] Digo G.B., Digo N.B. Using ellipsoids to describe the operational capability Range. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2008, no. 1(15), pp. 9–16 (in Russ.).
- [6] Haraya I.A. Structure of the tolerable solution set of an interval linear system. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies], 2005, no. 5(10), pp. 103–119 (in Russ.).
- [7] Zubov V.I. Matematicheskie metody issledovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Mathematical Methods for Studying Automatic Control Systems]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1974. 336 p.
- [8] Serov V.A. Genetic algorithms of optimizing control of multi-objective systems under condition of uncertainty based on conflict equilibrium. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2007, no. 4, pp. 70–80 (in Russ.).
- [9] Egupov N.D., ed. Metody robastnogo neyro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya [Methods of Robust Neuro-Fuzzy and Adaptive Control]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2001. 744 p.
- [10] Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems — Pearson Education, N.J., Upper Saddle River, 2008.
- [11] Voronov E.M. Metody optimizatsii upravleniya mnogoob"ektnymi mnogokriterial'nymi sistemami na osnove stabil'no-effektivnykh igrovykh resheniy [Optimization Methods for Multiobject Multicriteria System Control on the Basis of Steady-Effective Gaming Solutions]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2001. 576 p.
- [12] Serov V.A., Khitrin V.V. Evolutionary computing technology, multi-criteria optimization and dynamic system control. *Tr. Inst. sistemnogo analiza RAN. Dinamika neodnorodnykh system* [Proc. of the Institute for System Analysis, RAS. Dynamics of Inhomogeneous Systems]. Ed. by Popkov Yu.S. Moscow, KomKniga Publ., 2008, iss. 32(3), pp. 61–71 (in Russ.).
- [13] Aksenov A.S., Voronov E.M., Lyubavskiy K.K., Sychev S.I. Multi-criteria parametric optimization of the triple channel cross-coupling stabilizing system of an aircraft. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2014, no. 3, pp. 16–36 (in Russ.).
- [14] Lyubavskiy K.K., Voronov E.M., Aksenov A.S., Sychev S.I., Serov V.A., Klishin M.A. Multicriteria Optimization of Three-Channel Stabilization System of Anti-Ship Missile Taking into Account the Dynamic Effect of Cross-Linking. *Navigatsiya, navedenie i upravlenie letatel'nymi apparatami. Tez. dokl. Vtoroy vseros. nauch.-tekh. konf.* [Flight Vehicle Navigation, Guidance and Control. Abstracts of the Second All-Russian Sci. and Tech. Conf.]. Moscow–Ramenskoe, 2015, September 22–23. Moscow, Nauchtekhizdat Publ., 2015, pp. 71–74 (in Russ.).
- [15] Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. Chichester, West Sussex, England, UK, John Wiley & Sons, 2005.
- [16] Durham Wayne. Aircraft Flight Dynamics and Control. Wiley, 2013.

Статья поступила в редакцию 01.04.2016

Воронов Евгений Михайлович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Voronov E.M. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Automatic Control Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Серов Владимир Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление и моделирование систем» Московского технологического университета (МИРЭА) (Российская Федерация, 119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Serov V.A. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of System Control and Simulation Department, Moscow Technological University (MIREA) (prospect Vernadskogo 78, Moscow, 119454 Russian Federation).

Клишин Михаил Анатольевич — аспирант кафедры «Управление и моделирование систем» Московского технологического университета (МИРЭА) (Российская Федерация, 119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Klishin M.A. — post-graduate student of System Control and Simulation Department, Moscow Technological University (MIREA) (prospect Vernadskogo 78, Moscow, 119454 Russian Federation).

Любавский Кирилл Константинович — аспирант кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Lyubavskiy K.K. — post-graduate student of Automatic Control Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Савчук Алексей Михайлович — инженер НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5), начальник отдела АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» (Российская Федерация, 141080, Московская обл., Королев, ул. Ильича, д. 7).

Savchuk A.M. — engineer of Scientific Educational Center, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation), Head of Department at Tactical Missiles Corporation (ul. Ilichy 7, Korolev, Moscow Region, 141080 Russian Federation).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Воронов Е.М., Серов В.А., Клишин М.А., Любавский К.К., Савчук А.М. Многокритериальный синтез законов траекторной адаптации параметров трехканальной системы стабилизации беспилотного летательного аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 3. С. 24–41. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-24-41

Please cite this article in English as:

Voronov E.M., Serov V.A., Klishin M.A., Lyubavskiy K.K., Savchuk A.M. Multi-criteria Synthesis of Trajectory Adaptation Rules for the Three Channel Stabilization System Parameters of Unmanned Aircraft. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 3, pp. 24–41. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-24-41