УДК 62.50:681.51

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ “НАВЕДЕНИЕ–СТАБИЛИЗАЦИЯ” ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С АДАПТАЦИЕЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ

А.В. Ванин[1], **Е.М. Воронов**[1], **В.А. Серов**[2],
А.А. Карпунин[1], **К.К. Любавский**[1]

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: mole@list.ru; emvoronov@mail.ru

[2]МГУПИ, Москва, Российская Федерация

Сформирована методика исследования влияния высокоманевренной траектории летательного аппарата на динамические перекрестные связи трехканальной системы стабилизации на основе методов оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами в условиях структурной несогласованности. Данный подход применяется в процессе оптимизации иерархической системы управления с обеспечением координированных стабильно-эффективных компромиссов на основе иерархических уравновешиваний и оптимального управления многообъектными многокритериальными системами уровней. Рассмотрены способы получения законов координированного управления и их параметризации.

Ключевые слова: оптимизация управления, иерархические системы, координация, исполнительное управление, наведение, стабилизация, летательный аппарат.

OPTIMIZATION OF THE HIERARCHICAL SYSTEM OF “GUIDANCE–STABILIZATION” OF THE AIRCRAFT WITH THE STABILIZATION SYSTEM ADAPTATION

A.V. Vanin[1], **E.M. Voronov**[1], **V.A. Serov**[2],
A.A. Karpunin[1], **K.K. Lubavskiy**[1]

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: mole@list.ru; emvoronov@mail.ru

[2]Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science, (MSUIECS) Moscow, Russian Federation

The article describes the research technique to study the influence of the aircraft highly maneuverable trajectory on the dynamic inter-axis cross feeds of the three-channel stabilization system with the help of the methods of optimization of the multiobject multicriterion systems control under the conditions of structural inconsistencies. This method is used for optimization of the hierarchical control system ensuring coordinated steadily effective compromises based on hierarchical trims and the optimal control over the multiobject multicriterion level systems. The ways of establishing laws of the coordinated control and their parameterization are considered.

Keywords: control optimization, hierarchical systems, coordination, executive control, guidance, stabilization, aircraft.

В настоящей работе развивается и применяется метод координированных стабильно-эффективных компромиссов для оптимизации иерархических систем управления на основе иерархических уравновешиваний и оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами уровней. В рамках исследования формируются стратегии межуровневого координирования на основе обобщенного иерархического координирования по Штакельбергу [1–3]. Рассматривается получение поуровневых Парето-оптимальных стабильно-эффективных компромиссов на основе модифицированного равновесно-арбитражного алгоритма [3–5]. Сформирован алгоритм оптимизации иерархической системы управления на основе разработанной методики получения координированных стабильно-эффективных компромиссов [2, 6, 7]. Приведено обобщение этого метода и рассмотрены примеры его применения.

Структура и модель двухуровневой системы [2]. Рассматривается методика оптимизации структурно и функционально сложных АСУ в типичной форме многоуровневой иерархической структуры с поуровневыми многоподсистемными (многоканальными, многовязными) многокритериальными системами (ММС) регулирования (ММС-Р), управления (ММС-У) и принятия решений (ММС-ПР), представленной на рис. 1.

Примером представления части такой многоуровневой АСУ и практически полезной моделью для исследования является двухуровневая математическая модель наведения–стабилизации многоканальной СУ беспилотного летательного аппарата (СУ ЛА), приведенная на рис. 2, где в соответствии с терминологией [8] введены следующие обозначения: КСУ, КССт — каналы системы управления и системы стабилизации ЛА; $u_{1,2}$ — сигналы наведения ЛА (координирующие воздействия на систему стабилизации); $k_{\text{у}}, k_{\text{к}}$ — управляющие параметры, коэффициенты передачи устройства выработки команд КСУ (метода наведения) и чувствительного элемента координатора цели; $k_{\text{дг}}, k_{\text{длу}}$ — управляющие параметры, коэффициенты передачи дифференцирующего гироскопа и датчика линейных ускорений; $\delta_{\text{в}}, \delta_{\text{н}}$ и $\delta_{\text{э}}$ — управляющие воздействия рулей высоты, рулей направления и элеронов системы стабилизации (исполнительные воздействия на ЛА); ϑ, ψ, γ — углы тангажа, рыскания и крена; $j_{\text{н}}$ — нормальные ускорения ЛА; $X, Y, Z (X_{\text{ц}}, Y_{\text{ц}}, Z_{\text{ц}})$ — координаты центра масс O_0 беспилотного

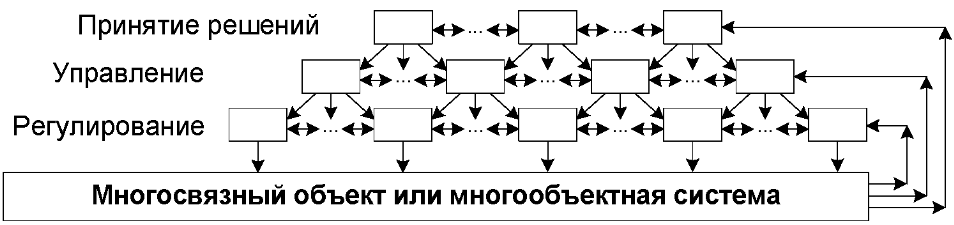

Рис. 1. Вариант функциональной структуры многоуровневой системы управления

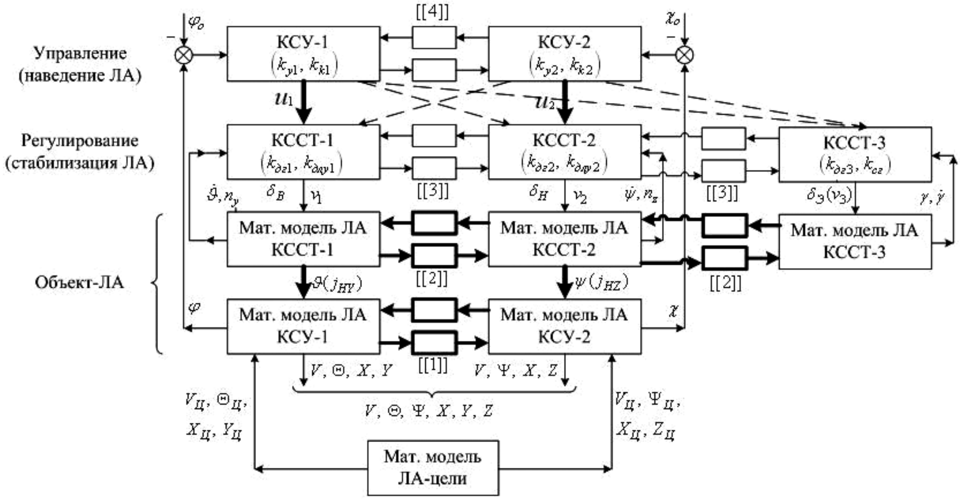

Рис. 2. Двухуровневая модель наведения–стабилизации трехканальной СУ ЛА

ЛА (центра масс $O_{\text{ц}}$ ЛА-цели); $V, \Theta, \Psi(V_{\text{ц}}, \Theta_{\text{ц}}, \Psi_{\text{ц}})$ — координаты вектора скорости ЛА (ЛА-цели); φ — угол места между горизонтальной плоскостью $X_0O_0Z_0$ и линией визирования; χ — угол азимута между осью O_0X_0 и проекцией линии визирования на $X_0O_0Z_0$; R — длина вектора $\overrightarrow{O_0O_{\text{ц}}}$; $\varphi_0, \chi_0, \ldots$ — элементы опорной траектории.

Следует иметь в виду, что в линеаризованном варианте представленной модели вектор состояния центра масс (V, Θ, Ψ) заменяется на вектор (ΔV, $\Delta\Theta$, $\Delta\Psi$), где данные динамические параметры есть отклонения ЛА от опорного движения (V_0, Θ_0, Ψ_0). Блоки с обозначением [[i]], $i = 1 : 4$, являются перекрестными связями в динамике поступательного движения центра масс ЛА, углового (вращательного) движения вокруг центра масс ЛА, между регуляторами ССт и в методе пространственного наведения ЛА. В типичной ситуации существенна связь между каналами вращательного и поступательного движений ЛА, что определяет связь каналов стабилизации и наведения соответственно [8].

Математическая модель движения ЛА представлена моделью углового (вращательного) движения вокруг центра масс по углам тангажа ϑ и рыскания ψ (далее — с расширением по углу крена γ) с соответствующими воздействиями аэродинамического управления по нормальному ускорению (j_{H}) в каналах управления направлением скорости центра масс в вертикальной плоскости по углу наклона траектории (Θ) и в горизонтальной плоскости по углу поворота траектории (Ψ) (рис. 3). На рис. 3 введены следующие дополнительные обозначения: η — угол упреждения; $\eta_{\text{Ц}}$ — курсовой угол цели.

Как известно [8], в общем случае система динамических и кинематических связей двухканальной математической модели ЛА на уровне

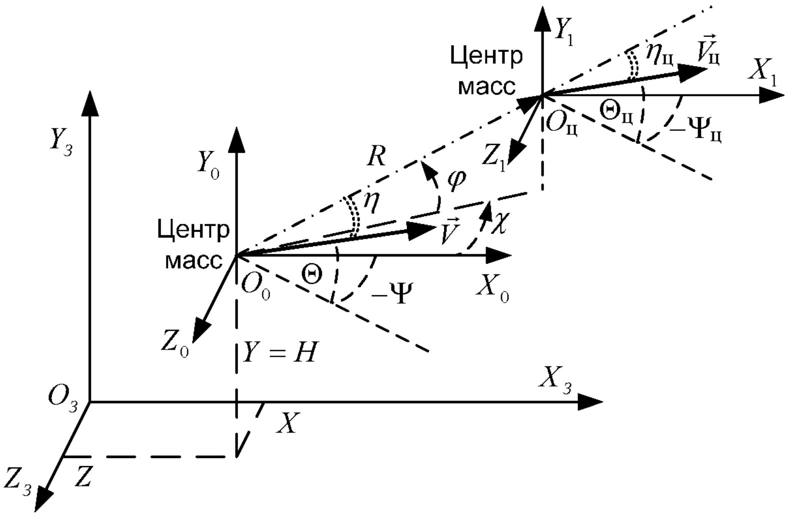

Рис. 3. Вектор состояния ЛА $(V, \Theta, \Psi, X, Y, Z)$ относительно местной географической СК (R, φ, χ)

КСУ имеет при $V = \text{const}$ вид системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\Theta} = \left(j_{HY}^{\Pi} - g\cos\Theta\right)/V; \\ \dot{\Psi} = -j_{HZ}^{\Pi}/(V\cos\Theta); \\ \dot{X} = V\cos\Theta\cos\Psi; \\ \dot{Y} = V\sin\Theta; \\ \dot{Z} = -V\cos\Theta\sin\Psi, \end{cases} \tag{1}$$

которая при малых углах Ψ (или Θ) декомпозируется на модели каналов СУ ЛА — горизонтальный (или вертикальный) с управлениями $j_{нZ}$ $(j_{нY})$. Поэтому общую модель ЛА КСУ можно считать двухканальной с перекрестными кинематическими связями [[1]] (см. рис. 3), где $j_{нY}^{\Pi} = j_{нY0} + j_{нY}$, $j_{нZ}^{\Pi} = j_{нZ0} + j_{нZ}$, причем решение системы при $j_{нY0}$, $j_{нZ0}$ дает $\Theta_0(t)$, $\Psi_0(t)$ (или, наоборот, заданные Θ_0, Ψ_0 формируют $j_{нY0}$, $j_{нZ0}$).

Текущее расстояние $\|O_0 O_ц\|$

$$R = \sqrt{(X - X_ц)^2 + (Y - Y_ц)^2 + (Z - Z_ц)^2}. \tag{2}$$

При применении сферической системы координат, особенно полезной при исследовании конфликтной ситуации в системе ЛА с центрами масс в точках O_0 и $O_ц$ (см. рис. 3) в системе координат с началом отсчета в точке O_0, полные уравнения пространственной кинематики на основе [8] принимают вид системы

$$\begin{aligned}
&\dot{R} = -V\cos\eta + V_{\text{ц}}\cos\eta_{\text{ц}};\\
&R\dot{\varphi} = V\left[\sin\Theta\cos\varphi - \sin\varphi\cos\Theta\cos\left(\Psi-\chi\right)\right] -\\
&\qquad -V_{\text{ц}}\left[\sin\Theta_{\text{ц}}\cos\varphi - \sin\varphi\cos\Theta_{\text{ц}}\cos\left(\Psi_{\text{ц}}-\chi\right)\right];\\
&R\dot{\chi}\cos\varphi = V\cos\Theta\sin\left(\Psi-\chi\right) - V_{\text{ц}}\cos\Theta_{\text{ц}}\sin\left(\Psi_{\text{ц}}-\chi\right),\\
&\cos\eta = \cos\varphi\cos\Theta\cos\left(\Psi-\chi\right) + \sin\varphi\sin\Theta,\\
&\cos\eta_{\text{ц}} = \cos\varphi\cos\Theta_{\text{ц}}\cos\left(\Psi_{\text{ц}}-\chi\right) + \sin\varphi\sin\Theta_{\text{ц}}.
\end{aligned}\qquad (3)$$

Система (3) порождает дополнительные перекрестные связи типа [[1]] (см. рис. 3) и позволяет вычислить координаты вектора $\overrightarrow{O_0O_{\text{ц}}}(R,\varphi,\chi)$ по динамико-кинематическим системам (1) для беспилотного ЛА и ЛА-цели для их использования в КСУ-l ($l = 1, 2$).

Для иллюстрации динамического описания задачи на уровне регулирования (стабилизации) ЛА на рис. 4 приведена структурная схема трехканального описания линеаризованной системы стабилизации в блоке: КССТ — математическая модель углового движения ЛА — перекрестные связи [[2]] (см. рис. 3).

На рис. 4 введены следующие обозначения: a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} — аэродинамические коэффициенты; ϑ_0, γ_0 — элементы опорной траектории; $M_{\text{возм}\vartheta}$, $M_{\text{возм}\psi}$, $M_{\text{возм}\gamma}$ — возмущающие моменты (для расчета влияния возмущений).

Передаточная функция (ПФ) летательного аппарата имеет вид

$$W_{\delta_B}^{\dot{\vartheta}} = \frac{k(T_1 s + 1)}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1};\quad W_{\dot{\vartheta}}^{j_{HZ}} = \frac{V}{T_1 s + 1};$$

$$W_{\delta_H}^{\dot{\psi}} = \frac{k(T_2 s + 1)}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1};\quad W_{\dot{\psi}}^{j_{HY}} = \frac{V}{T_2 s + 1};$$

ПФ рулевого привода — $W_{\text{РП}} = \dfrac{k_{\text{РП}}}{T_{\text{РП}} s + 1}$.

Нелинейный элемент f_2, задающий ограничение сигнала u_l ($l = 1, 2$), представлен на рис. 5.

В целом структурная схема двухуровневой трехканальной системы “наведение–стабилизация” беспилотного ЛА с перекрестными связями приведена на рис. 6.

На рис. 6 замкнутые системы с внутренней обратной связью являются двухканальным координатором цели (Кц) головки самонаведения (ГС) беспилотного ЛА на основе двухосного силового гироскопического стабилизатора [8]. Коэффициент k_{kl} ($l = 1, 2$) является коэффициентом передачи чувствительного элемента Кц. Датчик момента и гиростабилизатор имеют передаточную функцию $W_{\text{г}}(s) = (k_{\text{г}}k_{\text{д}})/s$, где $k_{\text{д}}$ — коэффициент передачи датчика момента, $k_{\text{г}} = 1/H$ — коэффициент передачи гиростабилизатора, где H — кинетический момент гироскопа стабилизатора.

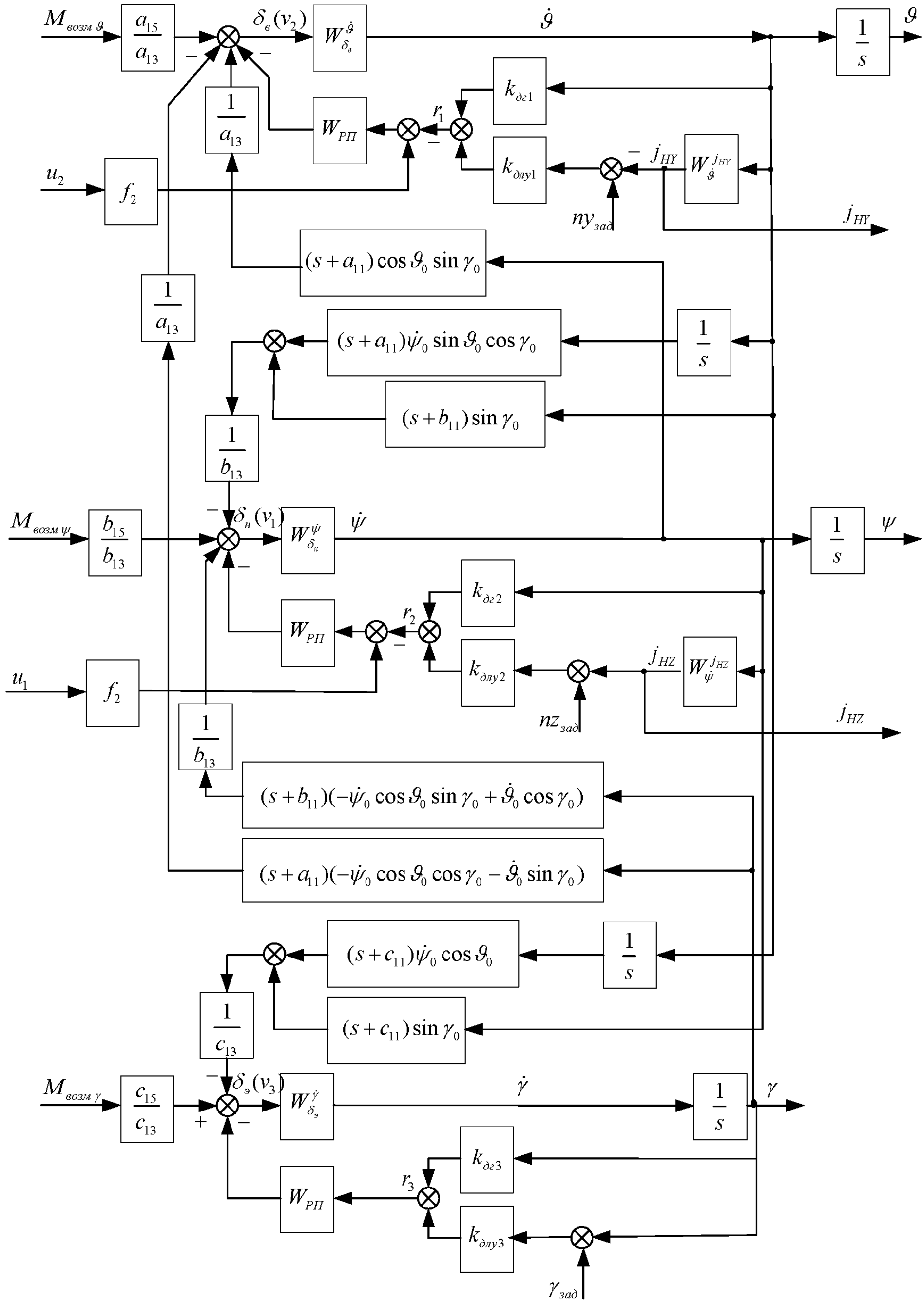

Рис. 4. Структурная схема трехканальной ССт

Нелинейный элемент f_1 учитывает эффект стробирования ГС. В более общем описании двухканальный Кц создает дополнительные перекрестные связи типа [[4]] (см. рис. 3), которые в настоящей работе не учитываются.

Передаточная функция устройства выработки команд (УВК) в простейшем виде [8] имеет вид $W_{\text{УВК}}(s) = k_{yl}$, где k_{yl} — коэффициент передачи УВК КСУ-l, определяющий качество метода пропорционального наведения [9].

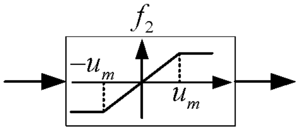

Рис. 5. Ограничение сигнала u_l ($l = 1, 2$)

В целом структурная схема двухуровневой двухканальной системы “наведение–стабилизация” беспилотного ЛА с перекрестными связями приведена на рис. 6. В силу того, что канал системы стабилизации по углу крена отрабатывает только возмущающее воздействие и на него не поступает сигнал наведения с уровня управления, то на структурной схеме (см. рис. 6) система стабилизации имеет вид двухканальной системы. Влияние канала крена на управляющие воздействия на каждом из уровней иерархии учитывается в математическом описании системы стабилизации и через перекрестные связи на каждом из уровней.

Концепция и определение обобщенного управления многоуровневой системой [1, 2]. Методика оптимизации формируется на основе комбинации методов проектирования иерархических распределенных систем (ИРС) для выбора оптимальной функциональной струк-

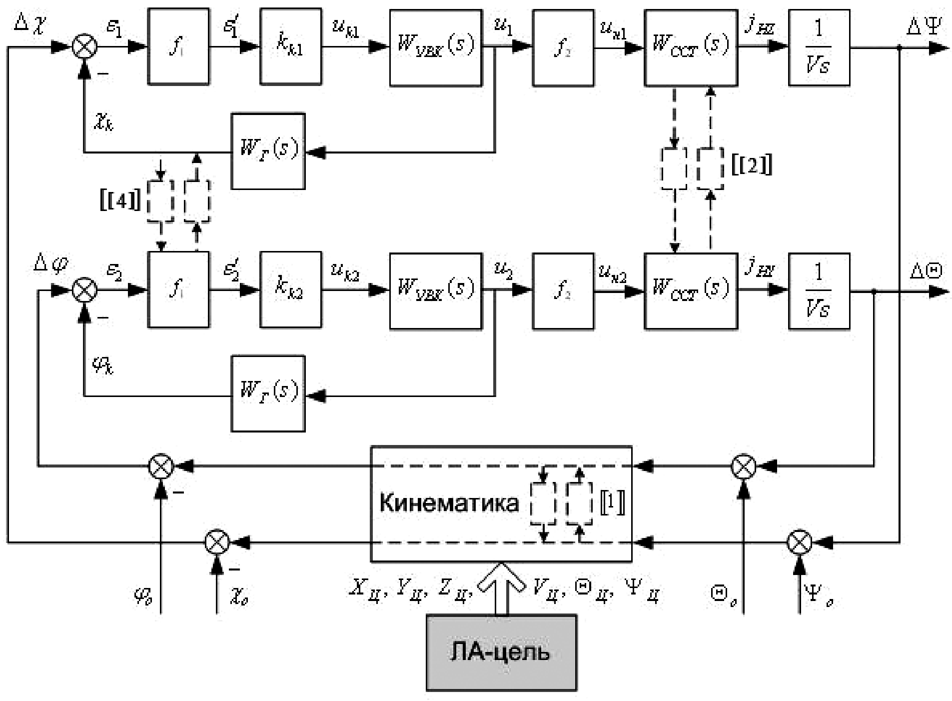

Рис. 6. Структурная схема двухканальной системы “наведение–стабилизация” беспилотного летательного аппарата

туры ИРС–АСУ (облика АСУ); методов оптимизации ММС на основе стабильно-эффективных игровых компромиссов для оптимизации и уравновешивания (балансировки) подсистем в составе ММС-уровня регулирования, управления, принятия решения по эффективности или потерям; методов оптимизации межуровневой координации с приоритетом — "правом первого хода" каждого верхнего уровня в ИРС–АСУ. Данная концепция позволяет сформулировать определение обобщенного оптимального управления в ИРС–АСУ.

Определение. Обобщенное оптимальное управление многоуровневой АСУ формируется на основе комбинации процессов: 1) многокритериального выбора оптимальной функциональной структуры АСУ (облика АСУ); 2) равновесно-арбитражной многокритериальной оптимизации ММС-уровней; 3) оптимизации межуровневой координации.

Очевидно, что данное обобщенное управление АСУ с учетом поуровневых и межуровневых связей требует разработки единой технологии его оптимизации.

В качестве комментария определения в практическом примере двухуровневой трехканальной СУ наведения–стабилизации ЛА (см. рис. 2) функциональный облик уже выбран. Далее формируется итерационная процедура оптимизации управления на основе равновесно-арбитражного алгоритма на ММС-уровнях и алгоритма получения межуровневых координаций на основе обобщенного иерархического уравновешивания по Штакельбергу. На соответствующих уровнях выбираются параметры, которые обеспечивают балансировку и Парето-оптимальность на основе равновесно-арбитражной схемы стабильно-эффективного компромисса [3–5]. Сигналы u_i, $i = 1, 2$, обеспечивают межуровневую координацию между уровнем управления и стабилизации, а v_i, $i = 1, 2, 3$ обеспечивают исполнительное управление. На уровне стабилизации в качестве управляющих сигналов v_i приняты сигналы изменения углов отклонения руля высоты, руля направления и элеронов.

В работе представлен алгоритм оптимизации обобщенного управления многоуровневой АСУ на основе разработанного метода иерархического уравновешивания по Штакельбергу, в котором обобщается известное понятие стратегии по Штакельбергу в классе иерархических дифференциальных игр (ИДИ).

Определение и структурные свойства иерархического равновесия в многоуровневых системах управления с обобщением стратегии Штакельберга [1, 2, 7]. В отличие от известных результатов и в соответствии со структурным требованием многоуровневой СУ каждый верхний уровень представляет собой структурированную ММС с исходной структурной несогласованностью (рис. 7).

На рис. 7 сохранены традиционные обозначения двухступенчатой дифференциальной игры центра и исполнительной системы (ИС). Но

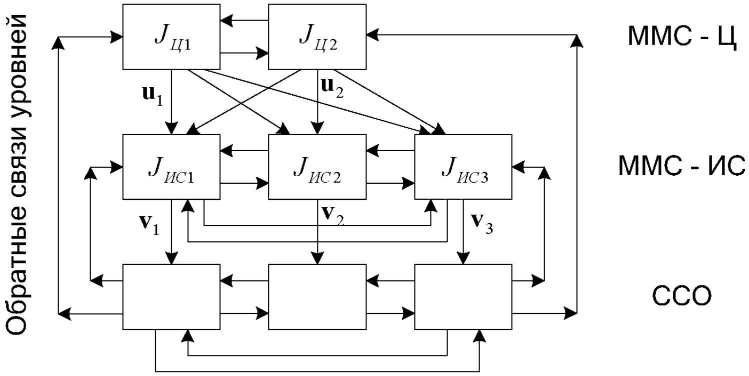

Рис. 7. Структурная схема двухуровневой трехподсистемной ИДИ: верхний уровень — ММС–центр (ММС-Ц); нижний уровень — ММС–исполнительная система (ММС–ИС); структурно-сложный объект (ССО)

в соответствии, например, с двухуровневой структурой управления–регулирования (см. рис. 2) верхний уровень может иметь смысл ММС. Таким образом, в настоящей работе имеет место обобщение двухступенчатой ИДИ [1, 6].

Структурно сложный объект (ССО) имеет математическую модель

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{u}), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{x} \in \mathbf{E}^n, \tag{4}$$

где $\mathbf{v}$ — исполнительное управление с распределенным исполнением (см. рис. 7)

$$\begin{aligned} &\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3), \quad \dim v_i = m_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad v_i \in \mathbf{V}_i \subset \mathbf{E}^{m_i}, \\ &\dim \mathbf{v} = m = \sum_{i=1}^{3} m_i, \quad \mathbf{v} \in \mathbf{V} = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 \times \mathbf{V}_3 \subset \mathbf{E}^m. \end{aligned} \tag{5}$$

Управление–координация ММС–Ц

$$\begin{aligned} &\mathbf{u} = (u_1, u_2), \quad \dim u_l = k_l \geq 3, \quad u_l \in \mathbf{U}_l \subset \mathbf{E}^{k_l}, \\ &\dim \mathbf{u} = k = \sum_{l} k_l, \quad \mathbf{u} \in \mathbf{U} = \mathbf{U}_1 \times \mathbf{U}_2 \subset \mathbf{E}^k. \end{aligned} \tag{6}$$

При распределенной координации $\mathbf{u}$, связанной с одной из подсистем ММС–ИС (рис. 2), последнее неравенство может не выполняться.

Структурно и функционально связанные задачи ММС–Ц и ММС–ИС характеризуются соответственно функциями эффективности

$$J_{\text{ц}\,l} = J_{\text{ц}l}(\mathbf{v}, \mathbf{u}), \quad l = 1,\ 2; \quad J_{\text{ИС}i} = J_{\text{ИС}i}(\mathbf{v}, \mathbf{u}), \quad i = 1, 2, 3. \tag{7}$$

Общая структура показателей (7) имеет вид

$$J_{ji} = \Phi_{ji}(\mathbf{x}, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} f_{ji}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v})\, dt, \quad i = 1, 2, 3; \quad j = (\text{ц, ИС}). \tag{8}$$

Определение 2. (Иерархическое равновесие по Штакельбергу — ИРИДИШ). Структурные свойства иерархического равновесного решения двухуровневой ИДИ с обобщением стратегии Штакельберга составляют следующую трехэтапную процедуру получения обобщенного управления.

На первом этапе ММС–Ц на "правах первого хода" сообщает ММС–ИС свою координацию в форме закона-стратегии $\mathbf{u}(t, \mathbf{x}) \in \mathbf{U}$ для каждой позиции из множества $\{t, \mathbf{x}\}$.

На втором этапе на уровне ММС–ИС формируется отображение $\mathbf{R} : \mathbf{U} \to \mathbf{V}$ такое, что при каждом фиксированном $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$

$$\max_{\mathbf{v}\in\mathbf{V}} \varphi_{\text{ИС}} \left(J_{\text{ИС}1}(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \ldots, J_{\text{ИС}3}(\mathbf{u}, \mathbf{v})\right) = \\ = \varphi_{\text{ИС}} \left(J_{\text{ИС}1}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}), \ldots, J_{\text{ИС}3}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru})\right). \quad (9)$$

Конкретный вид функции $\varphi_{\text{ИС}}$ определяется на множестве степеней конфликтности подсистем ММС–ИС (антагонизм, бескоалиционный или коалиционный конфликт, кооперация).

На третьем этапе, который развивает стратегию Штакельберга и обобщает ИРИДИШ, ММС–Ц выбирает решение

$$\max_{\mathbf{u}\in\mathbf{U}} \varphi_{\text{ц}} \left(J_{\text{ц}1}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}), \ldots, J_{\text{ц}3}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru})\right) = \\ = \varphi_{\text{ц}} \left(J_{\text{ц}1}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}), \ldots, J_{\text{ц}3}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru})\right). \quad (10)$$

Конкретный вид функции $\varphi_{\text{ц}}$ определяется на множестве степеней конфликтности подсистем ММС–Ц. Набор $\{\mathbf{u}^r, \mathbf{Ru}\}$ определяется как ИРИДИШ.

Замечание 1. В общем случае управление-координация $\mathbf{u}$ ММС–Ц и исполнительное управление $\mathbf{v}$ ММС–ИС являются обобщенными векторами $\mathbf{u}(t, \mathbf{x}), \mathbf{v}(t, \mathbf{x})$ соответственно с набором показателей-требований.

Замечание 2. Функции $\varphi_{\text{ц}}, \varphi_{\text{ИС}}$ являются, например, функциями балансировки на уровнях на основе уравновешивания по Нэшу.

Замечание 3. Для обеспечения на ММС-уровнях балансировки с последующей Парето-оптимизацией функций $J_{\text{ИС}}$ и $J_{\text{ц}}$ с учетом арбитражной схемы Нэша (АСН) функции $\varphi_{\text{ц}}, \varphi_{\text{ИС}}$ принимают более общий вид: на втором шаге формируется $\mathbf{R}_{\text{АСН}}(\mathbf{u}) = \mathbf{v}^{\text{АСН}}$, а на третьем вводится дополнительная операция

$$J_{\text{ц}}\left(\mathbf{u}^{\Pi}, \mathbf{R}_{\text{АСН}}(\mathbf{u}^{\Pi})\right) = \max_{u} \prod_{l} \left[J_{\text{ц}l} - J_{\text{ц}l}\left(\mathbf{u}^r, \mathbf{R}_{\text{АСН}}(\mathbf{u}^r)\right)\right], \quad l = \overline{1, 2},$$

где $\mathbf{u}^{\Pi}$ — оптимально по Парето.

Замечание 4. В двухуровневой задаче наведения–стабилизации (см. рис. 2) при заданных функциональных связях $\mathbf{u} = \mathbf{F}_{\mathbf{u}}(\mathbf{k}, \mathbf{x})$ и $\mathbf{v} = \mathbf{F}_{\mathbf{v}}(\mathbf{k}, \mathbf{x})$ координация формируется вектором параметров

$\mathbf{k}_{\text{ц}} = (k_y, k_k)$, а исполнительное управление определяется вектором параметров $\mathbf{k}_{\text{ИС}} = (k_{\text{ДГ}}, k_{\text{ДЛУ}})$.

Замечание 5. При указанном обобщении функций $\varphi_{\text{ц}}, \varphi_{\text{ИС}}$ (*Замечание 3*), координация будет иметь смысл $\mathbf{u}^{\Pi}$ при условии $\mathbf{R}_{\text{АСН}}(\mathbf{u}) = \mathbf{v}^{\text{АСН}}$.

Методика формирования обобщенного управления двухуровневой системой на основе ИРИДИШ в бескоалиционном варианте балансировки ММС уровней. Вводится в рассмотрение отображение, имеющее смысл уравновешивания по Нэшу,

$$\mathbf{Ru}\|v_i = \begin{cases} v_1, \mathbf{R}_2\mathbf{u}, \mathbf{R}_3\mathbf{u} & \text{при } i = 1; \\ \mathbf{R}_1\mathbf{u}, v_2, \mathbf{R}_3\mathbf{u} & \text{при } i = 2; \\ \mathbf{R}_1\mathbf{u}, \mathbf{R}_2\mathbf{u}, v_3 & \text{при } i = 3; \end{cases} \tag{11}$$

$$\mathbf{Ru} = (\mathbf{R}_1\mathbf{u}, \mathbf{R}_2\mathbf{u}, \mathbf{R}_3\mathbf{u}), \quad \mathbf{u} = (u_1, u_2). \tag{12}$$

В соответствии со вторым этапом получения ИРИДИШ (9) при условии, что $\varphi_{\text{ИС}}$ реализует операцию бескоалиционной конфликтной ситуации, на уровне ММС–ИС формируются три отображения $\mathbf{R}_i : \mathbf{U} \to v_i$, $i = 1, 2, 3$, такие, что

$$J_{\text{ИС}i}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}) = \max_{v_i \in \mathbf{V}_i} J_{\text{ИС}i}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}\|v_i), \quad i = 1, 2, 3. \tag{13}$$

В этом случае (12) реализует равновесное решение с индексом r при фиксированной допустимой координации $\mathbf{u}$

$$\mathbf{R}(\mathbf{u}) = \mathbf{v}^r = (v_1^r = \mathbf{R}_1\mathbf{u},\ v_2^r = \mathbf{R}_2\mathbf{u},\ v_3^r = \mathbf{R}_3\mathbf{u}). \tag{14}$$

Далее в соответствии с третьим этапом (10) формируется $\varphi_{\text{ц}}$

$$J_{\text{ц}\,l}(\mathbf{u}^r, \mathbf{Ru}^r) = \max_{u_l} J(\mathbf{u}\|u_l,\ \mathbf{R}(\mathbf{u}\|u_l)) = \\ = \max_{u_l} J(\mathbf{u}\|u_l,\ \mathbf{v}^r(\mathbf{u}\|u_l)),\ l = \overline{1,2}, \tag{15}$$

где

$$\mathbf{u}^r = (u_1^r, u_2^r); \tag{16}$$

$$\mathbf{u}\|u_l = \begin{cases} u_1, u_2^r & \text{при } l = 1; \\ u_1^r, u_2 & \text{при } l = 2. \end{cases} \tag{17}$$

где (17) означает уравновешивание по Нэшу на верхнем уровне.

Функция $\mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v})$ в (4) определена на $\mathbf{E}^n \times \mathbf{E}^m \times \mathbf{E}^k$ со значениями в $\mathbf{E}^n$. В общем случае определено множество возможных состояний системы $\mathbf{X} \subset \mathbf{E}^n$, т.е. задано ограничение типа $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$. Допустимые стратегии $\mathbf{v}(t, \mathbf{x})$ и $\mathbf{u}(t, \mathbf{x})$ удовлетворяют следующим условиям.

1. Для любого набора $\mathbf{u}(t, \mathbf{x}), \mathbf{v}(t, \mathbf{x})$ существует единственное абсолютно непрерывное решение $\mathbf{x}(t)$ системы (4).

2. $v_i = v_i(t, \mathbf{x})$ и $u_l = u_l(t, \mathbf{x})$, $i = \overline{1,3}$, $l = \overline{1,2}$ принадлежат множеству измеримых по Борелю функций (кусочно-непрерывные функции

с конечным числом точек разрыва первого рода) со значениями в $\mathbf{E}^{m_i}$ и $\mathbf{E}^{k_l}$ соответственно.

3. $v_i \in \mathbf{V}_i$, $u_l \in \mathbf{U}_l$ для всех $t \in [t_0, t_K]$, $i = 1, 2, 3$, $l = 1,\ 2$ и $\mathbf{V}_i\,(t, \mathbf{x})$, $\mathbf{U}_l\,(t, \mathbf{x})$ — многозначные функции, которые каждому моменту времени $t \in [t_0, t_K]$ и любому $\mathbf{x} \in \overline{\mathbf{X}}$ ставят в соответствие некоторое подмножество пространств $\mathbf{E}^{m_i}$ и $\mathbf{E}^{k_l}$.

Решение задачи синтеза оптимального закона обобщенного управления двухуровневой системы ММС–Ц, ММС–ИС в линейно-квадратической постановке [2, 6, 7, 9]. Пусть линейная модель ССО задана в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}_{\text{ц}1}(t)u_1 + \mathbf{B}_{\text{ц}2}(t)u_2 + \\ + \mathbf{B}_{\text{ИС}1}(t)v_1 + \mathbf{B}_{\text{ИС}2}(t)v_2 + \mathbf{B}_{\text{ИС}3}(t)v_3, \quad (18)$$

где $\mathbf{u}$ — управление-координация ММС–Ц: $\mathbf{u} \in \mathbf{U} = \mathbf{U}_1 \times \mathbf{U}_2$, $u_l \in \mathbf{U}_l \subset \mathbf{E}^{m_l}$, $l = \overline{1, 2}$; $\mathbf{v}$ — исполнительное управление ММС–ИС: $\mathbf{v} \in \mathbf{V} = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 \times \mathbf{V}_3$, $v_i \in \mathbf{V}_i \subset \mathbf{E}^{m_i}$, $i = \overline{1, 3}$; $\mathbf{x}$ — вектор состояния ССО, $\mathbf{x} \in \mathbf{E}^n$.

Функции эффективности подсистем ММС–Ц, связанных через ССО (18), имеют вид

$$J_{\text{ц}l}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \mathbf{x}^{\text{T}}(t_k)\mathbf{C}_l\mathbf{x}(t_k) + \int\limits_{t_0}^{t_k} \left[\mathbf{x}^{\text{T}}\mathbf{Q}_l(t)\mathbf{x} + u_l^{\text{T}}\mathbf{D}_l(t)u_l\right] dt, \quad l = 1, 2. \quad (19)$$

Функции эффективности подсистем ММС–ИС, связанных через ССО (18) с координациями ММС-Ц $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$,

$$J_{\text{ИС}i}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \mathbf{x}^{\text{T}}(t_k)\mathbf{C}_i\mathbf{x}(t_k) + \\ + \int\limits_{t_0}^{t_k} \left[\mathbf{x}^{\text{T}}\mathbf{Q}_i(t)\mathbf{x} + 2\mathbf{u}^{\text{T}}\mathbf{P}_i(t)v_i + v_i^{\text{T}}\mathbf{D}_i(t)v_i\right] dt, \quad i = 1, 2, 3, \quad (20)$$

где $\mathbf{u}^{\text{T}}\mathbf{P}_i(t) = [u_1^{\text{T}}\mathbf{P}_{i1}(t) + u_2^{\text{T}}\mathbf{P}_{i2}(t)]$ — влияние координации в показателях.

Здесь $t_0, t_k = \text{const} > 0$; элементы всех матриц непрерывны при $t \in [t_0, t_k]$; матрицы $\mathbf{C}_l, \mathbf{C}_i$, $l = 1, 2$, $i = \overline{1, 3}$ постоянны; матрицы $\mathbf{C}_l, \mathbf{C}_i, \mathbf{Q}_l, \mathbf{Q}_i, \mathbf{D}_l, \mathbf{D}_i$, $l = 1, 2$, $i = \overline{1, 3}$ симметричны, а матрицы $\mathbf{D}_l, \mathbf{D}_i$, $l = 1, 2$, $i = \overline{1, 3}$ определенно отрицательны.

Оптимальные структуры управлений u_l, v_i подсистем ММС–Ц и ММС–ИС при обобщенном равновесии по Штакельбергу получены в виде [1, 4, 6]

$$u_l(t, \mathbf{x}) = \mathbf{K}_{u_l}(t) \cdot \mathbf{x}, \quad v_i(t, \mathbf{x}) = \mathbf{K}_{v_i}(t) \cdot \mathbf{x}, \quad l = 1, 2, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (21)$$

где матрицы $\mathbf{K}_l, \mathbf{K}_i$ непрерывны.

Данный вариант с параметрической настройкой исследован в работах [2, 6, 7]. При показателях общего вида в линейном варианте математической модели наведения–стабилизации и, тем более, при нелинейной модели данной двухуровневой задачи возникает проблема решения задачи синтеза в форме получения ИРИДИШ на основе системы функциональных уравнений Гамильтона – Келли [1].

Определенное приближение в методах получения ИРИДИШ, которое позволяет решить задачу в общем случае описания (4)–(8), основывается на стратегиях в виде приближенного программно-корректируемого закона управления (ПКЗУ) и его параметризации на программном такте ПКЗУ [6, 7].

Тогда в соответствии с параметризацией, например, координаций ММС–Ц скалярная компонента вектора управления $u_i, i = 1, 2$ ММС–Ц на такте ПКЗУ принимает вид [3, гл. 1]

$$u_{is} = q^i_{1s}[t_1 - t_0] + q^i_{2s}[t_2 - t_1] + \ldots + q^i_{ks}[t_k - t_{k-1}], \tag{22}$$

управление u_{is} преобразуется в вектор параметров q^i_s

$$u_{is} \longrightarrow q^i_s \in Q_{is}, \quad i = 1, 2, \quad s = 1, 2, \ldots, \tag{23}$$

где $q^i_s \in Q_{is}$ — подвектор параметров скалярной компоненты u_{is} i-го вектора координации ММС–Ц:

$$\begin{gathered} Q_{is} = \left\{ \begin{array}{l} q^i_{sL} \le q^i_s \le q^i_{sH}; \\ C_{si} q^i_s \le b^i_s \end{array} \right\}, \quad q^i_{sL}, q^i_{sH} \in E^{(r_i)}; \\ C_{si} = [s_i \times r_i]; \quad b^i = [s_i \times 1]; \quad i = 1, 2; \quad s = 1, 2, \ldots \end{gathered} \tag{24}$$

С учетом (22)–(24) можно получить оптимальное управление по ИРИДИШ на такте ПКЗУ, применяя численные методы.

В другом варианте на основе замечания 4 структуры $\mathbf{u}, \mathbf{v}$ на уровнях наведения и стабилизации являются известными функциональными связями с вектором параметров пространства состояний и управляющими параметрами на каждом уровне:

$$u_1 = u_1(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t); \quad u_2 = u_2(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t);$$

$$v_1 = v_1(\mathbf{k}, \mathbf{u}, \mathbf{x}, t); \quad v_2 = v_2(\mathbf{k}, \mathbf{u}, \mathbf{x}, t); \quad v_3 = v_3(\mathbf{k}, \mathbf{u}, \mathbf{x}, t),$$

где $\mathbf{k} = (\mathbf{k}_{\text{ц}}, \mathbf{k}_{\text{ИС}})$, при этом оптимальные равновесные показатели будут являться функциями от управляющих параметров $J_{\text{ц}l} = J_{\text{ц}l}(\mathbf{k}_{\text{ц}}, \mathbf{k}_{\text{ИС}})$, $l = 1, 2$; $J_{\text{ИС}i} = J_{\text{ИС}i}(\mathbf{k}_{\text{ц}}, \mathbf{k}_{\text{ИС}})$, $i = \overline{1, 3}$.

В данном варианте задача сводится к параметрической оптимизации в форме иерархического уравновешивания с поуровневой балансировкой, в соответствии с *Замечанием 3* и с обеспечением Парето-оптимального решения.

Алгоритмическое обобщение задачи получения оптимального управления двухуровневой системой “наведение–стабилизация” на основе адаптации оптимальных параметров системы стабилизации от перегрузок ЛА на уровне наведения. При обобщении показателей (19) и (20) решение системы уравнений Гамильтона – Келли [1] связано со значительными аналитическими и вычислительными сложностями. Для того чтобы решать задачу оптимизации в двухуровневой многоканальной системе “наведение–стабилизация” в данном обобщении используются следующие возможности.

Из описания модели замкнутой двухуровневой многоканальной системы в соответствии с *Замечанием 4* на обоих уровнях иерархии выявляются функциональные связи с параметрами на каждом из уровней $\mathbf{u} = \mathbf{F_u}(\mathbf{k}, \mathbf{x})$ и $\mathbf{v} = \mathbf{F_v}(\mathbf{k}, \mathbf{x})$, где $\mathbf{k} = (\mathbf{k}_{\text{ц}}, \mathbf{k}_{\text{ИС}})$.

Исходя из предыдущего тезиса, можно напрямую, не решая системы уравнений Гамильтона – Келли в целях получения управлений на каждом уровне системы, осуществить переход к параметрической оптимизации вектора **k** на иерархических уровнях на основе стратегии Штакельберга или ее равновесно-арбитражного обобщения на уровнях.

Для упрощения процедуры получения оптимальных управляющих параметров **k** на уровне стабилизации формируется база данных, описывающая адаптивную зависимость оптимизированных на основе равновесно-арбитражной схемы управляющих параметров системы стабилизации от координаций уровня наведения.

Полученные из описания модели зависимости позволяют уйти от решения уравнения Гамильтона на втором и третьем этапах получения ИРИДИШ, что значительно упрощает задачу получения обобщенных иерархических равновесий при рассмотрении многоуровневых и многоканальных систем. Данные управления не являются оптимальными, но благодаря параметрической настройке осуществляется их оптимизация.

Таким образом, можно упростить алгоритм оптимизации двухуровневой системы управления. В ходе параметрической оптимизации параметры на уровне стабилизации получаются путем выбора из базы данных, полученной в результате решения задачи оптимизации системы стабилизации на основе равновесно-арбитражного алгоритма [4].

Получение базы данных адаптивных зависимостей параметров системы стабилизации $\mathbf{k}_{\text{ИС}} = (\mathbf{k}_{\text{ДГ}}, \mathbf{k}_{\text{ДЛУ}})$ от сигналов координации. В рассматриваемой прикладной задаче наведения-стабилизации противокорабельной ракеты [8] каналы системы стабилизации при наличии перекрестных связей (см. рис. 4) необходимо бескоалиционно сбалансировать по J_i $(i = 1, 2, 3)$ устойчивости, качеству, точности и быстродействию в каждом канале, а затем результат спроектировать в точку Парето-границы множества значений отображения

$J_{\text{ИС}}(\mathbf{k})$, наиболее близко к сбалансированной точке уравновешивания $J^r = (J_1^r, J_2^r, J_3^r)$, где r — индекс равновесия.

Таким образом, на уровне системы стабилизации осуществляется оптимизация управления ММС. За основу метода оптимизации берется метод получения обобщенного компромисса на основе последовательного применения бескоалиционного и кооперативного "взаимодействия" каналов ССт [4].

Для трехканальной ССт арбитражная схема Нэша имеет вид при $q \in Q$

$$\Phi_A = \left[J^1(q) - J^{r1}(q^r)\right]\left[J^2(q) - J^{r2}(q^r)\right]\left[J^3(q) - J^{r3}(q^r)\right] \to \min_q \qquad (25)$$

при условиях $J^i(q) \le J^{ri}(q^r)$, $i = 1, 2, 3$. Эта схема дает результат в точке области Парето, наиболее близкой к точке балансировки ММС. В этом заключается смысл обобщенного СТЭК применяемого в задаче оптимизации двухканальной системы. Проведенный анализ методов оптимизации ММС позволяет сформировать следующую трехэтапную алгоритмическую структуру обобщенного СТЭК в задаче оптимизации многоканальной системы "наведение–стабилизация" с перекрестными связями с обеспечением балансировки и предельной эффективности.

Этап 1. Получение параметров системы стабилизации в каждом канале ССт (начальные приближения для равновесно-арбитражной оптимизации каналов ССт).

Этап 2. Нахождение балансировочного параметрического решения на основе равновесия по Нэшу.

Этап 3. Парето-оптимизация параметрического решения ССт на основе арбитражной схемы Нэша.

Рассматриваемая в ходе исследования опорная траектория разбивается на отрезки, содержащие монотонное и незначительное изменение скоростного напора (q) и заданных перегрузок в каналах тангажа, рыскания (Nyz, Nzz), в целях соблюдения принципа замороженных коэффициентов, с учетом которого были получены выражения перекрестных связей. На отрезке выбирается определенное — среднее — значение скоростного напора. Значения остальных параметров опорной траектории импортируются в схему как функции времени на данном интервале. На каждом интервале осуществляется оптимизация системы стабилизации при отработке внешних возмущений и внешних управляющих воздействий. Результатом исследования системы стабилизации на всей опорной траектории будет получение оптимальных зависимостей параметров ССт в зависимости от перегрузок в продольном и боковом каналах (рис. 8).

Систему стабилизации считаем уравновешенной по возмущениям. Поэтому в ходе оптимизации управления с учетом межуровневых

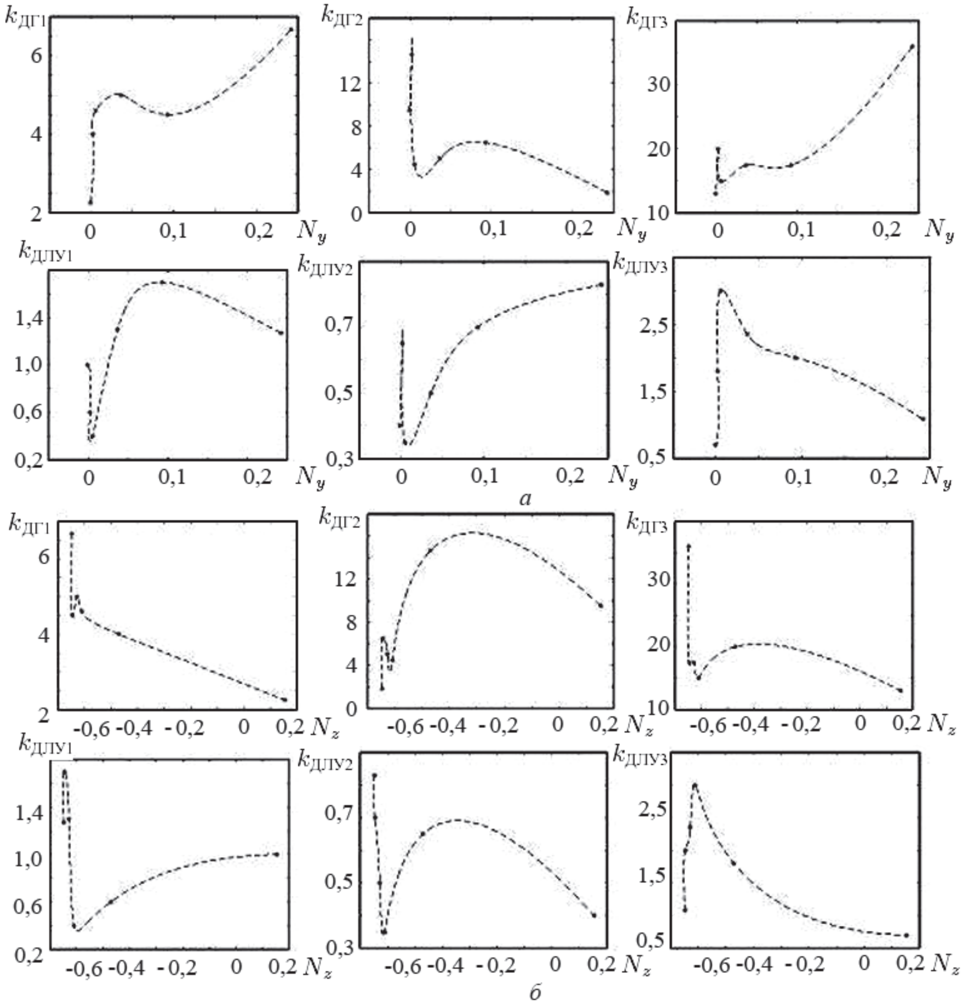

Рис. 8. Оптимальные значения параметров ССт в зависимости от перегрузок в продольном (*а*) и боковом (*б*) каналах

координаций на основании функции зависимости управляющих параметров на уровне стабилизации от величины перегрузки в каждом из каналов значения $k_{ДЛУ i}, k_{ДГ i}$, $i = 1, 2, 3$ будут выбираться на основании зависимостей, полученных в результате исследования системы стабилизации и получения оптимальных параметров при отработке внешних возмущений и внешних управляющих воздействий.

Исследование структуры оптимальной взаимосвязи высокоманевренной траектории противокорабельной ракеты с динамическими свойствами перекрестных каналов наведения и оптимальной трехканальной ССт. Оптимизацию двухуровневой системы будем проводить по параметрам в двух каналах системы наведения с фиксированными параметрами в каналах системы стабилизации, принимая в рассмотрении ситуацию, когда система стабилизации сбалансирована по наведению и ее параметры выбираются из уже полученных в результате оптимизации системы стабилизации (рис. 9, 10). На основании полученных данных переходим к исследованию иерархической системы “наведение–стабилизация” на соответствующих интервалах времени.

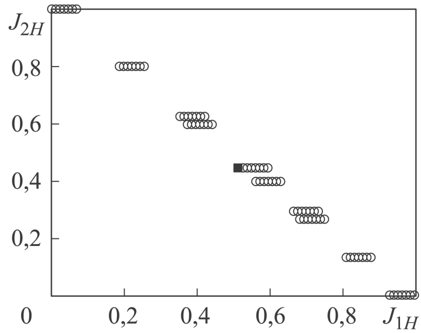

Рис. 9. Область показателей двухканальной системы наведения с учетом оптимальных параметров системы стабилизации

В качестве примера рассмотрим результаты параметрической оптимизации на уровне наведения для одного из интервалов времени на опорной траектории. Параметры системы стабилизации на этом интервале времени и при соответствующих перегрузках на опорной траектории примем равными:

$$[k_{\text{ДЛУ}1}, k_{\text{ДГ}1}, k_{\text{ДЛУ}2}, k_{\text{ДГ}2}, k_{\text{СГ}3}, k_{\text{ДГ}3}]^{\text{T}} = [0{,}85,\ 5{,}33,\ 1{,}17,\ 9,\ 1{,}6,\ 14{,}7]^{\text{T}}.$$

Варьируя параметры в каналах системы наведения, решаем систему дифференциальных уравнений, описывающих двухуровневую иерархическую систему перекрестными связями, с учетом принятых управлений на уровнях иерархии в соответствии с обобщением задачи получения оптимального решения для сети значений параметров на

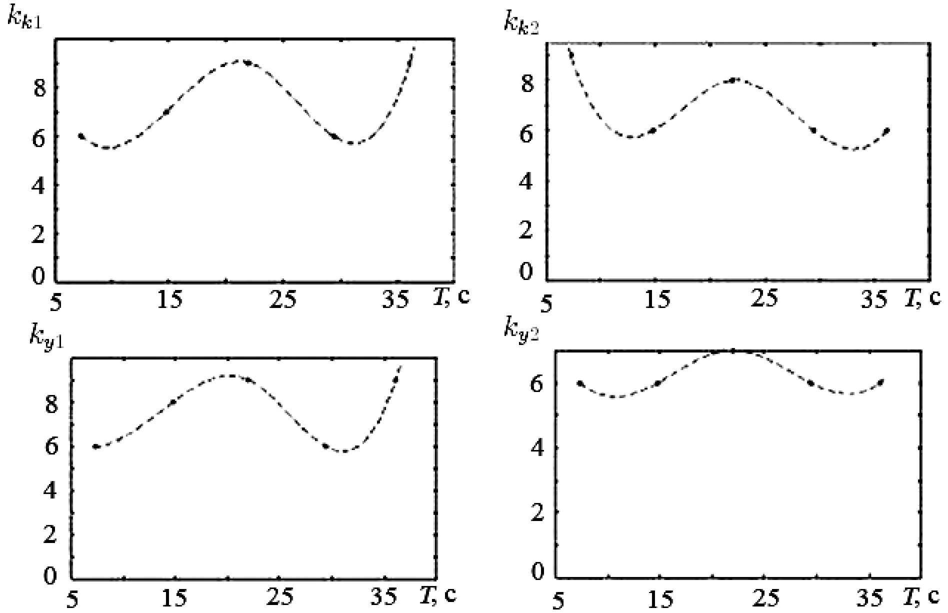

Рис. 10. Оптимальные значения параметров уровня наведения в зависимости от моментов времени

уровне наведения. Формируем область показателей для системы наведения, на которой на основании равновесно-арбитражной схемы Нэша находим решения оптимальные по Парето. Осуществляем программный поиск оптимальной точки на Парето-границе в соответствии с условием Салуквадзе.

Значения минимизируемых критериев в точке СТЭК (арбитражная схема Нэша):

$$J_{1H} = 0{,}4831; \quad J_{2H} = 0{,}4461$$

при значениях оптимизируемых параметров: $[k_{k1},\ k_{y1},\ k_{k2}, k_{y2}]^{\mathrm{T}} = [9,\ 9,\ 8, 7]^{\mathrm{T}}$.

Полученные результаты имеют важное практическое значение. В ходе получения законов управления учитывается влияние наведения на стабилизацию ЛА, осуществляется одновременная оптимизация на обоих уровнях иерархии, что значительно увеличивает качество наведения и стабилизации.

Аналогично исследованию системы стабилизации осуществляется исследование двухуровневой системы "наведение–стабилизация" на всем протяжении опорной траектории с учетом оптимальных параметров ССт, сбалансированной по наведению. В результате получены функции изменения оптимальных параметров системы наведения при движении по опорной траектории.

Заключение. Сформирована двухуровневая математическая модель иерархической системы "наведение–стабилизация" ЛА с учетом перекрестных связей на уровнях.

Разработан метод многокритериальной оптимизации иерархической системы "наведение–стабилизация" на основе координируемых компромиссов с учетом связей оптимальных параметров системы стабилизации с перегрузкой — координацией верхнего уровня в процессе двухуровневой оптимизации.

Разработана методика оценки влияния траекторных параметров на динамические свойства перекрестных связей трехканальной ССт и двухканальной системы наведения ЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронов Е.М.*, *Карпунин А.А.*, *Серов В.А.* Иерархическое равновесие в многоуровневых системах управления // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2008. № 4. С. 18–29.
2. *Воронов Е.М.*, *Карпунин А.А.*, *Серов В.А.* Алгоритмы иерархической оптимизации в двухуровневой многоканальной задаче управления–регулирования // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2009. № 3. С. 1–18.
3. *Воронов Е.М.* Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными на основе стабильно-эффективных компромиссов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 576 с.

4. *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.
5. *Воронов Е.М.*, *Ефремов В.А.*, *Сычев С.И.*, *Любавский К.К.*, *Тихонов М.* Многокритериальная оптимизация сложной трехканальной системы стабилизации летательного аппарата в форме равновесно-арбитражного компромисса // Труды XV Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”. Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. С. 208–217.
6. *Ванин А.В.*, *Воронов Е.М.*, *Карпунин А.А.* Оптимальное управление в двухуровневой иерархической многоканальной системе “стабилизация–наведение” // Проблемы управления в сложных системах: Труды XV Международной конференции. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН. 2013. С. 217–223.
7. *Ванин А.В.*, *Воронов Е.М.*, *Карпунин А.А.* Оптимизация управления в двухуровневой иерархической системе стабилизации–наведения летательного аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2012. № 11. С. 19–42.
8. *Лебедев А.А.*, *Карабанов В.А.* Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1965. 528 с.
9. *Вайсборд Э.М.*, *Жуковский В.И.* Введение в дифференциальные игры нескольких лиц и их приложения. М.: Сов. радио, 1980. 304 с.

REFERENCES

[1] Voronov E.M., Karpunin A.A., Serov V.A. Hierarchical Balance in Multi-Level Control Systems. *Vestn. RUDN. Inzh. Issled. (Inf. Tekhnol. Upr.)* [Bull. People’s Friendship Univ. Eng. Research (Inf. Technol. Control)], 2008, no. 4, pp. 18–29 (in Russ.).

[2] Voronov E.M., Karpunin A.A., Serov V.A. Algorithms of Hierarchical Optimization in Two-Level Multichannel “Control–Regulation” Problem. *Vestn. RUDN. Inzh. Issled. (Inf. Tekhnol. Upr.)* [Bull. People’s Friendship Univ. Eng. Research (Inf. Technol. Control)], 2009, no. 3, pp. 1–18 (in Russ.).

[3] Voronov E.M. Metody optimizatsii upravleniya mnogoob’ektnymi mnogokriterial’nymi na osnove stabil’no-effektivnykh kompromissov [Methods of Optimization of the Multiobject Multicriterion System Control Based on Stable-Effective Compromises]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2001. 576 p.

[4] Aksenov A.S., Voronov E.M., Lyubavskiy K.K., Sychev S.I. Multi-Criterion Parametric Optimization of the Triple Channel Stabilizing System of an Aircraft with Cross-Coupling. *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.).

[5] Voronov E.M., Efremov V.A., Sychev S.I., Lyubavskiy K.K., Tikhonov M. Multi-Criterion Optimization of the Complex Triple Channel Stabilizing System of an Aircraft in the Form of Equilibrium-Arbitrage Compromise. *Tr. XV Mezhdunar. Konf. “Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh”* [Issues of Control and Modeling in Complex Systems]. Samara, Samara Scientific Center RAS, 2013, pp. 208–217 (in Russ.).

[6] Vanin A.V., Voronov E.M., Karpunin A.A. Optimal Control in the Two Level Hierarchical System of “Guidance-Stabilization”. *Problemy upravleniya v slozhnykh sistemakh. Tr. XV Mezhdunar. Konf.* [Issues of Control in Complex Systems: Proceedings of the XV International Conference]. Samara, Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ. 2013, pp. 217–223 (in Russ.).

[7] Vanin A.V., Voronov E.M., Karpunin A.A. Control optimization in two-level stabilization–aircraft guidance hierarchical system. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.*, *Spetsvyp. no. 11* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng., Spec. Issue no. 11], 2009, pp. 19–42 (in Russ.).

[8] Lebedev A.A. Karabanov V.A. Dinamika sistem upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Dynamics of Unmanned Aircraft Control Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 528 p.

[9] Vaysbord E.M., Zhukovskiy V.I. Vvedenie v differentsial'nye igry ne-skol'kikh lits i ikh prilozheniya [Introduction of a Few Individuals and Their Applications to Differential Games]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1980. 304 p.

Статья поступила в редакцию 24.02.2015

Ванин Александр Викторович — аспирант кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер-программист ОАО “Корпорация “Комета”. Автор пяти научных работ в области наведения летательных аппаратов, управления в иерархических системах.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Vanin A.V. — Ph.D. student, Department of Automated Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, software engineer, OAO Kometa, author of 5 research publications in the fields of aircraft guidance, control in hierarchical systems.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Воронов Евгений Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 180 научных работ в области теории оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов, управления иерархическими системами.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Voronov E.M. — D.Sc. (Eng.), Professor of Engineering, Department of Automated Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, author of over 180 research publications in the fields of optimization theory of the control of multiobject multicriterion systems based on steadily effective compromises, and control of hierarchical systems.

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 государственного университета приборостроения и информатики. Автор более 100 научных работ в области теории многокритериальной оптимизации и принятия решений в условиях конфликта и неопределенности.

Московский государственный университет приборостроения и информатики, Российская Федерация, 115093, Москва, 1-й Щипковский пер., д. 23.

Serov V.A. — Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Control and Simulation of Systems Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science, author of over 100 publications in the fields of theory of multi-criteria optimization and decision making under conditions of conflict and uncertainty.

Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science, Pervy Shchipkovskiy pereulok 23, Moscow, 115093 Russian Federation.

Карпунин Александр Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области теории оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами, иерархическими системами и задач управления летательными аппаратами.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Karpunin A.A. — Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Engineering, Department of Automated Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, author of over 70 research publications in the fields of optimization theory of the control of multiobject multicriterion systems, hierarchical systems and problems of aircraft control.
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

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

Lyubavskiy K.K. — Ph.D. student, Department of Automated Control Systems, Bauman Moscow State Technical University.
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ванин А.В., Воронов Е.М., Серов В.А., Карпунин А.А., Любавский К.К. Оптимизация иерархической системы “наведение–стабилизация” летательного аппарата с адаптацией системы стабилизации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 4. С. 13–33.

Please cite this article in English as:

Vanin A.V., Voronov E.M., Serov V.A., Karpunin A.A., Lubavskiy K.K. Optimization of the hierarchical system of “guidance–stabilization” of the aircraft with the stabilization system adaptation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2015, no. 4, pp. 13–33.