

РАЗРАБОТКА МЕТОДА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КООРДИНИРОВАННЫХ СТАБИЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ КОМПРОМИССОВ

А.В. Ванин¹

mole@list.ru

Е.М. Воронов¹

emvoronov@mail.ru

В.А. Серов^{2,3}

ser_off@inbox.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация² Российский технологический университет (МИРЭА),

Москва, Российская Федерация

³ РАНХиГС, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Разработан метод оптимизации иерархической системы управления на базе алгоритма получения координированных стабильно-эффективных компромиссов. Сформированы свойства координирования нижнего уровня при оптимизации двухуровневой многоканальной системы управления летательного аппарата на основе координированных стабильно-эффективных компромиссов. Проведен анализ эффективности многокритериально оптимальной иерархической системы управления с учетом балансировки эффективности на основе поуровневых компромиссов и межуровневой координации. Сформированы дополнительные свойства координации параметризованной адаптивной системы нижнего уровня оптимальной системой верхнего уровня с коррекцией параметров нижнего уровня

Ключевые слова

Оптимизация, управление, двухуровневые иерархические системы, координация, исполнительное управление, регулирование

Поступила в редакцию 20.04.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Структура и модель двухуровневой системы. Рассмотрен метод оптимизации структурно и функционально сложных систем управления (СУ) [1–3]. Проанализирована возможность применения иерархических подходов к СУ летательных аппаратов (ЛА) в целях повышения качества наведения аппарата. В качестве уровней иерархии в рассматриваемой СУ ЛА выступают двухканальная система наведения ЛА и трехканальная система стабилизации (ССт) с перекрестными связями. Двухуровневая математическая модель системы наведения–стабилизации беспилотного ЛА (БЛА) с учетом перекрестных связей приведена на рис. 1.

Коэффициенты передачи устройства выработки команд каналов СУ (КСУ) k_{yl} , $l = 1, 2$, определяют качество метода пропорционального самонаведения. Управляющими сигналами на уровне системы наведения u_l , имеющими смысл координации для уровня ССт, являются заданные перегрузки, зависящие от параметров k_{yl} , k_{kl} , $l = 1, 2$, или обобщенные законы управления (рис. 2):

$$\begin{aligned} n_{y3} &= f_2 k_{ГС} k_{y1} k_{k1} f_1 (\varphi - \varphi_k) V / g; \\ n_{z3} &= f_2 k_{ГС} k_{y2} k_{k2} f_1 (\chi - \chi_k) V / g. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $k_{ГС}$ — коэффициент передачи устройства выработки команд головки самонаведения (ГС).

Описание каналов ССт (КССт), связанных с объектом управления, представим в виде систем уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{n}_{ys} &= k_{sny} (n_y - n_{y3}); \\ \dot{n}_{zs} &= k_{snz} (-n_z + n_{z3}); \\ \dot{\gamma}_s &= k_{s\gamma} (\gamma - \gamma_3); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} l_z &= n_{ys} + k_{ny} (n_y - n_{y3}); \\ l_y &= n_{zs} + k_{nz} (-n_z - n_{z3}); \\ l_x &= \gamma_s + k_{\gamma} (\gamma - \gamma_3); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\delta}_B &= \frac{l_z + k_{\omega z} \omega_z - 2T_{РП} \xi_{РП} \dot{\delta}_B - \delta_B}{T_{РП}^2}; \\ \ddot{\delta}_H &= \frac{l_y + k_{\omega y} \omega_y - 2T_{РП} \xi_{РП} \dot{\delta}_H - \delta_H}{T_{РП}^2}; \\ \ddot{\delta}_\Theta &= \frac{l_x + k_{\omega x} \omega_x - 2T_{РП} \xi_{РП} \dot{\delta}_\Theta - \delta_\Theta}{T_{РП}^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где n_{y3} , n_{z3} , γ_3 — заданные значения перегрузок и угла крена; v_i — управляющие сигналы, соответствующие углам поворота рулей ЛА ($\delta_B, \delta_H, \delta_\Theta$) (см. рис. 1), которые являются обобщенными или заданными функциями параметров — коэффициентов обратных связей ССт: коэффициенты датчиков линейных ускорений k_{ny} , k_{nz} , коэффициенты дифференцирующих гироскопов $k_{\omega x}$, $k_{\omega y}$, $k_{\omega z}$ и коэффициент свободного гироскопа k_{γ} , коэффициенты пропорционально-интегрального регулятора для обнуления статической погрешности по положению k_{sny} , k_{snz} , $k_{s\gamma}$; $T_{РП}$, $\xi_{РП}$ — параметры рулевого привода (РП) ЛА. В типичном случае существенна связь между каналами вращательного и поступательного движений ЛА, что определяет связь каналов стабилизации и наведения соответственно [4].

Математическая модель движения ЛА представлена моделью углового (вращательного) движения вокруг центра масс по углам тангажа, рыскания и крена с соответствующими воздействиями аэродинамического управления по нормальному ускорению j_n в каналах управления направлением скорости поступательного движения центра масс в вертикальной плоскости по углу наклона траектории Θ и в горизонтальной плоскости по углу поворота траектории Ψ .

Структурная схема двухуровневой двухканальной системы наведения–стабилизации ЛА с перекрестными связями (см. рис. 1) соответствует структурной схеме двухканальной системы наведения–стабилизации ЛА (см. рис. 2).

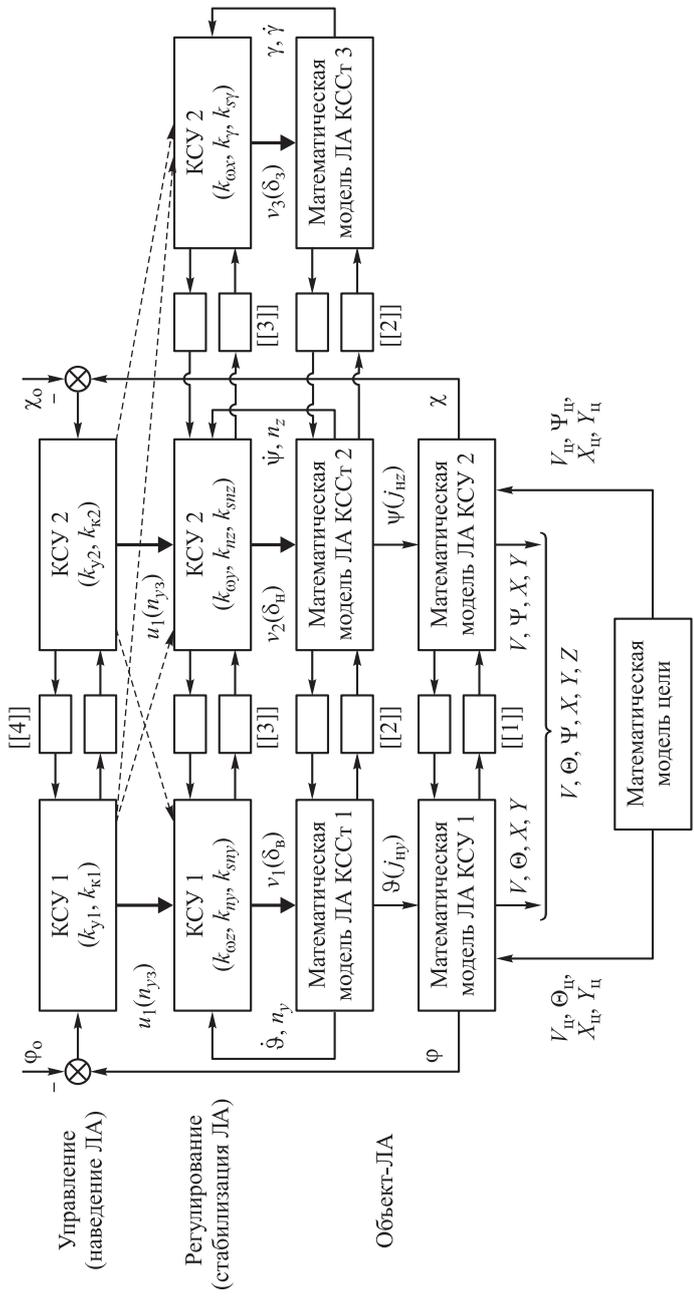


Рис. 1. Двухуровневая модель системы наведения-стабилизации трехканальной СУ ЛА [4]:

КСУ, КССт — каналы системы управления и системы стабилизации ЛА; $i_{1,2}$ — координирующие воздействия на систему стабилизации; $v_{1,2,3}$ — исполнительные управления ССт ЛА; ϑ, ψ — углы тангажа и рыскания; j_n — нормальные ускорения ЛА; $X, Y, Z (X_n, Y_n, Z_n)$ — координаты центра массы O_0 беспилотного ЛА (центра массы O_c ЛА-цели); $V, \Theta, \Psi (V_n, \Theta_n, \Psi_n)$ — координаты вектора скорости ЛА (ЛА-цели); φ — угол места между горизонтальной плоскостью X_0, O_0, Z_0 и линией визирования; χ — угол азимута между осью O_0, X_0 и проекцией линии визирования на X_0, O_0, Z_0 ; ϕ_0, χ_0, \dots — элементы опорной траектории; знаком $[[i]]$, $i = 1-4$, обозначены перекрестные связи в динамике поступательного движения центра массы БЛА, углового (вращательного) движения вокруг центра ЛА, между регуляторами ССт и в методе пространственного наведения ЛА

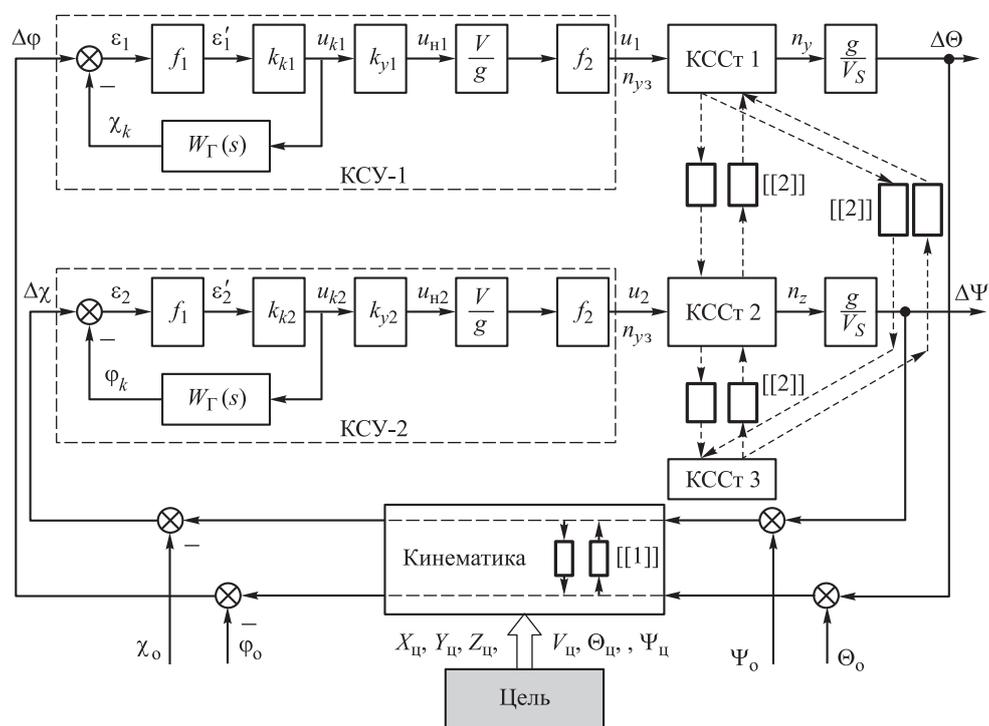


Рис. 2. Структурная схема двухканальной системы наведения–стабилизации ЛА:
 f_1, f_2 — функции ограничения сигнала ошибки и сигнала перегрузки; $W_{Г}$ — передаточная функция датчика момента и гиросtabilизатора, $W_{Г} = k_{ГC} / s$

В силу того, что КССт по углу крена обрабатывает только возмущающее воздействие, и на него не поступает сигнал наведения с уровня управления, на структурной схеме (см. рис. 2) отсутствует непосредственный координирующий сигнал на канал крена. Влияние канала крена на управляющие воздействия на каждом уровне иерархии учитывается в математическом описании ССт и через перекрестные связи на каждом уровне.

Замкнутая система в каналах наведения представляет собой координатор цели (КЦ) головки самонаведения ЛА на основе двухосного силового гироскопического стабилизатора. Коэффициенты k_{kl} являются коэффициентами передачи двухканального чувствительного элемента КЦ. Сформирован облик объекта управления, системы наведения и ССт.

Концепция обобщенной оптимизации многоуровневой системы управления. Метод оптимизации сформирован на основе комбинации методов проектирования иерархических распределенных систем управления (ИРСУ) для выбора оптимальной функциональной структуры ИРСУ (облика ИРСУ); методов оптимизации многообъектных многокритериальных систем (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 опти-

мизации межуровневой координации с приоритетом — «правом первого хода» каждого верхнего уровня в ИРСУ. Такая концепция позволяет сформулировать определение обобщенного оптимального управления в ИРСУ [1–6].

Определение 1. Назовем обобщенной оптимизацией многоуровневой автоматизированной системы управления (АСУ) такой способ оптимизации, который формируется на основе комбинации процессов:

- 1) многокритериального выбора оптимальной функциональной структуры АСУ (облика АСУ);
- 2) равновесно-арбитражной многокритериальной оптимизации ММС-уровней АСУ;
- 3) оптимизации межуровневой координации.

В качестве комментария к формированию структуры двухуровневой пятиканальной СУ наведения–стабилизации ЛА (см. рис. 1) следует отметить, что выбор функционального облика таких систем в настоящее время достаточно отработан [4, 7, 8]. Затем формируется итерационная процедура оптимизации управления на основе равновесно-арбитражного алгоритма (РАА) на ММС-уровнях и алгоритма получения межуровневых координаций на основе обобщенного иерархического уравнивания по Штакельбергу. На соответствующих уровнях выбираются параметры, которые обеспечивают балансировку и оптимальность по Парето на основе равновесно-арбитражной схемы стабильно-эффективного компромисса [5, 6, 9, 10]. Сигналы u_i , $i = 1, 2$, обеспечивают межуровневую координацию между уровнями управления и стабилизации, а сигналы v_i , $i = 1, 2, 3$, — исполнительное управление. На уровне стабилизации в качестве управляющих сигналов v_i приняты сигналы изменения углов отклонения руля высоты, руля направления и элеронов.

Далее представлен алгоритм оптимизации обобщенного управления многоуровневой АСУ на основе разработанного метода иерархического уравнивания по Штакельбергу, в котором обобщено понятие стратегии по Штакельбергу в классе иерархических дифференциальных игр (ИДИ).

Определение и структурные свойства иерархического равновесия в многоуровневых системах управления с обобщением стратегии Штакельберга. 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. 3). На структурной схеме сохранены традиционные обозначения двухступенчатой дифференциальной игры Центра и исполнительной системы (ИС). Но 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 [2, 5].

Структурно-сложный объект (ССО) описывается математической моделью

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{u}), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \mathbf{x} \in E^n, \quad (5)$$

где \mathbf{v} — исполнительное управление с распределенным исполнением (см. рис. 3),

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3), \dim v_i = m_i, i = 1, 2, 3, v_i \in \mathbf{V}_i \subset \mathbf{E}^{m_i},$$

$$\dim \mathbf{v} = m = \sum_{i=1}^3 m_i, \mathbf{v} \in \mathbf{V} = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 \times \mathbf{V}_3 \subset \mathbf{E}^m. \quad (6)$$

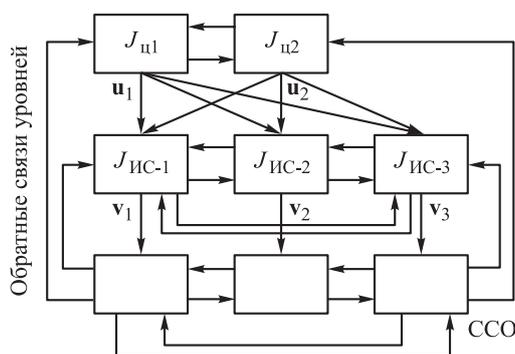


Рис. 3. Структурная схема двухуровневой трехподсистемной ИДИ:
 верхний уровень: ММС–Центр; нижний уровень: ММС–исполнительная система (ММС–ИС);
 ССО — структурно-сложный объект

Управление–координация ММС–Ц:

$$\mathbf{u} = (u_1, u_2), \dim u_l = k_l \geq 3, u_l \in \mathbf{U}_l \subset \mathbf{E}^{k_l},$$

$$\dim \mathbf{u} = k = \sum_l k_l, \mathbf{u} \in \mathbf{U} = \mathbf{U}_1 \times \mathbf{U}_2 \subset \mathbf{E}^k. \quad (7)$$

При распределенной координации \mathbf{u} , связанной с одной из подсистем ММС–ИС (см. рис. 3), неравенство в (7) может не выполняться.

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

$$J_{Цl} = J_{Цl}(\mathbf{v}, \mathbf{u}), l = 1, 2; J_{ИСi} = J_{ИСi}(\mathbf{v}, \mathbf{u}), i = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Общая структура показателей (5) имеет вид

$$J_{ji} = \Phi_{ji}(\mathbf{x}, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} f_{ji}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}) dt, i = 1, 2, 3, j = (\text{Ц}, \text{ИС}). \quad (9)$$

Определение 2 (ИРИДИШ). Назовем ИРИДИШ (иерархическое равновесие иерархической дифференциальной игры по Штакельбергу) со структурными свойствами, которые составляют следующую трехэтапную процедуру процесса оптимизации с обобщением стратегии Штакельберга.

На первом этапе ММС–Ц на «правах первого хода» сообщает ММС–ИС 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 $\mathbf{R}: \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{V}$ такое, что при каждом фиксированном $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$

$$\max_{\mathbf{v} \in \mathbf{V}} \varphi_{\text{ИС}}(J_{\text{ИС}1}(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \dots, J_{\text{ИС}3}(\mathbf{u}, \mathbf{v})) = \varphi_{\text{ИС}}(J_{\text{ИС}1}(\mathbf{u}, \mathbf{R}\mathbf{u}), \dots, J_{\text{ИС}3}(\mathbf{u}, \mathbf{R}\mathbf{u})), \quad (10)$$

где $\mathbf{R}\mathbf{u} = \mathbf{v}^r$ при фиксированном \mathbf{u} .

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

На третьем этапе, в котором развивается стратегия Штакельберга и обобщается ИРИДИШ, ММС–Ц выбирает решение

$$\max_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} \varphi_{\text{Ц}}(J_{\text{Ц}1}(\mathbf{u}, \mathbf{R}\mathbf{u}), \dots, J_{\text{Ц}3}(\mathbf{u}, \mathbf{R}\mathbf{u})) = \varphi_{\text{Ц}}(J_{\text{Ц}1}(\mathbf{u}^0, \mathbf{R}\mathbf{u}^0), \dots, J_{\text{Ц}3}(\mathbf{u}^0, \mathbf{R}\mathbf{u}^0)). \quad (11)$$

Конкретный вид функции $\varphi_{\text{Ц}}$ определяется на множестве степеней конфликтности или несогласованности подсистем ММС–Ц, когда $\mathbf{u}^0 = \mathbf{u}^r$.

Набор $\{\mathbf{u}^r, \mathbf{R}\mathbf{u}\}$ определяется как обобщенное 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 функциями балансировки по эффективности в ММС на уровнях ИРСУ на основе, например, уравнивания по Нэшу [9].

Замечание 3. Для обеспечения, кроме балансировки, на ММС-уровнях предельной эффективности решаются задачи многокритериальной оптимизации функции $J_{\text{ИС}}$, а также $J_{\text{Ц}}$ на основе арбитражной схемы Нэша (АСН). Функции $\varphi_{\text{Ц}}$, $\varphi_{\text{ИС}}$ приобретают более общий вид, обеспечивающий многокритериальный равновесно-арбитражный компромисс. На втором и третьем этапах вводятся дополнительные итерационные операции на основе АСН:

$$\varphi_{\text{АС}} = \max_{\mathbf{v}} \prod_i (J_{\text{ИС}i}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - J_{\text{ИС}i}(\mathbf{u}, \mathbf{v}^r)), \quad i = 1, \dots, 3;$$

$$\mathbf{v}^r = \mathbf{R}(\mathbf{u}) \rightarrow \mathbf{v}^{\text{П}} = \mathbf{R}_{\text{АСН}}(\mathbf{u}, \mathbf{v}^r);$$

$$\varphi_{\text{Ц}}(\mathbf{u}^{\text{П}}, \mathbf{R}_{\text{АСН}}(\mathbf{u}^{\text{П}})) = \max_{\mathbf{u}} \prod_l [J_{\text{Ц}l} - J_{\text{Ц}l}(\mathbf{u}^r, \mathbf{R}_{\text{АСН}}(\mathbf{u}^r))], \quad l = \overline{1, 2}, \quad \mathbf{u}^r \rightarrow \mathbf{u}^{\text{П}},$$

где $\mathbf{v}^{\text{П}}$, $\mathbf{u}^{\text{П}}$ — оптимальны по Парето.

Арбитражная схема Нэша дает результат на фронте Парето в точке, ближайшей к показателям равновесия, что подчеркивает значимость полученного стабильно-эффективного компромисса [9].

Замечание 4. При указанном обобщении функций $\varphi_{\text{Ц}}$, $\varphi_{\text{ИС}}$ (замечание 3) координация будет иметь смысл $\mathbf{u}^{\text{П}}$ при условии $\mathbf{R}_{\text{АСН}}(\mathbf{u}) = \mathbf{v}^{\text{П}}$ на каждой итерации.

Трехэтапная структура определения 2 и замечание 3 формируют основу РАА-оптимизации.

Замечание 5. В двухуровневой задаче наведения–стабилизации (см. рис. 1) при заданных функциональных связях (1)–(4) $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{k}_ц, \mathbf{x})$ и $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{k}_{ИС}, \mathbf{x})$, где $\mathbf{u} = (n_y, n_z)$, $\mathbf{v} = (\delta_b, \delta_n, \delta_a)$, координация формируется векторами параметров $\mathbf{k}_{ц1} = (k_{y1}, k_{k1})$, $\mathbf{k}_{ц2} = (k_{y2}, k_{k2})$, а исполнительное управление определяется векторами параметров $\mathbf{k}_{ИС1} = (k_{оz}, k_{ny}, k_{sny})$, $\mathbf{k}_{ИС2} = (k_{оy}, k_{nz}, k_{snz})$, $\mathbf{k}_{ИС3} = (k_{оx}, k_{y}, k_{sy})$.

Структура формирования обобщенной оптимизации двухуровневой системы на основе ИРИДИШ в бескоалиционном варианте балансировки ММС-уровней. Обобщение задачи по сравнению с обобщением, приведенным в работе [5], заключается в структурировании каждого уровня многоуровневой ИРСУ. Введем в рассмотрение отображение, имеющее смысл равновесия по Нэшу,

$$\mathbf{R}\mathbf{u} \parallel v_i = \begin{cases} v_1, \mathbf{R}_2\mathbf{u}, \mathbf{R}_3\mathbf{u} & \text{при } i = 1; \\ \mathbf{R}_1\mathbf{u}, v_2, \mathbf{R}_3\mathbf{u} & \text{при } i = 2; \\ \mathbf{R}_1\mathbf{u}, \mathbf{R}_2\mathbf{u}, v_3 & \text{при } i = 3; \end{cases} \quad (12)$$

$$\mathbf{R}\mathbf{u} = (\mathbf{R}_1\mathbf{u}, \mathbf{R}_2\mathbf{u}, \mathbf{R}_3\mathbf{u}), \mathbf{u} = (u_1, u_2). \quad (13)$$

В соответствии со вторым этапом получения ИРИДИШ (10) при условии, что $\Phi_{ИС}$ реализует операцию бескоалиционной конфликтной ситуации, на уровне ММС–ИС формируются три отображения $\mathbf{R}_i : \mathbf{U} \rightarrow v_i, i = 1, 2, 3$, такие что

$$J_{ИСi}(\mathbf{u}, \mathbf{R}\mathbf{u}) = \max_{v_i \in V_i} J_{ИСi}(\mathbf{u}, \mathbf{R}\mathbf{u} \parallel v_i), i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

В этом случае (13) реализует равновесное решение с индексом r при фиксированной допустимой координации \mathbf{u} :

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

Далее в соответствии с третьим этапом (14) формируется $\Phi_ц$:

$$J_{цl}(\mathbf{u}^r, \mathbf{R}\mathbf{u}^r) = \max_{u_l} J(\mathbf{u} \parallel u_l, \mathbf{R}(\mathbf{u} \parallel u_l)) = \max_{u_l} J(\mathbf{u} \parallel u_l, \mathbf{v}^r(\mathbf{u} \parallel u_l)), l = 1, 2,$$

где

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

$$\mathbf{u} \parallel u_l = \begin{cases} u_1, u_2^r & \text{при } l = 1; \\ u_1^r, u_2 & \text{при } l = 2. \end{cases} \quad (15)$$

Система (15) означает равновесие по Нэшу на верхнем уровне.

Учет замечания 3 также дополнительно обобщает метод оптимизации ИРСУ, формируя РАА. Таким образом, РАА дает двойное обобщение известного алгоритма ИРИДИШ с централизованным верхним уровнем (Центром) [5].

Достаточные условия обобщенного управления на основе уравнения Гамильтона — Келли исследованы в работах [1, 3, 5], там же предложены алгоритм решения задачи синтеза обобщенного управления в линейно-квадратичной постановке и общие структурные свойства итерационного алгоритма для постановки общего вида.

Варианты решения задачи оптимизации иерархической системы управления. В общем случае нелинейного описания ИРСУ задачу получения законов $\mathbf{u}(\mathbf{x})$, $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ аналитически решить на основе уравнений Гамильтона — Келли практически невозможно.

Получены следующие варианты решения задачи оптимизации ИРСУ.

1. Синтез оптимальных законов управления ИРСУ $\mathbf{u}(\mathbf{x})$, $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ в линейно-квадратичной постановке.

2. При заданном техническом облике системы в практических задачах управления–регулирования при известных функциональных зависимостях $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{k}_c, \mathbf{x})$ и $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{k}_{ис}, \mathbf{x})$ сформированы и решены параметризованные нелинейные задачи на основе РАА.

3. В полученной задаче параметрической оптимизации ИРСУ дополнительно используются результаты адаптивной параметрической оптимизации системы стабилизации ЛА по скоростному напору на основе РАА [7, 8], что значительно упрощает решение задачи оптимизации ИРСУ.

При реализации РАА каждому итерационному решению на уровне наведения с известными результатами по скоростному напору формируется отклик в виде равновесных или равновесно-арбитражных оптимальных параметров ССТ.

Решение задачи синтеза оптимальных законов $\mathbf{u}(\mathbf{x})$, $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ в двухуровневой системе ММС–Ц, ММС–ИС в линейно-квадратичной постановке рассмотрено в работах [1–3, 6].

Решение параметризованной задачи синтеза оптимальной двухуровневой многоканальной системы наведения–стабилизации летательного аппарата на основе координированных стабильно-эффективных компромиссов с адаптацией управляющих параметров системы стабилизации. Развивая варианты 2 и 3 решения задачи синтеза оптимального закона управления–регулирования, рассмотрим применение полученного алгоритма к решению общей задачи синтеза, когда модель представлена в общем виде, без учета линеаризации, но с учетом всех нелинейностей. При заданном техническом облике модели системы наведения–стабилизации нет необходимости находить структуру законов управления. В качестве описания использована нелинейная модель движения ЛА. Структуры законов управления на обоих уровнях иерархии заданы как позиционные функции параметров на каждом уровне $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{k}_c, \mathbf{x})$ и $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{k}_{ис}, \mathbf{x})$.

Решение задачи оптимизации ИРСУ сводится к нахождению оптимальных значений управляющих параметров на уровнях наведения и стабилизации. При этом

наведение на основе РАА обладает координационным свойством для уровня стабилизации.

Исследованы процессы параметрической оптимизации ИРСУ высокоманевренным ЛА как иерархической системы наведения–стабилизации с учетом перекрестных связей каналов наведения и стабилизации, многокритериальных требований к каналам наведения и стабилизации ЛА, приближенной и точной траекторной адаптации ССт, коррекции траектории для повышения качества адаптивной стабилизации. Показатели эффективности на уровне наведения имеют вид:

– максимизация скорости

$$J_{ц11}(t_k) = -V_y^2(t_k); J_{ц12} = -(V_x^2(t_k) + V_z^2(t_k));$$

– векторный промах, который не должен превышать полуметра

$$J_{ц21}(t_k) = (Y_{ц} - Y(t_k))^2; J_{ц22}(t_k) = (X_{ц} - X(t_k))^2 + (Z_{ц} - Z(t_k))^2;$$

– качество наведения, характеризуемое требуемыми углами подлета к цели, т. е. необходимо вывести ЛА в плоскость ЛА–цель (по углу Ψ), с учетом желаемого направления подлета к цели, близкого к вертикальному (требование по углу Θ):

$$J_{ц31}(t_k) = \left(\Theta(t_k) + \frac{\pi}{2} \right)^2;$$

$$J_{ц32}(t_k) = \left(\Psi(t_k) - \arcsin \frac{(Z_{ц} - Z(t_0))}{\sqrt{(X_{ц} - X(t_0))^2 + (Z_{ц} - Z(t_0))^2}} \right)^2.$$

В соответствии с этапами 2, 3 обобщенной оптимизации ИРСУ рассмотрим применение метода многокритериальной оптимизации иерархической системы наведения–стабилизации ЛА на основе РАА с обеспечением адаптации параметров по скоростному напору (как функции высоты и скорости) на уровне стабилизации (вариант 3). Получение оптимальных параметрических зависимостей на уровне стабилизации описано в работах [7, 8].

При решении задачи многокритериальной оптимизации параметров ССт для оценки эффективности функционирования каждого канала ССт использовали комплексный показатель, представляющий собой линейную свертку равнозначных показателей статической точности, колебательности, быстродействия, устойчивости. Таким образом, критерий оптимизации имеет вид

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{\theta} \\ \Phi_{\psi} \\ \Phi_{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^4 \alpha_{j\theta} J_{исj1} \\ \sum_{j=1}^4 \alpha_{j\psi} J_{исj2} \\ \sum_{j=1}^4 \alpha_{j\gamma} J_{исj3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^4 \alpha_{j1} J_{j1} \\ \sum_{j=1}^4 \alpha_{j2} J_{j2} \\ \sum_{j=1}^4 \alpha_{j3} J_{j3} \end{bmatrix} \rightarrow \min,$$

где каждый компонент вектора определяется как сумма нормированных показателей с весовыми коэффициентами, которые учитывают значимость каждого скалярного показателя в канале ССт.

Следовательно, при решении задачи многокритериальной оптимизации параметров трехканальной ССт размерность оптимизируемого векторного показателя эффективности ССт равна 3, размерность вектора варьируемых параметров ССт — 9. Вследствие равнозначности показателей $\alpha_{ji} = 0,5$, $j = 1, \dots, 4$; $i = 1, \dots, 3$. На области применимости БЛА по скоростному напору для 18 фиксированных режимов с помощью генетических алгоритмов выполнена оптимизация ССт по вектору критериев. Для каждого режима найден вектор оптимальных параметров. Результаты интерполируются на основе сплайнов на всю область применимости с получением поверхностей для каждого из девяти параметров как функций числа Маха и высоты и, следовательно, скоростного напора. Пример полученной поверхности для одного из девяти параметров приведен на рис. 4.

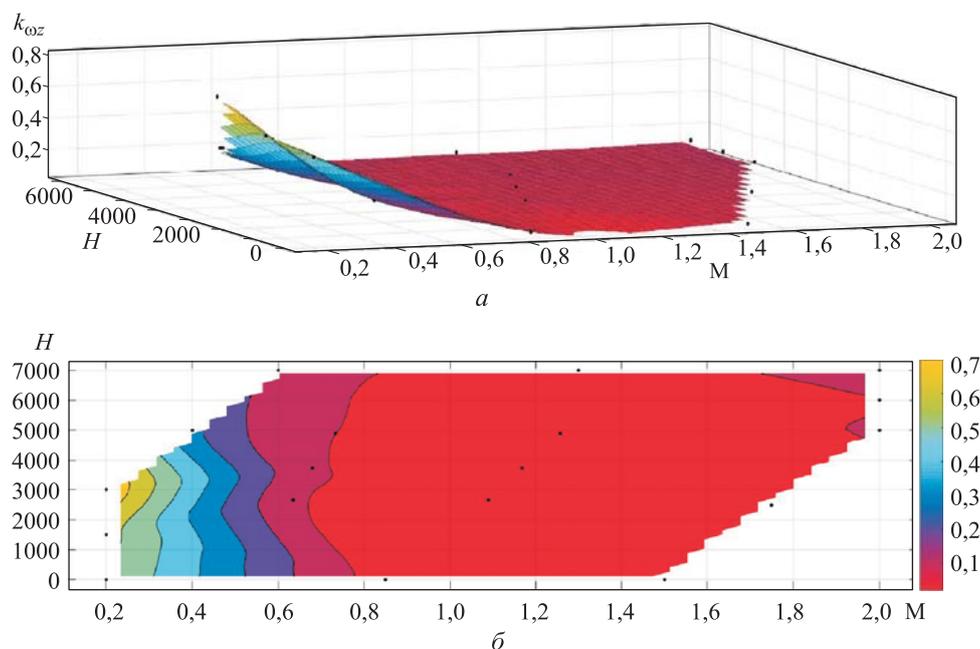


Рис. 4. Оптимальная зависимость коэффициента k_{oz} от числа Маха и высоты полета (а), полученная для задачи стабилизации БЛА, зависимость высоты полета от числа Маха (б)

В процессе решения определяются равновесно-арбитражные оптимальные параметры на уровне наведения с учетом бортовой реализации адаптации на уровне стабилизации в зависимости от формируемой траектории полета ЛА. Результатом применения алгоритма является совместное получение оптимальных параметров на уровне наведения и уровне стабилизации по многокритериальным требованиям на обоих уровнях иерархии.

Исследование эффективности многокритериально-оптимальной иерархической системы наведения–стабилизации с учетом балансировки эффективности на основе поуровневых компромиссов и межуровневой координации.
 Координаты точки старта: $X_0 = 0$; $Y_0 = 2500$ м; $Z_0 = 0$.

Цель — неподвижный или малоподвижный объект со скоростью, много меньшей скорости ЛА, вследствие чего цель можно полагать неподвижной. Координаты цели: $X_k = 4500$ м; $Y_k = 0$; $Z_k = 500$ м.

Рассмотрены два варианта моделирования. В первом варианте осуществляется моделирование без учета балансировки каналов на уровне наведения с адаптацией ССт по скоростному напору, а во втором — с балансировкой каналов на уровне наведения с адаптацией ССт по скоростному напору. Сравнительные результаты моделирования представлены на рис. 5, 6 и в таблице.

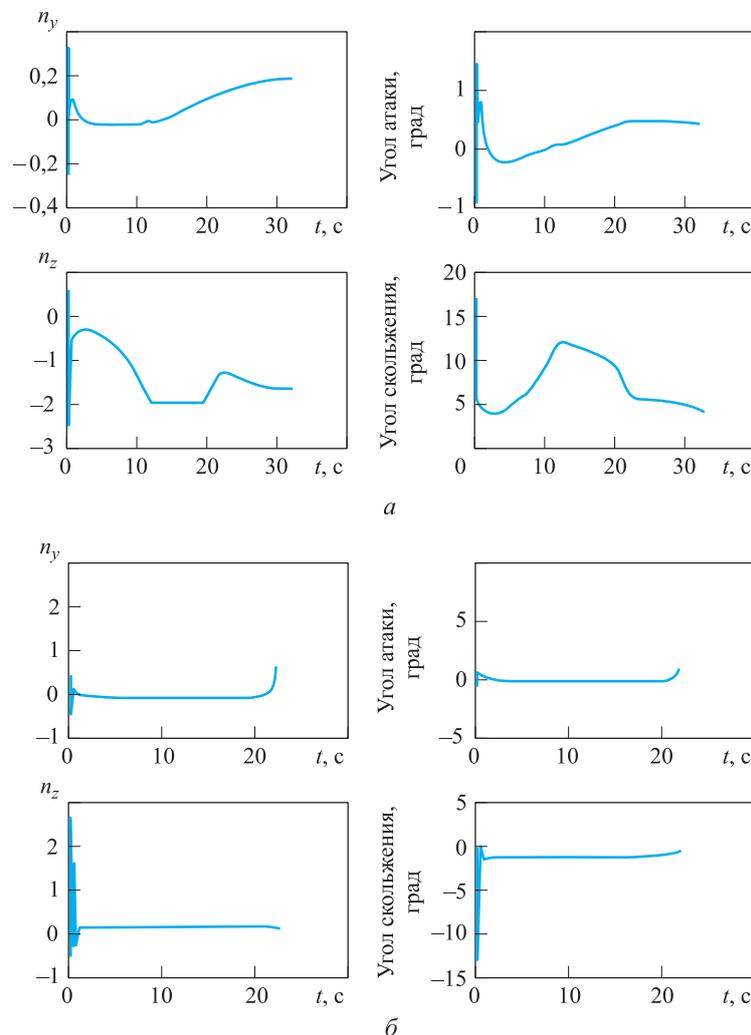


Рис. 5. Характеристики продольного и бокового каналов для вариантов моделирования без балансировки (а) и с учетом балансировки (б) каналов на уровне наведения

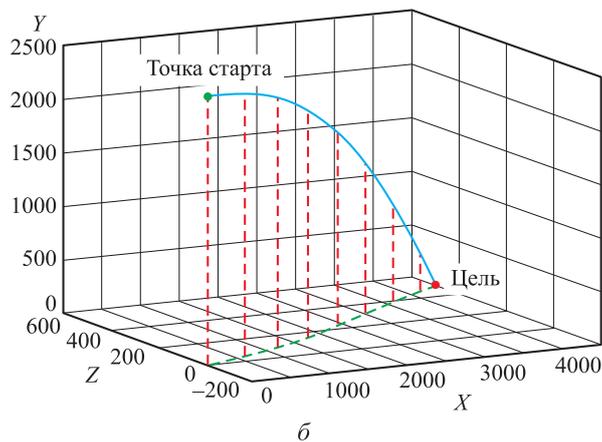
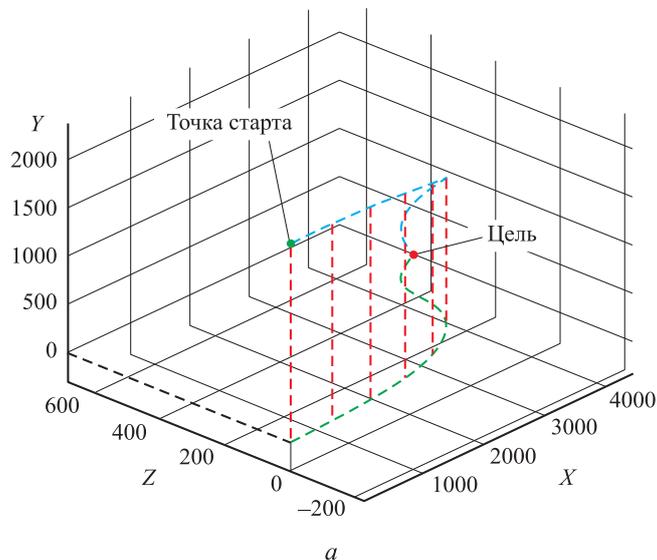


Рис. 6. Траектории движения БЛА при наведении на цель для вариантов моделирования без балансировки (а) и с учетом балансировки (б) каналов на уровне наведения

Сравнительные результаты моделирования

Параметр	Без учета балансировки каналов наведения	С учетом балансировки каналов наведения
Вектор управляющих параметров наведения $[k_{y1}, k_{k1}, k_{y2}, k_{k2}]$	[3, 5, 3, 5]	[6, 10, 9, 20]
Векторный промах R , м	3,57	0,38
Углы подлета к цели, град:		
Ψ	-22,2 (-6,33)	-12,6 (-6,33)
Θ	-67,3 (-90)	-76,5 (-90)
Проекции вектора скорости, м/с:		
V_x	286,63	290,9
V_y	2,55	57,2
V_z	2,73	6,62

Согласно результатам анализа характеристик (см. рис. 5), при балансировке каналов системы наведения на уровне ССт уменьшается перерегулирование в результирующих характеристиках и колебательность.

По результатам анализа числовых параметров, входящих в состав требований на уровне наведения, таких как уменьшение векторного промаха, улучшение требуемых углов при подлете к цели и увеличение скорости при подлете к цели в момент перехвата цели, можно судить о положительном применении данного метода оптимизации иерархической системы управления.

Заключение. Сформирована двухуровневая математическая модель иерархической системы наведения–стабилизации ЛА с учетом перекрестных связей на каждом уровне.

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

Использование метода оптимизации иерархической системы управления динамическим объектом на основе координированных стабильно-эффективных компромиссов дает положительные результаты, обладающие координационными свойствами и сбалансированными на уровнях ММС, что видно при сравнении результатов моделирования с результатами, полученными без применения методики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронов Е.М., Карпунин А.А., Серов В.А. Алгоритмы иерархической оптимизации в двухуровневой многоканальной задаче «управление–регулирование» // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2009. № 4. С. 55–67.
2. Оптимизация иерархической системы «наведение–стабилизация» летательного аппарата с адаптацией системы стабилизации / А.В. Ванин, Е.М. Воронов, А.А. Карпунин, В.А. Серов, К.К. Любавский // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 4. С. 13–33. DOI: 10.18698/0236-3933-2015-4-13-33
3. 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. Спец. вып. № 6. С. 19–42.
4. Лебедев А.А., Карабанов В.А. Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1965. 528 с.
5. Вайсборд Э.М., Жуковский В.И. Введение в дифференциальные игры нескольких лиц и их приложения. М.: Советское радио, 1980. 304 с.
6. Воронов Е.М., Карпунин А.А., Серов В.А. Иерархическое равновесие в многоуровневых системах управления // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2008. № 4. С. 18–29.
7. Многокритериальная оптимизация сложной трехканальной системы стабилизации летательного аппарата в форме равновесно-арбитражного компромисса / Е.М. Воронов, В.А. Ефремов, С.И. Сычев, К.К. Любавский, М. Тихонов // Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: Самарский науч. центр РАН, 2013. С. 208–217.

8. *Многокритериальная* параметрическая оптимизация трехканальной системы стабилизации летательного аппарата с перекрестными связями / А.С. Аксенов, Е.М. Воронов, К.К. Любавский, С.И. Сычев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. № 3. С. 16–36.

9. *Воронов Е.М.* Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 576 с.

10. *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.

11. *Солодовников В.В., Зверев В.Ю.* Применение методов теории автоматического управления и многокритериальной оптимизации для автоматизации проектирования АСУ ТП. М.: Машиностроение, 1984. 48 с.

Ванин Александр Викторович — канд. техн. наук, ассистент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

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, стр. 1).

Серов Владимир Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление и моделирование систем» Российского технологического университета (МИРЭА) (Российская Федерация, 119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78), доцент РАНХиГС (Российская Федерация, 119571, Москва, пр-т Вернадского, д. 82, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ванин А.В., Воронов Е.М., Серов В.А. Разработка метода многокритериальной оптимизации иерархической системы управления на основе координированных стабильно-эффективных компромиссов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2018. № 6. С. 31–47. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-6-31-47

DEVELOPING A MULTICRITERIA OPTIMIZATION TECHNIQUE FOR A HIERARCHICAL CONTROL SYSTEM BASED ON COORDINATED STABLE AND EFFICIENT COMPROMISES

A.V. Vanin¹

mole@list.ru

E.M. Voronov¹

emvoronov@mail.ru

V.A. Serov^{2, 3}

ser_off@inbox.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

³ Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA), Moscow, Russian Federation

Abstract

We developed an optimisation technique for a hierarchical control system based on the algorithm we generated for obtaining coordinated stable and efficient compromises. We formed the low-level coordination properties for optimising a two-level multichannel aircraft guidance system based on coordinated stable and efficient compromises. We analysed the efficiency of a multicriteria-optimal hierarchical control system, taking into account efficiency balancing using per-level compromises and inter-level coordination. We formed additional properties for an optimal top-level system coordinating a parametrised adaptive low-level system via correcting low-level parameters

Keywords

Optimisation, control, two-level hierarchical systems, coordination, executive control, adjustment

Received 20.04.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Voronov E.M., Karpunin A.A., Serov V.A. Algorithms of hierarchical optimization in two-level multichannel problem of control-regulation. *Vestnik RUDN. Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Researches], 2009, no. 4, pp. 55–67 (in Russ.).
- [2] Vanin A.V., Voronov E.M., Karpunin A.A., Serov V.A., Lyubavskiy 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 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2015-4-13-33
- [3] Vanin A.V., Voronov E.M., Karpunin A.A. Control optimization in a two-level hierarchical stabilization–guidance system of an aircraft. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2012, spec. iss. no. 6, pp. 19–42 (in Russ.).
- [4] Lebedev A.A., Karabanov V.A. *Dinamika sistem upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami* [Dynamics of control systems for unmanned aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 528 p.
- [5] Vaysbord E.M., Zhukovskiy V.I. *Vvedenie v differentsial'nye igry neskol'kikh lits i ikh prilozheniya* [Introduction to differential games of several persons and their applications]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980. 304 p.
- [6] Voronov E.M., Karpunin A.A., Serov V.A. Hierarchical equilibrium in multilevel control system. *Vestnik RUDN. Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Researches], 2008, no. 4, pp. 18–29 (in Russ.).
- [7] Voronov E.M., Efremov V.A., Sychev S.I., Lyubavskiy K.K., Tikhonov M. [Multicriteria optimization of a complex three-channel stabilization system of an aircraft in the form of an equilibrium-arbitration compromise]. *Tr. XV Mezhdunar. konf. "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"* [Proc. XV Int. Conf. "Control and modelling problems in complex systems"]. Samara, Samarskiy nauch. tsentr RAS Publ., 2013, pp. 208–217 (in Russ.).
- [8] Aksenov A.S., Voronov E.M., Lyubavskiy K.K., Sychev S.I. Multicriteria parametric optimization of the triplechannel 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.).

[9] Voronov E.M. *Metody optimizatsii upravleniya mnogoob"ektnymi mnogokriterial'nymi sistemami na osnove stabil'no-effektivnykh kompromissovo* [Methods for optimizing control on multiobject multicriteria systems based on stable-effective trade-offs]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 576 p.

[10] Serov V.A. Genetic algorithms of optimizing control of multiobjective 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.], no. 4, pp. 70–80 (in Russ.).

[11] Solodovnikov V.V., Zverev V.Yu. *Primenenie metodov teorii avtomaticheskogo upravleniya i mnogokriterial'noy optimizatsii dlya avtomatizatsii proektirovaniya ASU TP* [Application of methods of the theory of automatic control and multicriteria optimization for the automation of design of process control systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 48 p.

Vanin A.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assist. Lecturer, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Voronov E.M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Serov V.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Control and Simulation of Systems, MIREA — Russian Technological University (Vernadskogo prospekt 78, Moscow, 119454 Russian Federation); Assoc. Professor, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA) (Vernadskogo prospekt 82, str. 1, Moscow, 119571 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Vanin A.V., Voronov E.M., Serov V.A. Developing a Multicriteria Optimization Technique for a Hierarchical Control System based on Coordinated Stable and Efficient Compromises. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2018, no. 6, pp. 31–47 (in Russ.).

DOI: 10.18698/1812-3368-2018-6-31-47