

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГООБЪЕКТНЫМИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ, СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ И ИЕРАРХИЧЕСКОЕ УРАВНОВЕШИВАНИЕ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Пупков К.А., Воронов Е.М., Карпунин А.А.

Кафедра систем автоматического управления
МГТУ им. Н.Э. Баумана
ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, Россия, 105005

Предлагается методика оптимизации структурно и функционально сложных систем управления в типичной форме многоуровневой иерархической структуры с многоподсистемными многокритериальными системами регулирования, управления и принятия решений в качестве уровня. В рамках направления формируются методы структурного синтеза оптимального функционального и технического облика иерархической распределенной системы управления. Сформулирована концепция и дано определение обобщенного управления многоуровневой автоматизированной системой управления, разработана методика его оптимизации на основе обобщения и алгоритмизации иерархического равновесия в многоуровневых системах. Приводятся результаты применения подходов в задачах в условиях исходной структурной несогласованности, конфликтной ситуации и неопределенности.

Ключевые слова: оптимальное управление, структурный синтез, иерархическое уравновешивание, обобщенное управление, многообъектная многокритериальная система.

Интеллектуальная и интеллектуализированная система управления (ИСУ) в силу реализуемой парадигмы управления [1] по определению является структурно и функционально сложной системой. Данное направление развивает подходы, сформированные в работе [2], по проблеме синтеза многоуровневой иерархической распределенной системы управления (ИРСУ) с использованием результатов блока синтеза цели ИСУ в форме вербальной цели для этапа структурного синтеза [3] ИРСУ.

Предлагается методика оптимизации структурно и функционально сложных систем управления в типичной форме многоуровневой иерархической структуры с поуровневыми многоподсистемными (многоканальными, многосвязными) многокритериальными системами (ММС) [4] регулирования (ММС-Р), управления (ММС-У) и принятия решений (ММС-ПР). В рамках направления формируются методы структурного синтеза оптимального функционального и технического облика ИРСУ. На данной стадии исследования проблемы сформированы:

— метод получения функционально-технического облика системы по вербальной цели в задаче комплектации на основе экспертного ранжирования и Парето-оптимизации;

— метод системного синтеза технического облика, ориентированного на сложную задачу вывода космического аппарата;

— метод получения функционального и технического облика двухуровневой системы управления-регулирования, связанной с прикладной иерархической задачей наведения-стабилизации летательного аппарата (ЛА) [5];

— метод многокритериальной оптимизации функционального и технического облика системы на основе многоярусной мультиграфовой модели множества

функциональных обликов с распределением технических средств по критерию стоимости и грубости системы.

Общая методика оптимизации формируется на основе комбинации методов проектирования ИРСУ для выбора оптимальной функционально-технической структуры ИРСУ (облика системы управления); методов оптимизации ММС на основе стабильно-эффективных игровых компромиссов для оптимизации и уравнивания (балансировки) подсистем в составе ММС-уровня регулирования, управления, принятия решения децентрализованной интеллектуализацией по эффективности или потерям; методов оптимизации межуровневой координации с приоритетом — «правом первого хода» каждого верхнего уровня в ИРСУ. Данная концепция позволяет сформулировать определение обобщенного оптимального управления в ИРСУ.

Определение 1. Обобщенное оптимальное управление многоуровневой системы управления формируется на основе комбинации следующих процессов:

- многокритериального выбора оптимальной функциональной структуры системы управления (структурного синтеза облика системы управления);
- оптимизации в подсистемах ММС-уровней;
- уравнивания (балансировки) подсистем ММС-уровней;
- оптимизации межуровневой координации.

Разработан метод оптимизации обобщенного управления многоуровневой АСУ на основе разработанного метода иерархического уравнивания по Штакельбергу, в котором обобщается известное понятие стратегии по Штакельбергу в классе иерархических дифференциальных игр [6].

Без ограничения общности рассуждений рассмотрим двухуровневую иерархическую дифференциальную игру (ИДИ) с «правом первого хода» верхнего уровня. В отличие от известных результатов [6. Гл. 7] и в соответствии со структурным требованием многоуровневой СУ каждый верхний уровень представляет собой структурированную ММС с исходной структурной несогласованностью, представленную на рис. 1. На рисунке 1 также без ограничения общности рассуждений рассматриваются трехподсистемные ММС.

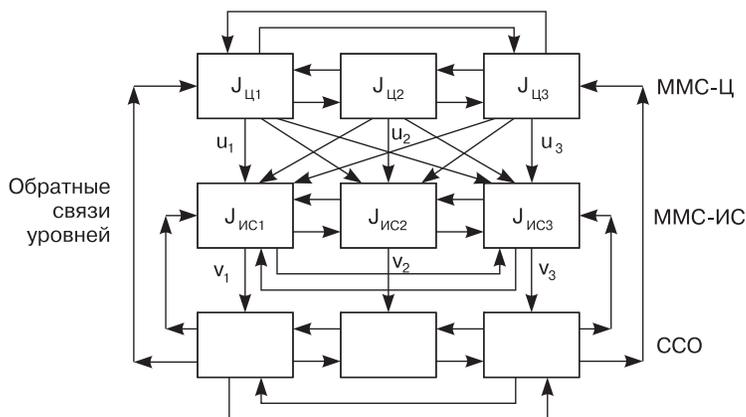


Рис. 1. Структурная схема двухуровневой трехподсистемной ИДИ: верхний уровень: ММС — центр, нижний уровень: ММС — исполнительная система (ММС — ИС), структурно-сложный объект (ССО)

На рисунке 1 сохранены традиционные обозначения двухступенчатой дифференциальной игры центра (Ц) и исполнительной системы (ИС) [6. Гл. 7]. Верхний уровень может иметь смысл ММС. Таким образом, в данной работе имеет место обобщение двухступенчатой иерархической дифференциальной игры [7].

Структурно сложный объект (ССО) имеет математическую модель

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \mathbf{x} \in \mathbf{E}^n, \quad (1)$$

где \mathbf{v} — исполнительное управление с распределенным исполнением (см. рис. 1),

$$\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3), \dim \mathbf{v}_i = m_i, i = 1, 2, 3, \mathbf{v}_i \in \mathbf{V}_i \subset \mathbf{E}^{m_i}, \quad (2)$$

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

Управление-координация ММС-Ц \mathbf{u} имеет вид

$$\mathbf{u} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3), \dim \mathbf{u}_l = k_l \geq 3, \mathbf{u}_l \in \mathbf{U}_l \subset \mathbf{E}^{k_l}, \quad (3)$$

$$\dim \mathbf{u} = k = \sum_l k_l, \mathbf{u} \in \mathbf{U} = \mathbf{U}_1 \times \mathbf{U}_2 \times \mathbf{U}_3 \subset \mathbf{E}^k.$$

Структурно и функционально связанные задачи ММС-Ц и ММС-ИС характеризуются соответственно функциями «выигрыша»

$$J_{ji} = \Phi_{ji}(\mathbf{x}, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} f_{ji}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}) dt, i = 1, 2, 3; j = (\text{Ц}, \text{ИС}). \quad (4)$$

Определение 2. Иерархическим равновесием ИДИ (ИРИДИ) с правом первого хода верхнего уровня в попарном взаимодействии уровней называется набор взаимосвязанных равновесных ситуаций множества уровней ИДИ при фиксированных степенях конфликтности в ММС уровней [7].

Определение 3. Структурные свойства иерархического равновесного решения двухуровневой ИДИ с обобщением стратегии Штакельберга составляют следующую трехэтапную процедуру получения обобщенного управления [7].

На первом этапе ММС-Центр 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 $\{t, \mathbf{x}\}$ или программно-корректируемого закона-стратегии управления (ПКЗУ) для конечного множества $\{t_i, \mathbf{x}(t_i), t_0 < t_1 < \dots < t_i < \dots < t_K = T\}$ или программного управления $\mathbf{u}(t)$ для всех $t \in [t_0, t_K]$ или векторного параметрического множества $\mathbf{q} \in \mathbf{Q}$.

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

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{v} \in \mathbf{V}} \Phi_{\text{ИС}}(J_{\text{ИС}_1}(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \dots, J_{\text{ИС}_3}(\mathbf{u}, \mathbf{v})) = \\ & = \Phi_{\text{ИС}}(J_{\text{ИС}_1}(\mathbf{u}, \mathbf{R}\mathbf{u}), \dots, J_{\text{ИС}_3}(\mathbf{u}, \mathbf{R}\mathbf{u})). \end{aligned} \quad (5)$$

Конкретный вид функции $\varphi_{\text{ИС}}$ [6] определяется на множестве степеней конфликтности подсистем ММС-ИС (антагонизм, бескоалиционный или коалиционный конфликт, кооперация) [4].

На третьем этапе, который развивает стратегию Штакельберга и обобщает равновесие в ИДИ по Штакельбергу [6], ММС-Ц выбирает решение

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} \varphi_{\text{Ц}}(J_{\text{Ц}_1}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}), \dots, J_{\text{Ц}_3}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru})) = \\ = \varphi_{\text{Ц}}(J_{\text{Ц}_1}(\mathbf{u}^r, \mathbf{Ru}), \dots, J_{\text{Ц}_3}(\mathbf{u}^r, \mathbf{Ru})). \end{aligned} \quad (6)$$

Конкретный вид функции $\varphi_{\text{Ц}}$ определяется на множестве степеней конфликтности подсистем ММС-Ц [7].

Набор $\{\mathbf{u}^r, \mathbf{Ru}\}$ определяется как *иерархическое равновесие в ИДИ по Штакельбергу (ИРИДИШ)* [7].

Получены достаточные условия оптимальности обобщенного закона управления системы управления. Предложены алгоритмы иерархической оптимизации управления в системах управления: в форме решения задачи синтеза обобщенного управления в линейно-квадратической постановке [5] и итерационного алгоритма получения программно-корректируемого иерархического управления в постановке общего вида [7].

Как следует из определения 1, первым элементом в синтезе ИРСУ является проблема структурного синтеза для получения функционального облика ИРСУ со структурой решаемых задач. Данная проблема была исследована в работе [2].

Исследованы подходы структурного синтеза для известной задачи комплектации технической структуры системы на основе векторного, многовекторного и гипервекторного методов ранжирования, а также нечетких описаний и функций полезности [2; 3; 8].

Было также показано, что общетеоретической базой структурного синтеза являются последовательные методы проектирования функциональных, функционально-организационных и технических структур [2], полученные в [8].

Предложенные в [2] сложные методы многокритериального выбора оптимальной функциональной структуры ИРСУ структурного синтеза на основе вербальной цели формируются в виде методики получения множества ромбовидных многоуровневых структур, интерпретации структур на графах в форме мультиграфа ярусно-параллельного типа с получением допустимых структур учетом структурных ограничений, с определением Парето-оптимальных структур [8] и с выбором многокритериально оптимальной функциональной структуры на основе метода компромиссов [4].

Структурный синтез позволяет перейти к сигнально-параметрической настройке полученной функциональной структуры (к синтезу ИРСУ) в соответствии с определением 1.

Методы оптимизации управления ММС как самостоятельное направление нашло применение в трех классах задач в условиях исходной структурной несогласованности, конфликтной ситуации и неопределенности.

В прикладных задачах в условиях конфликтной ситуации исследованы вопросы проектирования систем управления группировками, группами и одиночными ЛА в условиях конфликтно-оптимального взаимодействия сухопутных, морских и авиационно-ракетных комплексов такие, как метод оптимального управления ресурсами группировки с учетом текущих конфигураций группировок и конфликтно-оптимального прогноза, метод координированного управления звеном ЛА в конфликтной ситуации, закон конфликтно-оптимального наведения ЛА в фактическую точку встречи с целью, гарантирующий метод преодоления перехвата в условиях пассивных и активных помех, метод защиты радиолокационной системы от противорадиолокационных ракет и многие другие задачи.

В прикладных задачах в условиях исходной структурной несогласованности разработаны методы синтеза многосвязных многоканальных ММС стабилизации и управления ЛА с перекрестными связями, мехатронных систем, систем управления технологическими процессами на основе равновесно-арбитражной многокритериальной балансировки каналов — подсистем ММС.

На основе сформированного фундаментального свойства конфликтной анизотропии (КАН), которое позволяет учесть возможность проявления неопределенных факторов на полной системе степеней конфликтности, развиты методы теории робастного управления в условиях неопределенности в применении к задачам управления транспортным средством в процессе торможения и другим задачам.

В заключение следует отметить существенную важность данных исследований в классе структурно и функционально сложных ИСУ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пупков К.А., Коньков В.Г. Интеллектуальные системы. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
- [2] Пупков К.А., Воронов Е.М., Коньков В.Г., Карпунин А.А. Структурная сложность интеллектуальных систем управления // Интеллектуальные системы: Труды VIII международного симпозиума. — М.: РУСАКИ, 2008. — С. 29–34.
- [3] Ададуров А.Н., Воронов Е.М., Грунина Г.С. Алгоритм выбора функционального облика системы управления на основе анализа вербальной цели // Интеллектуальные системы: Труды VI международного симпозиума / Под ред. К.А. Пупкова. — М.: РУСАКИ, 2004. — С. 180—183.
- [4] Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных игровых решений. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
- [5] Воронов Е.М., Карпунин А.А. Алгоритмы иерархической оптимизации в двухуровневой многоканальной задаче «управление-регулирование» // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2009. — № 4. — С. 55–67.
- [6] Вайсборд Э.М., Жуковский В.И. Введение в дифференциальные игры нескольких лиц и их приложения. — М.: Советское радио, 1980.
- [7] Воронов Е.М., Карпунин А.А., Серов В.А. Иерархическое равновесие в многоуровневых системах управления // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2008. — № 4. — С. 18–29.
- [8] Плотников В.Н., Зверев В.Ю. Принятие решений в системах управления. Ч. 2: Теория и проектирование алгоритмов принятия проектных решений в многообъектных распределенных системах управления. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994.

- [9] *Воронов Е.М., Карпунин А.А.* Концепция обобщенного управления в иерархических системах управления и принятия решений // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXIV академических чтений по космонавтике / Под общ. ред. А.К. Медведевой. — М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2010. — С. 463.

OPTIMAL CONTROL OF MULTI-OBJECT MULTI-CRITERIA SYSTEMS, STRUCTURAL SYNTHESIS AND HIERARCHICAL EQUILIBRATION IN INTELLECTUAL CONTROL SYSTEMS

К.А. Pupkov, Е.М. Voronov, А.А. Karpunin

Automatic Control Systems Department
Bauman Moscow State Technical University
2-nd Baumanskaya str., 5, Moscow, Russia, 105005

Methodology of optimization of structural and functional complex control systems in typical form of multi-level hierarchical structure with multi-subsystem multi-criteria systems of regulation, control and decision making as a level is proposed. Methods of structural synthesis of optimal functional and technical habits of hierarchical distributed control system are formed within this framework. Definition of generalized control of multilevel automated control system is given. Procedure of optimization of the generalized control on the basis of generalization and algorithmization of hierarchical equilibrium in multilevel systems is developed. Results of use of approaches in problems under conditions of initial structural inconsistency, conflict situation and uncertainty are given.

Key words: optimal control, structural synthesis, hierarchical equilibration, generalized control, multi-object multi-criteria system.