УДК 681.51

А.А. Кононов, Д.В. Довжук

Государственный научно-исследовательский институт авиации, Киев

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ СИНТЕЗЕ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫМИ БОЕВЫМИ АВИАЦИОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ

Рассматривается один из аспектов актуальной проблемы разработки методического аппарата анализа и синтеза эргатических (человеко-машинных) систем управления адекватных уровню требований, которые предъявляются к перспективным боевым авиационным комплексам. Предлагается подход к определению параметров „гомеостазисного" и целевого критериев оптимальности системы – наиболее проблемной части существующих методов синтеза эргатических систем управления комплексов вооружения. Основу подхода составляет рассмотрение задачи синтеза как задачи оптимизации „в большом" и использование математических моделей в форме дифференциальных конфликтов.

методический аппарата анализа и синтеза, эргатические системы управления

Существующий уровень развития авиационных технологий позволяет создавать новые типы боевых авиационных комплексов (авиационные комплексы пятого поколения, комплексы беспилотных летательных аппаратов, авиационно-космические комплексы), потенциальная эффективность которых буде значительно выше эффективности существующих образцов вооружения. Однако результаты экспериментов, натурных и полунатурных испытаний в рамках исследовательских проектов показывают, что реальный уровень эффективности данных комплексов оказывается значительно меньше ожидаемого. Отмечается невозможность человека-оператора (летчика) реализовать в рамках существующей технологии создания эргатических систем управления тактико-технический потенциал новых комплексов, который заложен при проектировании, из-за объективных психофизиологических ограничений [1].

Существующие методы технологии создания эргатических систем управления, которые разрабатывались для предыдущих поколений боевых авиационных комплексов [2, 3], базируются на условии принципиальной способности летчика (оператора) выбирать наиболее подходящие режимы функционирования комплекса (режимы полета). При большом разнообразии вариантов реализации существующая технология создания эргатических систем управления заключается в том, что автоматические подсистемы выполняют определенные режимы работы, заложенные при проектировании, а функции оператора (летчика) сводятся к выбору наиболее подходящих режимов в зависимости от текущей ситуации. Кроме того, автоматическая часть эргатической системы управления должна создавать удобные психофизиологические условия работы летчику.

Наиболее общая методология эргатических систем, предложенная В.В. Павловым [2], базируется на использовании формальных принципов наилучшего соединения элементов системы (инвариантов), а именно принципа технологического (функционального) гомеостазиса, принципа наименьшего взаимодействия, принципа стационарности и принципа функциональной совместимости в пределах метода интегральной инвариантности. Это позволяет свести процедуру синтеза к решению классических задач теории устойчивости, теории инвариантности, оптимального управления и аналитического конструирования оптимальных регуляторов. Но необходимость наличия адекватных формальных моделей человека-оператора для каждой из возможных ситуаций функционирования системы

$$M(F_i, x, t) = (A, P_g, u_M = g(x)/F_i, x, t),$$

где $F_i(...)$ – математическая модель технической части $\frac{dx}{dt} = F_i(x, u, \xi, a, t)$ эргатической системы; A – ее алфавит описания; P_g – набор эргаграмматик описания системы; $u_M = g(x)$ – реакции оператора; существенно ограничивает практическую область использования данного подхода, так как не позволяет однозначно выбрать критерии, за которыми будет проводиться дальнейший синтез.

Метод последовательной векторной оптимизации, описанный в [3], состоит в том, что предлагается векторная постановка оптимизационной задачи $J = \begin{bmatrix} J_c(x, u, t) \\ J_g(x, u, t) \end{bmatrix}$, где целевой критерий $J_c(x, u, t)$ обеспечивает оптимальное достижение цели управления, а гомеостазисная составляющая $J_g(x, u, t)$ вводится для обеспечения необходимых условий работы человека (оператора, летчика). Методом оптимизации в этом случае предлагается последовательная векторная оптимизация:

$$u_g = \min J_g(x, u, t);$$

$$u^* = \min J_c(x, u, t)$$

при учете условия $J_g(x, u_g, t) = J_g^*$.

Решения, которое будет получено по результатам этот схемы поиска, будет удовлетворять как условиям целевого использования комплекса, так и условиям комфортного функционирования летчика (оператора).

Для синтеза оптимального алгоритма эргатического управления авиационными комплексами рассматриваемого вида в этом случае необходимо в текущих условиях определить целевую функцию оператора $Z(...)$, конкретный вид критериев $J_c(x, u, t)$, $J_g(x, u, t)$ и только после этого найти оптимальное управление. Но именно невозможность оператора (летчика) быстро обработать и оценить текущую информацию в реальном времени, выбрать подходящие режимы работы автоматических подсистем и задать их в существующих видах эргатических систем управления является причиной недостаточной эффективности боевого применения перспективных комплексов. Поэтому, не смотря на несомненное преимущество данного подхода к синтезу оптимального управления в нештатных, «напряженных» режимах функционирования вблизи эксплуатационных ограничений, необходимость учета возможности изменения целевых установок (вида критериев) $J_c(x, u, t)$ и $J_g(x, u, t)$ является причиной ограниченной результативности данного подхода.

Поэтому **целью данной статьи** является представление результатов исследований авторов в области применения игровых (минимаксных) методов и моделей, которые успешно применяются в области оптимальных технических систем [4], для синтеза эргатических систем управления рассматриваемыми видами перспективных боевых авиационных комплексов.

Основой решения данной проблемы, по мнению авторов, является качественно новый уровень перераспределения функций управления между оператором (летчиком) и техническими подсистемами в направлении передачи рутинных низкоуровневых операций автоматам [1].

Для осуществления данного перераспределения необходимо формализовать процессы определения критериального аппарата в эргатических системах управления с помощью соответствующих математических моделей.

Представим конфликтную ситуацию боевого применения перспективного комплекса вооружения в форме дифференциальной игры преследования. Это форма моделирования функционирования боевого комплекса является наиболее адекватной, так как она органически учитывает главную цель его применения - получение преимущества над противником в определенных условиях. Необходимо отметить, что важность конфликтных (минимаксных) моделей отмечали и предыдущие исследователи [2 – 4]. Но тактико-технические требования, которые предъявлялись к создаваемым системам управления, позволяли получить удовлетворительный результат решением задач управления „в малом” [5] (оптимальное управление определялось при известных модели системы, ограничениях и критерии оптимальности управления). В случае рассматриваемых комплексов, этот подход не является адекватным - необходимо указать формальную процедуру определения параметров решения задачи управления „в малом”, то есть перейти к решению задачи управления „в большом”[5]. Применение минимаксного подхода в форме дифференциальных игр, по мнению авторов, является наиболее результативным в данном случае.

Пусть $x \in R^n$, $y \in R^n$ – фазовые координаты противоборствующих сторон P и E соответственно; $u \in \{U\} \subset R^k$, $v \in \{V\} \subset R^l$ – управления противоборствующих сторон P и E; $f(x,u)$, $g(y,v)$ – вектор-функции размерности n, заданные в пространствах $R^n \times U$ и $R^n \times V$ соответственно. Тогда система уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = f(x,u); \\ \dfrac{dy}{dt} = g(y,v) \end{cases}$$

с начальными условиями x_0, y_0 описывает процесс применения рассмотренного комплекса в условиях противодействия противника в фазовом пространстве R^n.

Пусть выигрыш в рассмотренной модели определяется в виде функции евклидового расстояния между точками $x(t)$ и $y(t)$ в пространстве R^n:

$$\rho(x,y,t) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i(t) - y_i(t))^2} .$$

Функция $\rho(x,y,t)$ при этом получается однозначно заданной в пространстве $R^n \times R^n$. В этом случае игра описывает процесс преследования, в котором цель одной противоборствующей стороны (E) состоит в отклонении от противника (P). Так как рассматривается антагонистическая игра, то целью стороны P являются сближение с E на минимально возможное расстояние в фазовом пространстве $R^n \times R^n$. Тогда выигрыш стороны E задается как $\min\limits_{0 \le t \le T} \rho(x,y,t)$.

Ограничение на продолжительность конфликта в рассмотренной предметной области не имеет первостепенного значения, поэтому, под функцией выигрыша будем понимать функцию, задаваемую следующим образом. Выделим в пространстве R^{2n} m-мерную терминальную поверхность F, тогда $H(x,y) = \{\min \ t; (x(t), y(t) \in F\}$ является временами первого попадания точки $(x(t), y(t))$ на поверхность F. Если для всех $t \ge 0$ $(x(t), y(t)) \notin F$, то считаем $t_n = \infty$. Для всех возможных траекторий движения выигрыш стороны E будет равным $H(x,y)$, а в силу антагонистического характера конфликта выигрыш стороны P будет равным $-H(x,y)$. Тогда функцию выигрыша определим интегралом

$$K(x_0, y_0, u(...), v(...)) = \int_0^{t_k} H(x(t), y(t)) dt ,$$

что отвечает дифференциальным играм преследования. Задание свойств противоборствующих сторон (множеств возможных фазовых состояний $x \in R^n$, $y \in R^n$, множеств возможных управлений $u \in \{U\} \subset R^k$, $v \in \{V\} \subset R^l$, функции выигрыша $K(x_0, y_0, u(...), v(...))$, уравнений изменения фазового состояния) позволяет сформировать нормальную форму дифференциального конфликта (игры) в виде кортежа множеств

$$\Gamma(x_0, y_0) = \langle x_0, y_0; P, E, K(x_0, y_0; \tilde{u}(...), v(...) \rangle ,$$

заданного в пространстве пар стратегий $P \times E$. В этом конфликте (игре) оптимальные стратегии противоборствующих сторон (ε-оптимальные стратегии по определению [6]) $u^*(x,y,t)$, $v^*(x,y,t)$ определяются из соотношения

$$K(x_0, y_0; u(x,y,t), v^*(x,y,t) \ge$$
$$\ge K(x_0, y_0; u^*(x,y,t), v^*(x,y,t)) \ge$$
$$\ge K(x_0, y_0; u^*(x,y,t), v(x,y,t))$$

для всех ситуаций

$$(u(x,y,t), v^*(x,y,t)) \text{ и } (u^*(x,y,t), v(x,y,t)) ,$$

для которых существует единственное решение системы

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = f(x, u(x,y,t)); \\ \dfrac{dy}{dt} = g(y, v(x,y,t)), \end{cases} \qquad (1)$$

которое возможно продолжить на множестве $t \in [0, \infty)$.

Решение поставленной задачи будем искать в классе кусочно-программных стратегий, которые имеют определенные преимущества в сравнении с классом синтезирующих стратегий [6]. Под кусочно-программными стратегиями будут пониматься пары элементов $\{\delta, a\}$, где δ – некоторая разбивка множества $[t_0; t_0 + T]$ точками t_i, которые не имеют конечных точек сгущения; a – отображения, которое ставит в соответствие каждому моменту времени t_i и фазовым состояниям $x(t_i)$, $y(t_i)$ некоторое программное управление $u \in U$ при $t \in [t_i, t_{i+1}]$. Таким образом, используя кусочно-программную стратегию противоборствующие стороны реагируют на смену ситуации не непрерывно во времени, а выбирают определенное управление $u(t_i)$ на временном интервале $[t_i, t_{i+1}]$, размеры которого устанавливают сами.

Для решения данной задачи (поиска ε-оптимальных стратегий $u^*(...)$, $v^*(...)$) рассмотрим дифференциальное уравнение в частных производных Айзекса-Беллмана [6]. Согласно [7], в данном конфликте $\Gamma(x,y,t)$, при любых $x, y \in R^n$, $t > 0$, значение конфликта $W(x,y,t)$ в области пространства $R^n \times R^n \times [0; \infty)$, где существуют беспрерывные частичные производные этой функции, удовлетворяют уравнению

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \max_{v \in V} \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial W}{\partial y_i} g_i(y,v) + \min_{u \in U} \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial W}{\partial x_i} f_i(x,u)$$

при начальном условии $W(x,y,0) = W_0$.

Данная система является задачей Корзины, нелинейной относительно частичных производных, что не позволяет получить ее аналитическое решение. Но игровая модель рассмотренного вида является настолько удобной для анализа, что позволяет получить ряд результатов качественного характера даже без решения задачи Коши. Покажем это на примере.

Выделим в модели изменения фазового состояния одной из конфликтующих сторон (1), например стороны P, подсистему, которая связана с формированием сигнала управления оператором (летчиком) $f_a(x,u(x,y,t))$. Искусственное выделение такой подсистемы возможно в любом варианте организации комплекса, так как границы функционирования человека в эргатической системе четко определяются его физиологическими способностями. Если оператор не осуществляет никакого изменения информации, получаемой от технической части, то в этом случае $f_a(x,u(x,y,t)) \equiv 1$, в случае рассмотрения оператора как элемента системы слежения, эту функцию возможно представить в операторном виде, как

$$f_a(p) = e^{-p\tau} \cdot \frac{T_f p + 1}{(T_0 p + 1)(T_n p + 1)},$$

где p, T_f, T_0, T_n – параметры, характеризующие инертность реакции оператора и свойства выдерживания заданного сигнала [2, 3].

Поэтому для любой эргатической системы можно выделить техническую подсистему, которая реализует управляющие сигналы оператора $f_b(x, f_a(x,u(x,y,t)))$.

В этом случае

$$f(x,u(x,y,t)) = f_b(x, f_a(x,u(x,y,t))),$$

а система дифференциальных уравнений (1) будет иметь вид

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = f_b(x, f_a(x,u(x,y,t))); \\ \dfrac{dy}{dt} = g(y, v(x,y,t)). \end{cases}$$

Потребуем выполнение условий непрерывности и дифференцируемости введенных функций. В данном случае эти условия эквивалентны условиям практической реализуемости синтезируемой системы.

Решение уравнения Айзекса-Беллмана [7] $W^*(...)$ для начальных условий $W(x,y,0) = W_0$ задает ε-оптимальные стратегии $u^*(...)$, $v^*(...)$ для каждой из сторон. В силу теоремы существования и единственности решения в данной игре существует единственная ε-оптимальная траектория действий участников. Необходимо отметить, что существование единственного решения имеет принципиальное значение и является необходимым условием дальнейшего процесса решения.

Пусть одна из противоборствующих сторон, например E, изменила стратегию $v = v_1$, так, чтобы изменить решение уравнения Айзекса-Беллмана $W_1(...) > W(...)$, тогда в силу теоремы существования и единственности решения для поддержания значения конфликта $W_1(...) = W(...)$ необходимо соответственно выбрать новую стратегию второй противоборствующей стороны P, $u \in \{U\}$. При этом требования существования единственного оптимального решения справедливы и в этом случае.

ε-оптимальная стратегия $u^*(x,y,t)$ задает единственное значение функции

$$f(x,u^*(x,y,t)) = f_b(x, f_a(x,u^*(x,y,t)))$$

(при заданных начальных условиях x_0, y_0). Согласно принятым требованиям к функциям $f_b(...)$, и $f_a(...)$ оптимальная стратегия $u^*(x,y,t)$ также задает единственное соответствующее им значение

$$F_a(x,y,t) = f_a(x,u^*(x,y,t))$$

$$\text{и } F_b(x,y,t) = f_b(x, f_a(x,u^*(x,y,t))).$$

Эти функции, по сути, являются оптимальными программными траекториями изменения фазовых координат системы для достижения максимально возможного выигрыша в условиях рассматриваемого конфликта, и могут быть использованы как начальные данные при решении задачи оптимизации „в малом” [5].

Задачам оптимальной стабилизации на программной траектории наиболее соответствуют разные варианты квадратичных критериев. Поэтому будем искать решение задачи в классе квадратичных критериев вида [5]

$$J(x,u,t) = \int_{t_0}^{t_k} \left(x^T \cdot \beta \cdot x\right) dt,$$

где β – матрица размера $n \times n$ весовых коэффициентов, определяющих требования к качеству процесса стабилизации соответствующих фазовых координат.

Для синтеза эргатической системы необходимо будет найти значения параметров двух разных критериев: „гомеостазисного”, который отвечает программному движению $F_a(x,y,t)$ и целевому критерию, который отвечает оптимальной траектории $F_b(x,y,t)$. Предлагается общая процедура определения значений параметров β_a, β_b для каждого критерия. Определим частные производные $\dfrac{\partial W}{\partial x_i}$ и $\dfrac{\partial W}{\partial u_j}$, $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,k}$. Их значение характеризует влияние компоненты вектора фазового состояния стороны конфликта $x \in R^n$ или компоненты вектора управления $u(x,y,t) \in \{U\}$ на значение выигрыша W. Для компонентов, которые наиболее влияют на решение уравнения Айзекса-Беллмана (которые имеют наибольшее значение $\dfrac{\partial W}{\partial x_i}$ и $\dfrac{\partial W}{\partial u_j}$) необходимо поставить в соответствие наименьшие значения соответствующих параметров β_{ii}, и наоборот, для компонентов, которые имеют наименьшие значения производной поставить в соответствие наибольшие значения β_{ii}. Предлагается регулярная процедура определения параметров матриц весовых коэффициентов: их значение должно быть обратно пропорционально значению соответствующей производной, $\beta_{ii} \sim \frac{\partial W}{\partial x_i}$ или $\beta_{jj} \sim \frac{\partial W}{\partial u_j}$. В качестве базиса следует взять то значение, которому отвечает наименьшее влияние на результат решения уравнения Айзекса-Беллмана: $\beta_{ii} = 1 : \min \frac{\partial W}{\partial x_i}$ или $\beta_{jj} = 1 : \min \frac{\partial W}{\partial u_j}$.

Результаты исследования позволяют сделать следующие **выводы**:

– предложенный методический подход может рассматриваться как системный инструмент решения проблем, которые возникают при синтезе эргатических систем управления в условиях, где существующие методы являются не результативными. Системность решения заключается в разработке такого методического аппарата, которой позволил свести сложную задачу синтеза „в большом” к решению большого количества известных задач оптимизации „в малом”. Это позволит, на взгляд авторов, органически связать методы теории оптимизации автоматических систем и методы теории оптимизации эргатических систем в единую общую систему;

– практическая ценность предложенного подхода состоит в том, что он ориентирован на решение практических задач синтеза и использует уже известные свойства сложных комплексов (известные математические модели технической составляющей и оператора). Он ориентирован на получение максимальных преимуществ за счет максимальной реализации тактико-технических возможностей собственного комплекса вооружения синтезированной эргатической системой управления.

– дальнейшим этапом исследования в этом направлении безусловно является изучение возможности распространения предложенного подхода на класс задач синтеза с учетом различных форм неопределенности, как характерного фактора функционирования эргатических систем военного назначения.

Список литературы

1. *Кононов О.А., Пастушенко В.П., Довжук Д.В. Методичні обмеження підходів до синтезу ергатичних систем керування при забезпеченні їх стійкості до відмов // Збірник наукових праць ДНДІА. – К.: ДНДІА. – 2006. – № 8.– С. 27-34.*
2. *Павлов В.В. Начало теории эргатических систем. – К.: Наукова думка, 1975. – 240с.*
3. *Артюшин Л.М., Зиатдинов Ю.К., Попов И.А., Харченко А.В. Большие технические системы. Проектирование и управление / Под ред. И.А. Попова. – Х.: Факт, 1997. – 400 с.*
4. *Кунцевич В.М., Лычак М.М. Синтез оптимальных и адаптивных систем управления: игровой подход. – К.: Наукова думка, 1985.– 245 с.*
5. *Справочник по теории автоматического регулирования / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.*
6. *Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Семина Е.А. Теория игр. – М.: Высшая школа, 1998. – 304 с.*
7. *Айзекс Р. Дифференциальные игры. – М.: Мир, 1967. – 480 с.*

Поступила в редколлегию 15.09.2006

Рецензент: д-р воен. наук, проф. Г.А. Дробаха, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.