ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.7

ВЫБОР ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОЦЕЛЕВОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Маленков А.А.

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения,
ЦНИИмаш, ул. Пионерская, 4, Королёв, Московская область, 141070, Россия
e-mail: malenkov.anton@mail.ru

Рассматривается задача выбора проектных решений при проектировании системы беспилотных летательных аппаратов в условиях неопределенности, объясняющейся воздействием неконтролируемых факторов как природного, так и искусственного происхождения. Под устойчивостью проектных решений в работе понимается совокупность таких проектных параметров, при которых вероятность выполнения системой целевой задачи не ниже заданной при всех значениях неконтролируемых факторов, связанных с целью. Вводится критерий устойчивости проектного решения по отношению к действующим неконтролируемым факторам в условиях большого числа функциональных ограничений. В качестве такого критерия в работе используется критерий регулярности, записанный относительно констант Липшица, характеризующих степень устойчивости критериальных оценок по отношению к вариациям факторов неопределенности. Такая постановка задачи позволяет избежать субъективизма, который сопутствует применению информационных гипотез, введению законов распределения неконтролируемых факторов, выбору сверток неконтролируемых факторов.

Ключевые слова: многофакторная неопределенность, статистическая выборка, константа Липшица, критерий регулярности, устойчивое проектное решение.

Введение

В процессе принятия технических решений неизбежно возникает многофакторная неопределенность. Решение проектной задачи в условиях такой неопределенности полностью зависит от принятых значений неконтролируемых факторов, что приводит к неоднозначности в принимаемом окончательном решении [1, 2, 17].

В связи с этим, прежде чем проводить поиск оптимального решения, необходимо каким-либо образом зафиксировать неконтролируемые факторы, что делается с помощью различных информационных гипотез, введения законов распределения и их параметров, привлечения аппарата сверток неконтролируемых факторов. Однако выбор конкретного вида свертки есть неформальная операция, осуществляемая лицом, принимающим решения (ЛПР), что может приводить к субъективизму в принятии решений и, соответственно, к снижению эффективности разрабатываемых сложных технических систем (СТС).

С другой стороны, задача принятия проектных решений при проектировании СТС — это также и задача оптимального распределения целей между отдельными элементами системы, которая по существу является комбинаторной, но, в силу большой размерности и огромного количества функциональных ограничений, стандартные методы решения комбинаторных задач здесь малопригодны. Замена внешнего целевого множества некоторой расчетной характеристикой также недопустима, так как расчетные характеристики зачастую приводят к появлению существенной систематической ошибки, а в ряде случаев вообще могут отсутствовать.

Для решения задач такого класса строится функция $E(\omega)$, являющаяся обобщением расчетных характеристик и позволяющая оценить работу системы в целом, по всей совокупности выполняемых ею задач. Правила построения такой функции устанавливаются средствами статистического синтеза, где основным объектом является статистическая выборка. Такая выборка строится для всего многообразия проектных параметров и неконтролируемых факторов, и по критерию оптимальности проводится построение функции распределения целевых задач по типам летательных аппаратов системы таким образом, чтобы система в целом была устойчива, т. е. обеспечивала эффективность не ниже заданной при всех значениях неконтролируемых факторов из заданного множества.

Постановка задачи

В статье рассматривается построение наряда крылатых ракет (КР) как сложной технической системы, перед которой поставлена задача оптимального распределения целей между ее элементами. Помимо построения функции распределения, выбираются оптимальные проектные параметры каждого типа КР, а также устойчивое проектное решение такой системы.

Рассматривается внешнее целевое множество W и множество стратегий построения системы КР Y [3]. Внешнее множество целевое множество W задается вектором неконтролируемых факторов:

$$W = \{\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_n\}.$$

Здесь n — количество целей; ω_i, $i = \overline{1,n}$ — вектор характеристик i-й цели,

$$\omega_i = (x_{\text{ц}_i}, y_{\text{ц}_i}, z_{\text{ц}_i}),\ i = \overline{1,n},$$

где $x_{\text{ц}_i}, y_{\text{ц}_i}, z_{\text{ц}_i}$ — начальные целеуказания головки самонаведения относительно положения i-й цели по осям x, y, z; $V_{\text{ц}_i}$ — скорость i-й цели.

Множество стратегий построения системы КР [4, 5] задается вектором проектных параметров, которые определяют все типы КР, входящие в данную систему. Стратегия А определяется набором проектных параметров $y_j = \{d_{1_j}, d_{2_j}, \ldots, d_{n_j}\}$, где d_{i_j} — i-й проектный параметр, входящий в j-ю стратегию:

$$A = \{y_j\} \subset Y,\ j = \overline{1,m},$$

где m— количество типов КР в системе.

В данной работе в качестве вектора проектных параметров принят вектор $y = \{n_0, S_{\text{кр}}\}$, где n_0 — начальная тяговооруженность; $S_{\text{кр}}$ — площадь крыла КР.

На проектные параметры d_i, $i = \overline{1,n}$ накладываются параметрические и функциональные ограничения:

$$d_{i\,\min} \le d_i \le d_{i\,\max},\ i = \overline{1,n},$$

$$g_i(d) \ge 0,\ j = \overline{1,m}.$$

В качестве функциональных ограничений могут быть условия вида $e(i,j) = 1; e(i+1, j+1) = 1$ — одни и те же полезные нагрузки (i и i+1) не могут доставляться двумя (j и j+1) типами КР или $\forall e(i,j) = \varnothing$ — недопустимо, т.е. i-я целевая задача не может быть решена ни одним типом КР и т.п.

На X определяется однозначная целочисленная распределяющая функция (функция целераспределения) $E(\omega)$, принимающая значения 1, 2,..., m. Тогда каждому y_j сопоставляется в W его область Дирихле D_j, в точках которой распределяющая функция принимает значение, равное j (т.е. область Дирихле D_j состоит из такого множества целевых задач, которое решается КР j-го типа):

$$D_j = \{\omega \in W \mid E(\omega) = j\},\ j = \overline{1,m}.$$

Очевидно, что выполнены следующие условия:

$$D_j \cap D_k = \varnothing, \forall j,k = 1,2,\ldots,m, j \ne k,$$

$$\bigcup_{j=1}^{m} D_j = W.$$

Наряду с функцией распределения вводится элементарная функция распределения $e(i,j)$, определяемая в виде:

$$e(i,j) = \begin{cases} 1, \text{ если } i = j, \text{ т.е. если } i\text{-я задача} \\ \text{выполняется } j\text{-м типом КР;} \\ 0 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Проектные параметры представляются в виде аппроксимаций тригонометрическими полиномами, в которых аргументом J является критерий оптимальности, представленный в виде вероятности накрытия i-й цели:

$$J = P_{\text{нак}\, i};$$

$$n_0 = \frac{a_0^{(1)}}{2} + [a_1 \cos(\omega_1 J) + b_1 \sin(\omega_1 J)];$$

$$S_{\text{кр}} = \frac{a_0^{(2)}}{2} + [a_2 \cos(\omega_2 J) + b_2 \sin(\omega_2 J)].$$

Здесь $a_0^{(1)}, i = \overline{1,2}$ — среднее значение i-го параметра; $a_i, b_i, i = \overline{1,2}$ — коэффициенты Фурье; $\omega_i, i = \overline{1,2}$ — частота.

Ставится следующая задача.

Найти

$$P_\Sigma^{\max} = \max_{y \in D} \max_{E(\omega)} P(y, E(\omega))$$

при

$$d_{i\,\min} \le d_i \le d_{i\,\max},\ i = \overline{1,n};$$

$$g_i(y) \ge 0,\ j = \overline{1,m}.$$

В качестве критерия устойчивости принимается критерий регулярности вида

$$\Delta^2(B)^{\text{opt}} = \min_{\substack{\{a_1, b_1, \omega_1\} \\ \{a_2, b_2, \omega_2\}}} \frac{\sum_{i=1}^{N} \left[K_i - K_{i\,\text{зад}}\right]^2}{\sum_{i=1}^{N} \left(K_{i\,\text{зад}}\right)^2},$$

где K_i — константа Липшица в i-й строке статистической выборки объема N; $K_{i\,\text{зад}}$ — заданное значение константы Липшица.

Таким образом, ставится задача двухуровневой оптимизации. На ее верхнем уровне выбирается функция распределения типов КР, на нижнем — выбор такого набора проектных параметров, при котором суммарная эффективность системы КР будет не ниже заданной P_Σ при любой вариации неконтролируемых факторов из заданного множества W.

Устойчивость проектного решения к многофакторной неопределенности

Устойчивое функционирование крылатой ракеты по траектории означает, что траектория движения каждой отдельной КР будет устойчивой по отношению к вектору неконтролируемых факторов $\omega_i, i = \overline{1,k},$ где k— количество целей.

Устойчивость движения здесь понимается так, как в [4]. В данной работе определение устойчивости уточняется следующим образом: если при всех значениях неконтролируемых факторов из заданного множества W движение всех элементов заданной динамической системы приводит к вероятности выполнения целевых задач не меньше заданной, то движение устойчиво.

Математическую модель динамической системы можно представить в виде следующего нелинейного операторного уравнения:

$$Cy = J,\ y \in D,\ J \in F,$$

где C — непрерывный нелинейный оператор, отображающий метрическое пространство D на метрическое пространство F. Элементами пространства D являются наборы проектных параметров y, $y \in D$, т.е. D определяется как множество допустимых решений [10].

Из определения многофакторной устойчивости проектного решения к неконтролируемым факторам [6—9] можно записать следующее условие устойчивости:

$$\inf_{y \in D} \sup_{\omega \in W} \left\| C^n y - J_0 \right\| = \inf_{y \in D} \inf_{\omega \in W} \left\| C^n y - J_0 \right\|.$$

Здесь J_0 — принятый критерий оптимальности; C^n — возмущенный оператор порядка n, обусловленный действиями неконтролируемых факторов. Порядок n определяется уровнем действующих неконтролируемых факторов:

$$n = \|\omega - \omega_0\|,$$

где ω_0 — номинальный вектор неконтролируемых факторов.

Исходная статистическая выборка имеет вид, представленный в табл. 1.

Условия устойчивости, представленные через константу Липшица, имеют вид

$$\frac{\left|P_{\text{нак}_i} - P_{\text{нак}_j}\right|}{\left\|y_i - y_j\right\|} \le K,$$

где K — константа Липшица; y_i — i-й вариант набора проектных параметров, при котором вероятность накрытия $P_{\text{нак}_i}$; y_j — j-й вариант набора про-

Таблица 1

Исходная статистическая выборка

y	ω	$P_{\text{нак}}$
$(d_1, d_2, ..., d_n)_1$	$\omega_{1,1}$ $\omega_{2,1}$ ... $\omega_{N_1,1}$	$P_{\text{нак}_1}$
$(d_1, d_2, ..., d_n)_2$	$\omega_{1,2}$ $\omega_{2,2}$ ... $\omega_{N_1,2}$	$P_{\text{нак}_2}$
...		
$(d_1, d_2, ..., d_n)_N$	$\omega_{1,N}$ $\omega_{2,N}$ ... $\omega_{N_1,N}$	$P_{\text{нак}_N}$

ектных параметров, при котором вероятность накрытия $P_{\text{нак}_j}$.

Для того чтобы проектное решение было устойчиво к многофакторной неопределенности, необходимо, чтобы отображение было сжимающим, т.е. чтобы $K < 1$. При этом чем меньше значение K, тем больше степень устойчивости проектного решения [4, 16, 18].

Используя данные из табл. 1, запишем статистическую выборку, необходимую для формирования устойчивого проектного решения (табл. 2).

В каждой строке статистической выборки табл. 2 задаются два варианта набора проектных параметров, которые необходимы для расчета условия устойчивости.

Модельные значения константы Липшица восстанавливаются в классе тригонометрических полиномов:

$$K_i^M = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{m}\left[a_i \cos\left(\omega_i \prod_{i=1}^{n} y_i\right) + b_i \sin\left(\omega_i \prod_{i=1}^{n} y_i\right)\right].$$

Здесь a_0 — среднее значение выходных данных из табл. 2; m — количество гармоник; $a_i, b_i, i = \overline{1,m}$ — коэффициенты Фурье; ω_i, $i = \overline{1,m}$ — частота. Параметры a_i, b_i, ω_i определяются из условия минимума критерия регулярности:

$$\Delta^2(B)^{\text{opt}} = \min_{\left\{\substack{a_1, b_1, \omega_1 \\ i=\overline{1,m}}\right\}} \frac{\sum_{i=1}^{N}\left[K_i^M - K_i^T\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(K_i^T\right)^2}.$$

Для всех строк выборки из табл. 2 значения заданной константы Липшица $K^{\text{зад}}$ принимаются одинаковыми:

$$K_{1\,\text{зад}} = K_{2\,\text{зад}} = ... = K_{N\,\text{зад}}.$$

Это необходимое условие того, чтобы вероятность выполнения целевой задачи всей динамической системой в целом была не ниже заданной.

Таблица 2

Статистическая выборка для формирования устойчивого проектного решения

№	Вектор проектного решения y	Константа Липшица $K^T = \frac{\left\|P_{\text{нак}_i} - P_{\text{нак}_j}\right\|}{\left\|y_i - y_j\right\|}$	Заданная константа Липшица $K_{\text{зад}}$
1	$y_1 = (n_0, S_{\text{кр}})_1$ $y_2 = (n_0, S_{\text{кр}})_2$	$\left(\frac{\left\|P_{\text{нак}_i} - P_{\text{нак}_j}\right\|}{\left\|y_i - y_j\right\|}\right)_1$	$K_{1\ \text{зад}}$
2	$y_3 = (n_0, S_{\text{кр}})_3$ $y_4 = (n_0, S_{\text{кр}})_4$	$\left(\frac{\left\|P_{\text{нак}_i} - P_{\text{нак}_j}\right\|}{\left\|y_i - y_j\right\|}\right)_2$	$K_{2\ \text{зад}}$
...	...	...	...
N	$y_{N-1} = (n_0, S_{\text{кр}})_{N-1}$ $y_N = (n_0, S_{\text{кр}})_N$	$\left(\frac{\left\|P_{\text{нак}_i} - P_{\text{нак}_j}\right\|}{\left\|y_i - y_j\right\|}\right)_N$	$K_{N\ \text{зад}}$

Устойчивый набор проектных параметров формируется по следующему правилу:

$$\frac{\partial K_i}{\partial d_i} = 0 \Rightarrow d_i^{\text{ust}},$$

$$y^{\text{ust}} = (d_1^{\text{ust}}, d_2^{\text{ust}}, ..., d_n^{\text{ust}}).$$

Задача оптимального типажирования системы КР решается при уже найденном устойчивом векторе проектного решения (наборе проектных параметров) y^{ust}.

Принцип статистического изоморфизма

Пусть требуется с заданной точностью найти глобальный максимум функции $f(X), x \in E^{(n)}$ на множестве *X*, определяемом системой из *m* ограничений типа неравенств

$$X = \{x : g_i(x) \geq 0, \ i = \overline{1,m}\}.$$

Предполагается, что *X* ограничено, является замыканием открытого множества в $E^{(n)}$ и известен *n*-мерный параллелепипед

$$\Pi = \{x : a_i \leq x_i \leq b_i\}, \ i = \overline{1,n},$$

содержащий в себе *X*. Тогда в силу ограниченности множества *X* такой параллелепипед всегда существует. Множество *X* может быть невыпуклым и неодносвязным.

Для решения поставленной задачи используется тот же метод обратной функции, но с одним принципиальным отличием: здесь строится не одна, а две статистические выборки. Первая статистическая выборка — это исходная выборка, в которой вектор условий состоит из всех заданных ограничений $g_i(x) \geq 0, \ i = \overline{1,m}.$ Вторая выборка формируется из первой за исключением тех строчек, в которых не выполняется хотя бы одно из заданных ограничений. Таким образом, вторая выборка состоит лишь из «хороших» (с точки зрения удовлетворения заданным ограничениям) аргументов. Полученная по данной выборке зависимость будет удовлетворять всем заданным ограничениям. Это следует из принципа статистического изоморфизма. Согласно этому принципу, все свойства и закономерности, имеющиеся в статистической выборке, отображаются в полиномиальных моделях, полученных методом статистического синтеза. Принцип статистического изоморфизма будет справедлив при выполнении ряда условий, относящихся к структуре исходной выборки, а также к точности аппроксимирующей модели.

Основная проблема, возникающая при реализации принципа статистического изоморфизма, заключается в том, что вероятность получить выборку с решениями, удовлетворяющими всем заданным ограничениям, будет стремиться к нулю с ростом числа ограничений. В таких ситуациях необходимо предварительно скорректировать исходную постановку задачи и уже далее применять принцип статистического изоморфизма [11—15,19, 20].

Модельная задача

Рассматривается задача построения системы КР оптимального типажа, которая обслуживает шесть целевых задач. В табл. 3 приведены массы полезных нагрузок $m_{\text{п.н}}$ и соответствующие частоты пусков υ по всем задачам.

Таблица 3

Массы полезных нагрузок и частоты пусков

N п/п	$m_{\text{п.н}}$, кг	υ
1	100	4
2	200	3
3	300	3
4	500	5
5	700	2
6	1000	3

В качестве проектных параметров приняты:

n_0 — начальная тяговооруженность;

$S_{\text{кр}}$ — площадь крыла КР.

Каждая цель характеризуется следующим набором неконтролируемых факторов:

$\omega_1 = x_{\text{ц}}$ — начальная координата цели по оси *x*;

$\omega_2 = z_{\text{ц}}$ — начальная координата цели по оси *z*;

$\omega_3 = V_{\text{ц}}$ — скорость цели;

$\omega_4 = \psi_{\text{ц}}$ — курс цели.

Вероятность выполнения системой целевой задачи должна быть не менее 0,8.

Первый вариант задачи оптимального типажирования КР решался при исходных данных, представленных в табл. 4.

В задаче рассматривались три типоразмера КР:

$$y_1 = \begin{cases} n_{01} = 1{,}1; \\ S_{\text{кр}} = 4{,}1; \end{cases}$$

Таблица 4

Первый вариант набора значений неконтролируемых факторов

№ целевой задачи	$m_{\text{п.н}}$, кг	$x_{\text{ц}}$, м	$z_{\text{ц}}$, м	$V_{\text{ц}}$, м/с	$\psi_{\text{ц}}$, рад
1	100	42700	2270	15	- 0,6
2	200	44800	3000	15	- 0,45
3	300	45000	1500	20	- 0,3
4	500	42000	5700	20	-0,2
5	700	43000	4000	15	-0,4
6	1000	44500	-9000	12	- 0,5

$$y_2 = \begin{cases} n_{02} = 1,2; \\ S_{\text{кр}} = 4,3; \end{cases}$$

$$y_3 = \begin{cases} n_{03} = 1,3; \\ S_{\text{кр}} = 4,5. \end{cases}$$

Оптимальная функция распределения имеет следующий состав:

$$e(1,1) = 1;$$
$$e(3,1) = 1;$$
$$e(2,3) = 1;$$
$$e(2,4) = 1;$$
$$e(5,5) = 1,$$

при этом вероятность выполнения системой целевой задачи 0,9.

Второй вариант задачи оптимального типажирования КР решался при исходных данных, представленных в табл. 5.

Параметры КР приняты те же, что и в первом варианте задачи. Оптимальная функция целераспределения имеет следующий состав:

$$e(1,1) = 1;$$
$$e(3,1) = 1;$$
$$e(2,3) = 1;$$
$$e(2,4) = 1;$$
$$e(5,5) = 1,$$

при этом вероятность выполнения системой целевой задачи та же самая, что и в первом варианте задачи:

$$P = 0,9.$$

Далее решалась задача выбора проектного решения, устойчивого к неконтролируемым факторам $x_{\text{ц}}$, $z_{\text{ц}}$, $V_{\text{ц}}$, $\psi_{\text{ц}}$, значения которых приведены в двух вариантах задачи. Условия устойчивости и привели к следующим проектным параметрам:

$$n_0^{\text{ust}} = 1,2; \; S_{\text{кр}}^{\text{ust}} = 4,8.$$

Таблица 5

Второй вариант набора значений неконтролируемых факторов

№ целевой задачи	$m_{\text{п.н}}$, кг	$x_{\text{ц}}$, м	$z_{\text{ц}}$, м	$V_{\text{ц}}$, м/с	$\psi_{\text{ц}}$, рад
1	100	38000	5000	10	- 0,6
2	200	41000	4000	15	- 0,8
3	300	36000	7000	20	- 0,5
4	500	42000	6000	15	-0,3
5	700	42000	2000	15	-0,2
6	1000	45000	-9000	12	- 0,5

КР с такими параметрами решает все целевые задачи с вышеприведенными неконтролируемыми факторами, т.е. система состоит из одного типа КР, вероятность выполнения системой целевой задачи 0,9.

Выводы

Разработан метод статистического синтеза системы беспилотных летательных аппаратов, устойчивой к многофакторной неопределенности в условиях большого числа функциональных ограничений. Выработан критерий устойчивости проектного решения крылатой ракеты к многофакторной неопределенности, имеющий вид статистического критерия регулярности, записанного относительно константы Липшица.

Построены системы КР оптимального типажа с применением вероятностного целераспределения, и они сопоставлены с системой КР, с проектным решением, устойчивым к действующим факторам неопределенности. Сравнение показало, что устойчивость проектного решения позволяет выбрать систему, состоящую из одного типа КР, при этом с лучшим показателем по критерию регулярности.

Библиографический список

1. *Тарасов Е.В., Балык В.М.* Методы проектирования летательных аппаратов: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. — 322 с.
2. *Пиявский С.А., Брусов В.С., Хвилон Е.А.* Оптимизация параметров многоцелевых летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1974. — 168 с.
3. *Молодцов Д.А.* Устойчивость и регуляризация принципов оптимальности // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1980. Т. 20. № 5. С. 1117-1129.
4. *Северцев Н.А., Балык В.М., Маленков А.А.* Выбор проектных решений системы беспилотных летательных аппаратов, устойчивой к многофакторной неопределенности // Наукоемкие технологии. 2017. Т. 18. №10. С. 12-16.
5. *Балык В.М., Маленков А.А., Петровский В.С., Станченко А.С.* Построение многоцелевой системы крылатых ракет в условиях многофакторной неопределенности // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 10(70). С. 4.
6. *Орлянская И.В.* Современные подходы к построению методов глобальной оптимизации // Электронный журнал «Исследовано в России». 2002. URL: http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/189.pdf
7. *Кошур В.Д.* Адаптивный алгоритм глобальной оптимизации на основе взвешенного усреднения координат и нечетко-нейронных сетей // Электронный журнал «Нейроинформатика». 2006. Т. 1. № 2. С. 106-123. URL: https://www.niisi.ru/iont/ni/Journal/N2/
8. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. — М.: Горячая линия — Телеком, 2013. — 384 с.
9. *Балык В.М. Костомаров Д.П, Кукулин В.М., Шишаев К.А.* Самоорганизационный подход к построению вариаеционного базиса // Математическое моделирование. 2002. Т. 14. № 10. С. 43-58.
10. *Гусейнов А.Б., Трусов В.Н.* Проектирование крылатых ракет с ТРД. — М.: Изд-во МАИ, 2003. — 87 с.
11. *Балык В.М.* Статистический синтез проектных решений при разработке сложных систем. — М.: Изд-во МАИ, 2011. — 278 с.
12. *Freeman Jacob A., Roy Christopher J.* Global optimization under uncertainty and uncertainty quantification applied to tractor-trailer base flaps // Journal of Verification, Validation and Uncertainty Quantification. 2016. Vol. 1. No. 2, 16 p. DOI: 10.1115/1.4033289
13. *Тищенко А.А.* Комплексный подход к анализу эффективности и безопасности сложных систем // Фундаментальные проблемы системной безопасности: Сборник трудов V Международной научной конференции. Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2014. С. 307-313.
14. *Балык В.М., Калуцкий Н.С.* Статистический синтез устойчтвых проектных решений при проектировании летательного аппарата в условиях многофакторной неопределенности // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 1. С. 29-36.
15. *Балык В.М., Веденков К.В., Кулакова Р.Д.* Методы структурно-параметрического синтеза многоцелевых систем летательных аппаратов с многомерным внешним неоднородным целевым множеством // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 4. С. 49-59.
16. *Шарый С.П.* Курс вычислительных методов: Учебное пособие. — Новосибирск: Институт вычислительных технологий СО РАН, 2012. — 316 с.
17. *Лотов А.В., Поспелова И.И.* Многокритериальные задачи принятия решений: Учебное пособие. — М.: МАКС Пресс, 2008. — 197 с.
18. *Балашов М.В.* Максимизации функции с непрерывным по Липшицу градиентом // Фундаментальная и прикладная математика. 2013. Т. 18. №5. С. 17-25.
19. *Репин В.Г., Тартаковский Г.П.* Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптации информационных систем. — М.: Советское радио, 1977. — 432 с.
20. *Хомяков П.М.* Системный анализ: экспресс-курс лекций / Под. ред. В.П. Прохорова. — М.: Изд-во ЛКИ, 2008. — 216 с.

DESIGN SOLUTIONS SELECTION WHILE DEVELOPING A SYSTEM OF UNMANNED FLYING VEHICLES IN CONDITIONS OF MULTI-TARGET UNCERTAINTY

Malenkov A.A.

Central Research Institute of Machine Building,
4, Pionerskaya str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
e-mail: malenkov.anton@mail.ru

Abstract

The article is devoted to the design solutions selection while developing a system of unmanned aerial vehicles in conditions of uncertainty. The presented article such system is assumed as a party of cruise missiles (CM) targeted at hitting an enemy naval ship grouping.

Besides solving the problem of cruise missiles optimal distribution over the target assignments this work solves the problem of ensuring stability at large. Here, the stability means achieving the probability of hitting the targets, no less than the specified one, for all possible values of uncontrolled factors.

By stability in the article is meant the achievement of the probability of defeat of target tasks not lower than given for all possible values of uncontrollable factors. Thus, the problem is set as:

$$P_{\Sigma}^{\max} = \max_{y \in D} \max_{E(\omega)} P(y, E(\omega))$$

with

$$d_{i\,\min} \le d_i \le d_{i\,\max},\ i = \overline{1,n};$$

$$g_i(y) \ge 0,\ j = \overline{1,m},$$

where d is the vector of design parameters, $E(\omega)$ is the distribution function, and P is the probability of failure.

The distribution function $E(\omega)$ is constructed with engagement of statistical synthesis operations. A regularity criterion was adopted as a criterion of stability:

$$\Delta^2(B)^{\text{opt}} = \min_{\left\{\substack{a_1, b_1, \omega_1 \\ a_2, b_2, \omega_2}\right\}} \frac{\sum_{i=1}^{N} \left[K_i - K_{i\,\text{pos}}\right]^2}{\sum_{i=1}^{N} \left(K_{i\,\text{pos}}\right)^2},$$

where K_i is the Lipschitz constant in the i-th row of the statistical sample of the N volume, $K_{i\,\text{pos}}$ is the specified value of the Lipschitz constant.

To ensure stable design solution, the contracting mapping is necessary, i.e. the Lipschitz constant should be less than one. With this, the less the Lipschitz constant value, the higher the degree of the design solution stability.

At each step of the statistical sample, two variants of design parameters are set. They are necessary for stability condition calculatiщn. The model values of the Lipschitz constant are restored in the class of trigonometric polynomials:

$$K_i^M = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{m} \left[a_i \cos\left(\omega_i \prod_{i=1}^{n} y_i \right) + b_i \sin\left(\omega_i \prod_{i=1}^{n} y_i \right) \right],$$

where a_0 is the average value of the output, m is the number of harmonics, $a_i, b_i, i = \overline{1,m}$ are Fourier coefficients, ω_i, $i = \overline{1,m}$ is the frequency. The parameters a_i, b_i, ω_i are determined from the condition of the minimum of the regularity criterion:

$$\Delta^2(B)^{\text{opt}} = \min_{\left\{\substack{a_1, b_1, \omega_1 \\ i = \overline{1,m}}\right\}} \frac{\sum_{i=1}^{N} \left[K_i^M - K_i^T\right]^2}{\sum_{i=1}^{N} \left(K_i^T\right)^2}.$$

A stable set of design parameters is formed by to the following rule:

$$\frac{\partial K_i}{\partial d_i} = 0 \Rightarrow d_i^{\text{ust}},$$

$$y^{\text{ust}} = (d_1^{\text{ust}}, d_2^{\text{ust}}, \ldots, d_n^{\text{ust}}).$$

The problem of CM system optimal ranging is being solved at the already obtained stable vector of the design solution (the set of design parameters) y^{ust}.

The presented work solved the problem of CM system of optimal ranging, which maintains six target problems. The initial thrust-to-weight ratio and the wing area are assumed as design parameters. The target's required payload mass, coordinates, speed and course are assumed as uncontrolled parameters.

Three nominal sizes of CMs were considered in the framework of the set problem:

$$y_1 = \begin{cases} n_{01} = 1{,}1; \\ S_{\text{кр}} = 4{,}1; \end{cases}$$

$$y_2 = \begin{cases} n_{02} = 1{,}2; \\ S_{\text{кр}} = 4{,}3; \end{cases}$$

$$y_3 = \begin{cases} n_{03} = 1{,}3; \\ S_{\text{кр}} = 4{,}5. \end{cases}$$

Depending on the uncontrolled factors values, two variants of the cruise missiles optimal ranging were solved, and two distribution functions $E(\omega)$ were constructed. It is shown that the probability of the system performing the target task appeared to be the same and equals to $P = 0{,}9$.

Further, the problem of a design solution selection stable to uncontrolled factors was solved. The stability conditions gave the following design parameters:

$$n_0^{\text{ust}} = 1{,}2;\ S_{\text{кр}}^{\text{ust}} = 4{,}8.$$

Thus, a cruise missile with such parameters solves all the target problems with uncontrolled factors given in the work, i.e. the cruise missile system includes cruise missiles of the same type, and the probability of accomplishing the target problem by the system is 0.9.

Keywords: multifactor uncertainty, statistical sampling, Lipschitz constant, regularity criterion, stable design solution.

References

1. Tarasov E.V., Balyk V.M. *Metody proektirovaniya letatel'nykh apparatov* (Methods of aircraft design), Moscow, MAI-PRINT, 2008, 322 p.
2. Piyavskii S.A., Brusov V.S., Khvilon E.A. *Optimizatsiya parametrov mnogotselevykh letatel'nykh apparatov* (Multipurpose aircraft parameters optimization), Moscow, Mashinostroenie, 1974, 168 p.
3. Molodtsov D.A. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 1980, vol. 20, no. 5, pp. 1117–1129.
4. Severtsev N.A., Balyk V.M., Malenkov A.A. *Naukoemkie tekhnologii,* 2017, vol. 18, no. 10, pp. 12-16.
5. Balyk V.M., Malenkov A.A., Petrovskii V.S., Stanchenko A.S. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, no. 10(70), p. 4.
6. Orlyanskaya I.V. *Issledovano v Rossii*, 2002, available at: http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/189.pdf
7. Koshur V.D. *Neiroinformatika,* 2006, vol. 1, no. 2, pp. 106-123, available at: https://www.niisi.ru/iont/ni/Journal/N2/
8. Rutkovskaya D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. *Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* (Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems), Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2013, 384 p.
9. Balyk V.M. Kostomarov D.P, Kukulin V.M., Shishaev K.A. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2002, vol. 14, no. 10, pp. 43-58.
10. Guseinov A.B., Trusov V.N. *Proektirovanie krylatykh raket s TRD* (Design of cruise missiles with turbojet), Moscow, MAI, 2003, 87 p.
11. Balyk V.M. *Statisticheskii sintez proektnykh reshenii pri razrabotke slozhnykh system* (Statistical synthesis of design solutions for complex systems development), Moscow, MAI, 2011, 278 p.
12. Freeman Jacob A., Roy Christopher J. Global optimization under uncertainty and uncertainty quantification applied to tractor-trailer base flaps. *Journal of Verification, Validation and Uncertainty Quantification*, 2016, vol. 1, no. 2, 16 p. DOI: 10.1115/1.4033289
13. Tishchenko A.A. *Materialy V Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Fundamental'nye problemy sistemnoi bezopasnosti".* Elets, Eletskii gosudarstvennyi universitet im. I.A. Bunina, 2014, pp. 307-313.
14. Balyk V.M., Kalutskii N.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta,* 2008, vol. 15, no. 1, pp. 29-36.
15. Balyk V.M., Vedenkov K.V., Kulakova R.D. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta,* 2014, vol. 21, no. 4, pp. 49-59.
16. Sharyi S.P. *Kurs vychislitel'nykh metodov* (Course of computational methods), Novosibirsk, Institut vychislitel'nykh tekhnologii SO RAN, 2012, 316 p.
17. Lotov A.V., Pospelova I.I. *Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenii* (Multi-criteria decision-making problems), Moscow, MAKS Press, 2008, 197 p.
18. Balashov M.V. *Fundamental'naya i prikladnaya matematika,* 2013, vol. 18, no. 5, pp. 17-25.
19. Repin V.G., Tartakovskii G.P. *Statisticheskii sintez pri apriornoi neopredelennosti i adaptatsii informatsionnykh sistem* (Statistical synthesis with a priori uncertainty and information systems adaptation), Moscow, Sovetskoe radio, 1977, 432 p.
20. Khomyakov P.M. *Sistemnyi analiz* (System analysis), Moscow, LKI, 2008, 216 p.