

УДК 621.431.75

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР НАИЛУЧШЕГО ВАРИАНТА КОНСТРУКЦИИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

©2014 В.В. Сафронов, В.А. Поршнева, А.С. Жебраков

Конструкторское бюро «Электроприбор», г. Саратов

Осуществлены вербальная и математическая постановки задачи многокритериального ранжирования вариантов конструкции пульсирующего детонационного двигателя. С использованием метода морфологического ящика составлена морфологическая таблица, на основе которой сгенерировано множество возможных вариантов конструкции пульсирующих детонационных двигателей. При составлении морфологической таблицы было учтено представление пульсирующих детонационных двигателей в виде следующих подсистем: детонационная камера; система подачи компонентов; система инициирования; система управления. В конечном итоге в качестве допустимых вариантов, которые и подвергались исследованию на огневом стенде, было отобрано двадцать вариантов. Предложена система критериев для оценки вариантов конструкции пульсирующих детонационных двигателей (удельная тяга, лобовая тяга, удельный расход, удельная масса, длина). Значения критериев определялись в ходе огневых испытаний; Раскрыты особенности решения задач при использовании методов «жесткого» ранжирования, анализа иерархий, Борда. Сформулирован критерий построения истинных кортежей Парето. С использованием методов «жесткого» ранжирования, анализа иерархий, Борда, критерия построения истинных кортежей Парето решены прикладные задачи выбора наилучшего варианта пульсирующего детонационного двигателя для трёх важных случаев: атмосфера учитывается, пульсирующий детонационный двигатель испытывает влияние лобового сопротивления; атмосфера учитывается, пульсирующий детонационный двигатель находится внутри летательного аппарата и не испытывает непосредственное влияние лобового сопротивления; влияние атмосферы не учитывается, анализу подлежат лишь пульсирующие детонационные двигатели без эжектора. Приведены наилучшие варианты конструкции пульсирующих детонационных двигателей для различных значений приоритетов критериев.

*Пульсирующий детонационный двигатель, летательный аппарат, критерии, многокритериальное ранжирование.*

### Введение

В качестве современных силовых установок, позволяющих решать задачи угловой стабилизации и ориентации летательных аппаратов (ЛА), используют жидкостные, твёрдотопливные, воздушно-реактивные и другие типы двигателей. В настоящее время большое внимание стало уделяться пульсирующим (импульсным) детонационным двигателям (ПДД) в силу целого ряда их достоинств. Фундаментальные и прикладные проблемы построения таких двигателей изложены в [1–4]. В [5] поставлена и решена задача выбора эффективных типов детонационных двигателей, которая сводится к задаче гипервекторного ранжирования. Анализ результатов решения показал, что предпочтение следует отдать ПДД с цилиндрической детонационной камерой, диффузором и эжекторным насадком. На варианты конструкций ПДД получено свидетельство на полезную модель [6]. В [7] осуществлены словесная и математиче-

ская постановки задачи гипервекторного ранжирования вариантов стендов, предназначенных для проведения огневых испытаний ПДД. Рассмотрены особенности решения задач при использовании методов «жесткого» ранжирования и Борда. В результате был выбран наилучший по совокупности критериев вариант стенда для проведения огневых испытаний макетного образца ПДД. Получено свидетельство на полезную модель [8].

В статье [9] предложена методика проведения испытаний демонстратора ПДД, раскрыты её особенности, приведены результаты исследований. Предлагаемая методика проведения огневых испытаний была использована при исследовании макетных образцов ПДД.

В настоящей статье:

- осуществлено генерирование возможных вариантов конструкции ПДД;
- предложена система критериев для оценки вариантов;

- подготовлена необходимая исходная информация по результатам испытаний;

- с использованием методов «жесткого» ранжирования, анализа иерархий, Борда, критерия построения истинных кортежей Парето решены прикладные задачи выбора наилучшего варианта ПДД для трёх важных случаев:

1) атмосфера учитывается, ПДД испытывает влияние лобового сопротивления;

2) атмосфера учитывается, ПДД находится внутри ЛА и не испытывает непосредственное влияние лобового сопротивления;

3) влияние атмосферы не учитывается, анализу подлежат лишь ПДД без эжектора.

**Необходимо выбрать** наилучшую по совокупности критериев конструкцию ПДД для использования его в качестве силовой установки ЛА с целью решения

задачи угловой стабилизации и ориентации.

### Генерирование возможных вариантов ПДД

На основе метода морфологического ящика [10,11] составлена морфологическая матрица (табл. 1), на основе которой может быть сгенерировано множество возможных вариантов ПДД. При составлении морфологической матрицы учтено представление ПДД в виде следующих подсистем: детонационная камера; система подачи компонентов; система инициирования; система управления.

Анализ табл. 1 позволяет построить более 55000 вариантов ПДД. Однако не все варианты удовлетворяют ограничениям и имеют совместимые подсистемы. В конечном итоге в качестве допустимых вариантов, которые и подвергались исследованию на огневом стенде, отобрано двадцать вариантов, основные конструктивные особенности которых представлены в табл. 2.

Таблица 1 – Морфологическая матрица ПДД

<b>Детонационная камера</b>				
Признаки	Альтернативы			
	1	2	3	4
Форма (А)	Цилиндрическая	Кольцевая	Прямоугольная	Комбинированная
Количество секций (В)	Одна	Несколько		
Наличие диффузора (С)	Есть	Нет		
Наличие эжектора (D)	Есть	Нет		
<b>Система подачи компонентов</b>				
Способ подачи рабочей смеси (Е)	Электромеханический клапан	Газодинамический клапан	Клапан отсутствует	
Способ смешения (F)	Эжекторный смеситель	Двухкомпонентные форсунки	Однокомпонентные форсунки	Пористые материалы
Способ продувки (G)	Горючим	Окислителем	Эжектирование истекающими продуктами детонации	
<b>Система инициирования</b>				
Способ инициирования (H)	Электроискровой	Газодинамический		
Способ задания частоты следования импульсов (K)	Электронный Блок Управления	Генератор Гартмана		
Способ перевода горения в детонацию (конструктивные особенности инициатора детонации) (L)	Трубка длиной не менее 6-8 калибров	Трубка со спиралью Щелкина	Трубка переменного сечения	Не требуется
<b>Система управления</b>				
Способ управления (M)	Электронный	Механический	Газодинамический	

Таблица 2 – Варианты ПДД и их конструктивные особенности

Варианты ПДД, $S_\alpha, \alpha = \overline{1, 20}$	Характерные признаки		
	Кол-во секций	Характеристика диффузора	Наличие эжектора
$S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$	1	$S_1$ – без диффузора; $S_2$ – диффузор с углом раскрытия $\varphi_3$ ; $S_3$ – диффузор с углом раскрытия $\varphi_2$ ; $S_4, S_5$ – диффузор с углом раскрытия $\varphi_1$	$S_1, S_2, S_3, S_4$ – без эжектора; $S_5$ – с эжектором (длина $l_2$ )
$S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}$	2	$S_6$ – без диффузора; $S_7$ – диффузор с углом раскрытия $\varphi_3$ ; $S_8$ – диффузор с углом раскрытия $\varphi_2$ ; $S_9 - S_{12}$ – диффузор с углом раскрытия $\varphi_1$	$S_6 - S_9$ – без эжектора; $S_{10}$ – с эжектором (длина $l_2$ ); $S_{11}$ – с эжектором (длина $l_3$ ); $S_{12}$ – с эжектором (длина $l_4$ )
$S_{13}, S_{14}, S_{15}, S_{16}, S_{17}, S_{18}, S_{19}, S_{20}$	3	$S_{13}$ – без диффузора; $S_{14}$ – диффузор с углом раскрытия $\varphi_3$ ; $S_{15}$ – диффузор с углом раскрытия $\varphi_2$ ; $S_{16} - S_{20}$ – диффузор с углом раскрытия $\varphi_1$	$S_{13} - S_{16}$ – без эжектора; $S_{17}$ – с эжектором (длина $l_1$ ); $S_{18}$ – с эжектором (длина $l_2$ ); $S_{19}$ – с эжектором (длина $l_3$ ); $S_{20}$ – с эжектором (длина $l_4$ )

### 1. Формирование совокупности критериев для оценки ПДД

Совокупность критериев формируется на основе основных положений теории систем, системного анализа, анализа назначения ПДД, целей его создания, требований технического задания, ГОСТов (в

части, касающейся систем, подобных ПДД), особенностей функционирования ПДД и возможных сценариев его применения. Для выбора эффективного варианта ПДД предлагается использовать систему критериев, представленную в табл. 3.

Таблица 3 – Система критериев для сравнения вариантов конструкции ПДД

1. Атмосфера учитывается, ПДД испытывает влияние лобового сопротивления				
$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$
Удельная тяга	Лобовая тяга	Удельный расход	Удельная масса	Длина
2. Атмосфера учитывается, ПДД находится внутри ЛА и не испытывает непосредственное влияние лобового сопротивления.				
3. Влияние атмосферы не учитывается, анализу подлежат лишь ПДД без эжектора.				
$K_1$	$K_3$		$K_4$	$K_5$

Как показывает анализ системы критериев, используемых для сравнения вариантов построения ПДД, задача принятия решений сводится к задаче многокритериального ранжирования [12,13].

### Постановка и метод решения задачи многокритериального ранжирования ПДД

Введём необходимые в дальнейшем обозначения:

$S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$  – множество вариантов ПДД (вариантов, систем);

$S_D \subseteq S$  – множество допустимых вариантов, для которых, в зависимости от

специфики ПДД, должны выполняться некоторые дисциплинирующие условия: неравенства, равенства, логические условия и т. п.;

$K_j(S_\alpha)$  –  $j$ -й скалярный критерий, характеризующий систему  $S_\alpha$ , ( $\alpha = \overline{1, n}; j = \overline{1, r}$ ). Здесь  $r$  – число скалярных критериев;

$A = \{a_j, j = \overline{1, r}\}$  – множество коэффициентов важности скалярных критериев, причём  $\sum_{j=1}^r a_j = 1$ ;

$P = \{S_{k_1}^0, S_{k_2}^0, \dots, S_{k_{n^\pi}}^0\}$  – упорядоченное множество эффективных систем (кортеж Парето),  $P \subseteq S_D$ ; элементы кортежа ранжированы в соответствии с решающими правилами так, что выполняется условие  $S_{k_1}^0 \succ S_{k_2}^0 \succ \dots \succ S_{k_i}^0 \succ \dots \succ S_{k_{n^\pi}}^0$ , где « $\succ$ » – знак отношения доминирования,  $k_i \in \{1, 2, \dots, n\}$ . Длина кортежа равна  $n^\pi$ .

Допустим, что известны множества  $A, S, K_j(S_\alpha)$ , ( $\alpha = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, r}$ ), решающие правила. Требуется найти кортеж Парето  $P$ , для элементов которого справедливо

$$K(S_{k_i}^0) = \min_{S_\alpha \in S_D} K(S_\alpha), S_{k_i}^0 \in P. \quad (1)$$

### Особенности применения метода «жесткого» ранжирования (МЖР)

В ходе решения задачи будем анализировать множество упорядоченных пар систем  $S_k, S_l$  ( $k = \overline{1, n}$ ;  $l = \overline{1, n}$ ;  $k \neq l$ ), а результат анализа заносить в специальную оценочную матрицу  $\|C_{kl}\|$ . Сущность метода заключается в следующем [13]:

1. На основе попарного сравнения систем  $S_k, S_l$  ( $k = \overline{1, n}$ ;  $l = \overline{1, n}$ ;  $k \neq l$ ) определяем элементы  $C_{kl}$  оценочной матрицы  $\|C_{kl}\|$ . Значения элементов  $C_{kl}$  подбирают таким образом, чтобы отсеять неэффективные системы.

У эквивалентных систем  $S_k, S_l$  все соответствующие критерии равны. Полагаем,  $C_{kl} = 1, C_{lk} = 1$ . К числу неэффективных систем отнесём варианты, у которых:

а) все значения критериев  $k$ -й системы хуже, чем у  $l$ -й системы, тогда полагаем  $C_{kl} = N_2 \gg 1$ ;

б) значения  $m$  ( $m < r$ ) критериев  $k$ -й системы хуже соответствующих значений критериев  $l$ -й системы при равных соответствующих значениях остальных критериев этих систем; тогда полагаем  $C_{kl} = N_3, 1 \ll N_3 < N_2$ .

Если же для систем  $k, l$  имеем лучшие, худшие и, возможно, равные критерии, то значение  $C_{kl}$  определим по методу, изложенному в [14].

2. Для формулировки решающих правил введём характерные числа:  $H_l$  – количество элементов в  $l$ -м столбце оценочной матрицы, значения которых больше единицы;  $M_l$  – количество элементов в  $l$ -м столбце той же матрицы, значения которых меньше единицы;  $C_{kl \max}$  – максимальное значение элемента в  $l$ -м столбце матрицы  $\|C_{kl}\|$ .

3. Для реализации «жесткого» ранжирования перейдём от одношагового процесса поиска приоритетного расположения систем к многошаговому процессу [15].

Решающие правила и метод «жесткого» ранжирования подробно изложены в [13].

**Особенности применения метода анализа иерархий.** Американским математиком Т. Саати разработан метод решения многокритериальных задач, названный методом анализа иерархий (МАИ) [16]. Российский учёный В.Д. Ногин предложил модификацию МАИ, основанную на условии совместности (состоятельности) матрицы парных сравнений [17].

Под состоятельностью матрицы  $A = \|a_{ij}\|, i, j = \overline{1, n}$  понимается выполнение соотношений  $a_{ij}a_{jk} = a_{ik}$ . В частном случае:

$$a_{ii} = 1, a_{ji} = 1/a_{ij}, i, j, k = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $n$  – размерность матрицы. Причём размерность матриц на уровнях 2, 3 в общем случае различная: на уровне 2 она равна числу критериев, а на уровне 3 – числу систем.

Для получения матрицы, обладающей свойством совместности, экспертам достаточно заполнить лишь первую строку матрицы парных сравнений, тогда остальные элементы определяют из выражений (2), (3) [17]:

$$a_{ij} = a_{1j} / a_{1i}, i = \overline{2, n}, j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

В [17] показано, что для совместной матрицы собственный вектор  $w$ , отвечающий максимальному собственному значению, имеет компоненты  $w_j = a_{1n} / a_{1j}, j = \overline{1, n}$ . С целью нормирования все компоненты следует разделить на сумму значений  $w_j$ , что позволяет получить искомые коэффициенты важности:

$$a_j = w_{Ni} = w_j / \sum_{j=1}^n w_j, j = \overline{1, n}.$$

*Методика решения задачи гипервекторного ранжирования методом анализа иерархий*

1. Провести анализ исходной информации, формирование критериев оценок систем, построить матрицы парных сравнений, обладающие свойством совместности.

2. Ранжировать системы методом анализа иерархий по множеству скалярных критериев каждого векторного компонента.

3. Вычислить значения глобальных приоритетов векторных компонентов (построить частные кортежи Парето по векторным компонентам).

4. Ранжировать системы методом анализа иерархий по множеству векторных компонентов.

5. Определить значения глобальных приоритетов многовекторных компонентов (построить частные кортежи Парето по многовекторным компонентам).

6. Ранжировать системы методом анализа иерархий по множеству многовекторных компонентов. Построить кортеж Парето.

7. Провести анализ результатов решения.

8. В случае необходимости уточнить исходные данные, изменить элементы матриц парных сравнений. Перейти к шагу 2. В противоположном случае перейти к шагу 9.

9. Конец решения.

Более подробно сравнительная оценка методов анализа иерархий и «жесткого» ранжирования приведена в [19].

**Метод Борда [18].** Допустим, имеем  $n$  систем, каждая из которых характеризуется  $m$  критериями. Будем сравнивать  $i$ -е системы ( $i = \overline{1, n}$ ) отдельно по всем  $k$ -м ( $k = \overline{1, m}$ ) критериям и результаты заносить в прямоугольную матрицу  $R$  размера  $n \times m$ . Алгоритм Борда:

1. Положить  $i = 0$ .

2. Положить  $i = i + 1, k = 0$ . Если  $i > n$ , перейти к шагу 5.

3. Положить  $k = k + 1$ . Если  $k > m$ , перейти к шагу 2, иначе – к шагу 4.

4. Подсчитать число систем  $q_{ij}$ , для которых система  $i$  является доминирующей по критерию  $j$ . Положить  $r_{ij} = q_{ij}$ . Перейти к шагу 3.

5. Найти  $r(i) = \sum_{j=1}^m r_{ij}, i = \overline{1, n}$ . Сумма

этих значений образует шкалу альтернатив Борда.

6. Расположить системы в порядке убывания значений  $r(i)$ .

7. Конец решения.

**Критерий построения истинных кортежей Парето**

Серьёзным недостатком методов анализа иерархий и Борда является то, что в общем случае множество решений, найденных этими методами, может содержать и неэффективные. С целью устранения этого недостатка предлагается применять специальный критерий. Введём необходимые определения [19].

**Определение 1.** *Опорный кортеж Парето*  $P$  – упорядоченное множество эффективных вариантов, построенное в ходе решения задач многокритериального, многовекторного или гипервекторного ранжирования с использованием метода «жесткого» ранжирования.

**Определение 2.** *Псевдокортеж Парето*  $P_{nq}$  – упорядоченное множество эффективных и неэффективных вариантов, построенное в ходе решения задач много-

критериального, многовекторного или гипервекторного ранжирования с использованием метода, отличного от МЖР,  $q = \overline{1, Q}$ .

**Определение 3.** *Истинный кортеж Парето*  $P_{uq}$  – упорядоченное множество эффективных вариантов, построенное на основе псевдокортежа Парето, у которого исключены неэффективные варианты,  $q = \overline{1, Q}$ .

Допустим, что используя МЖР, а также другие методы из заданного множества, построены соответственно опорный кортеж Парето  $P$  и  $q$  псевдокортежей  $P_{nq}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ . Справедлив следующий критерий построения истинных кортежей Парето  $P_{uq}$ ,  $q = \overline{1, Q}$  (формулировка и доказательство приведены в [19]).

**Критерий.** Для построения истинных кортежей Парето необходимо и достаточно из соответствующих псевдокортежей Парето выбрать, не нарушая порядок следования, лишь варианты, номера которых указаны в опорном кортеже Парето. Иначе:

$$P_{uq} = (P_{nq} \cap P, q = \overline{1, Q}).$$

**Решение задачи многокритериального ранжирования ПДД**

На основе предлагаемого подхода решена задача ранжирования двадцати вариантов ПДД. Значения критериев, характеризующих ПДД, определялись на основе огневых испытаний. Относительные значения критериев приведены в табл. 4.

*Необходимо:* построить упорядоченное множество эффективных вариантов ПДД (кортеж Парето) и выбрать наилучший ПДД для практического использования.

Задача решалась для трёх характерных случаев:

- влияние атмосферы учитывается, ПДД испытывает влияние лобового сопротивления;
- влияние атмосферы учитывается, ПДД находится внутри ЛА и не испытывает непосредственное влияние лобового сопротивления;
- влияние атмосферы не учитывается, анализу подлежат лишь ПДД без эжектора.

Заметим, что в первом случае задачу выбора эффективных вариантов ПДД решаем с учётом пяти критериев, во втором и третьем случаях – без учёта второго критерия. Причём, в третьем случае исключаем из рассмотрения пятую, десятую-двенадцатую, семнадцатую-двадцатую системы.

Таблица 4 – Относительные значения критериев

Критерии	Системы									
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$
$K_1$	1	0.79	1.18	0.91	1.72	1.11	0.76	0.99	1.07	1.97
$K_2$	1	0.27	0.48	0.56	0.38	1.11	0.26	0.40	0.66	0.44
$K_3$	1	1.27	0.85	1.1	0.58	0.90	1.31	1.00	0.93	0.51
$K_4$	1	1.41	0.92	1.19	0.74	0.99	1.59	1.21	1.12	0.70
$K_5$	1	1.11	1.11	1.11	1.52	1.2	1.30	1.30	1.30	1.72
	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{15}$	$S_{16}$	$S_{17}$	$S_{18}$	$S_{19}$	$S_{20}$
$K_1$	1.59	3.55	1.47	1.01	0.87	1.36	1.75	2.05	2.19	4.79
$K_2$	0.34	0.79	1.47	0.34	0.35	0.84	0.39	0.45	0.48	1.06
$K_3$	0.65	0.28	0.68	0.99	1.15	0.73	0.57	0.49	0.46	0.21
$K_4$	0.96	0.43	0.83	1.32	1.52	0.97	0.80	0.72	0.71	0.34
$K_5$	1.90	2.09	1.39	1.5	1.5	1.5	1.73	1.91	2.10	2.28

**Атмосферный участок, лобовая тяга  
существенна**

Решим задачу многокритериального ранжирования с использованием трёх ме-

тодов: «жесткого» ранжирования, анализа иерархий и Борда.

Для определения коэффициентов важности критериев будем использовать модифицированный метод анализа иерархий [17]. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты решения задачи ранжирования конструкций ПДД

<b>Вариант 1, коэффициенты важности:</b> $a_1 = 0,502, a_2 = 0,251, a_3 = 0,1, a_4 = 0,084, a_5 = 0,063$			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
<i>Жёсткого ранжирования</i>	$S_{20}, S_{12}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{13}, S_3, S_6, S_1$	–	$S_{20}, S_{12}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{13}, S_3, S_6, S_1$
<i>Анализа иерархий</i>	–	$S_{20}, S_{12}, S_{13}, S_{19}, S_{18}, S_{10}, S_6, S_{16}, S_5, S_{17}, S_1, S_{11}, S_9, S_3, S_4, S_8, S_{14}, S_{15}, S_2, S_7$	$S_{20}, S_{12}, S_{13}, S_{18}, S_{10}, S_6, S_5, S_1, S_3$
<i>Борда</i>	–	$S_{12}, S_{13}, S_{19}, S_{10}, S_{18}, S_6, S_3, S_5, S_{16}, S_{17}, S_9, S_4, S_{11}, S_8, S_{14}, S_2, S_{20}, S_1, S_{15}, S_7$	$S_{12}, S_{13}, S_{10}, S_{18}, S_6, S_3, S_5, S_{20}, S_1$
<b>Вариант 2, коэффициенты важности:</b> $a_1 = 0,111, a_2 = 0,556, a_3 = 0,111, a_4 = 0,111, a_5 = 0,111$			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
<i>Жёсткого ранжирования</i>	$S_{13}, S_6, S_{20}, S_1, S_{12}, S_3, S_{18}, S_{10}, S_5$	–	$S_{13}, S_6, S_{20}, S_1, S_{12}, S_3, S_{18}, S_{10}, S_5$
<i>Анализа иерархий</i>	–	$S_{20}, S_{13}, S_{12}, S_6, S_1, S_{16}, S_9, S_{19}, S_{18}, S_{10}, S_4, S_3, S_5, S_{17}, S_8, S_{11}, S_{14}, S_{15}, S_2, S_7$	$S_{20}, S_{13}, S_{12}, S_6, S_1, S_{18}, S_{10}, S_3, S_5$
<b>Вариант 3, коэффициенты важности:</b> $a_1 = 0,111, a_2 = 0,111, a_3 = 0,556, a_4 = 0,111, a_5 = 0,111$			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
<i>Жёсткого ранжирования</i>	$S_{20}, S_{12}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{13}, S_3, S_6, S_1$	–	$S_{20}, S_{12}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{13}, S_3, S_6, S_1$
<i>Анализа иерархий</i>	–	$S_{20}, S_{12}, S_{19}, S_{18}, S_{10}, S_{13}, S_5, S_{17}, S_{16}, S_6, S_{11}, S_1, S_3, S_9, S_4, S_8, S_{14}, S_{15}, S_2, S_7$	$S_{20}, S_{12}, S_{13}, S_{10}, S_{18}, S_6, S_3, S_1, S_5$
<b>Вариант 4, коэффициенты важности:</b> $a_1 = 0,111, a_2 = 0,111, a_3 = 0,111, a_4 = 0,556, a_5 = 0,111$			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
<i>Жёсткого ранжирования</i>	$S_{20}, S_{12}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_{13}, S_3, S_6, S_1$	–	$S_{20}, S_{12}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_{13}, S_3, S_6, S_1$
<i>Анализа иерархий</i>	–	$S_{20}, S_{12}, S_{13}, S_{19}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_{17}, S_6, S_1, S_{16}, S_3, S_{11}, S_9, S_4, S_8, S_{14}, S_2, S_{15}, S_7$	$S_{20}, S_{12}, S_{13}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_6, S_1, S_3$
<b>Вариант 5, коэффициенты важности:</b> $a_1 = 0,111, a_2 = 0,111, a_3 = 0,111, a_4 = 0,111, a_5 = 0,556$			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
<i>Жёсткого ранжирования</i>	$S_1, S_3, S_6, S_{13}, S_5, S_{10}, S_{18}, S_{12}, S_{20}$	–	$S_1, S_3, S_6, S_{13}, S_5, S_{10}, S_{18}, S_{12}, S_{20}$
<i>Анализа иерархий</i>	–	$S_{20}, S_{12}, S_1, S_{13}, S_6, S_3, S_4, S_{16}, S_9, S_5, S_{10}, S_2, S_{18}, S_{19}, S_8, S_{17}, S_7, S_{14}, S_{11}, S_{15}$	$S_{20}, S_{12}, S_1, S_{13}, S_6, S_3, S_5, S_{10}, S_{18}$

В качестве наилучшего варианта выбираем систему  $S_{20}$  – ПДД с эжектором и диффузором. Угол раскрытия эжектора  $\phi_1$ , длина диффузора  $l_4$ . При высоких тре-

бованиях к длине двигателя, наилучшим вариантом является односекционный ПДД без диффузора и эжектора.

**Атмосферный участок, лобовая тяга несутественна** жирования, анализа иерархий и Борда приведены в табл. 6.

Результаты решения задачи с использованием методов «жесткого» ран-

Таблица 6 – Результаты решения задачи ранжирования конструкции ПДД

<b>Вариант 1, коэффициенты важности:</b> $a_1 = 0,67, a_3 = 0,134, a_4 = 0,112, a_5 = 0,084$			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
Жёсткого ранжирования	$S_{20}, S_{12}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$	–	$S_{20}, S_{12}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$
Анализа иерархий	–	$S_{20}, S_{12}, S_{19}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{17}, S_{13}, S_{11}, S_{16}, S_3, S_6, S_1, S_9, S_8, S_{14}, S_4, S_{15}, S_2, S_7$	$S_{20}, S_{12}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$
Борда	–	$S_{12}, S_{10}, S_{19}, S_{18}, S_5, S_{17}, S_3, S_{13}, S_6, S_{11}, S_{16}, S_9, S_4, S_8, S_{14}, S_2, S_{20}, S_{15}, S_1, S_7$	$S_{12}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_3, S_{13}, S_{20}, S_1$
<b>Вариант 2, коэффициенты важности:</b> $a_1 = 0,125, a_3 = 0,625, a_4 = 0,125, a_5 = 0,125$			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
Жёсткого ранжирования	$S_{20}, S_{12}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$	–	$S_{20}, S_{12}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$
Анализа иерархий	–	$S_{20}, S_{12}, S_{19}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{17}, S_{13}, S_{11}, S_{16}, S_3, S_6, S_1, S_9, S_8, S_4, S_{14}, S_2, S_{15}, S_7$	$S_{20}, S_{12}, S_{18}, S_{10}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$
<b>Вариант 3, коэффициенты важности:</b> $a_1 = 0,125, a_3 = 0,125, a_4 = 0,625, a_5 = 0,125$			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
Жёсткого ранжирования	$S_{20}, S_{12}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$	–	$S_{20}, S_{12}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$
Анализа иерархий	–	$S_{20}, S_{12}, S_{19}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_{17}, S_{13}, S_3, S_{11}, S_{16}, S_1, S_6, S_9, S_4, S_8, S_{14}, S_2, S_{15}, S_7$	$S_{20}, S_{12}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$
<b>Вариант 4, коэффициенты важности:</b> $a_1 = 0,125, a_3 = 0,125, a_4 = 0,125, a_5 = 0,625$			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
Жёсткого ранжирования	$S_1, S_3, S_{13}, S_5, S_{10}, S_{18}, S_{12}, S_{20}$	–	$S_1, S_3, S_{13}, S_5, S_{10}, S_{18}, S_{12}, S_{20}$
Анализа иерархий	–	$S_{20}, S_{12}, S_1, S_3, S_4, S_6, S_2, S_{13}, S_5, S_{10}, S_9, S_{18}, S_8, S_{17}, S_{16}, S_{19}, S_7, S_{14}, S_{11}, S_{15}$	$S_{20}, S_{12}, S_1, S_3, S_{13}, S_5, S_{10}, S_{18}$
<b>Вариант 5, коэффициенты важности:</b> $a_1 = 0,25, a_3 = 0,25, a_4 = 0,25, a_5 = 0,25$			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
Жёсткого ранжирования	$S_{20}, S_{12}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$	–	$S_{20}, S_{12}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$
Анализа иерархий	–	$S_{20}, S_{12}, S_{19}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_{17}, S_{13}, S_3, S_{11}, S_1, S_{16}, S_6, S_9, S_4, S_8, S_2, S_{14}, S_{15}, S_7$	$S_{20}, S_{12}, S_{10}, S_{18}, S_5, S_{13}, S_3, S_1$

В качестве наилучшего варианта выбираем систему  $S_{20}$  – ПДД с эжектором и диффузором. Угол раскрытия эжектора  $\varphi_1$ , длина диффузора  $l_4$ . При жестких тре-

бованиях к длине двигателя, наилучшим вариантом является односекционный ПДД без диффузора и эжектора.

**Внеатмосферный участок, лобовая тяга несущественна, влияние эжектора отсутствует** Результаты решения приведены в табл. 7.

Таблица 7 – Результаты решения задачи ранжирования конструкции ПДД

<i>Вариант 1, коэффициенты важности: <math>a_1 = 0,67, a_3 = 0,134, a_4 = 0,112, a_5 = 0,084</math></i>			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
Жёсткого ранжирования	$S_{13}, S_3, S_1$	–	$S_{13}, S_3, S_1$
Анализа иерархий	–	$S_{13}, S_{16}, S_3, S_6, S_9, S_1, S_8, S_{14}, S_4, S_{15}, S_2, S_7$	$S_{13}, S_3, S_1$
Борда	–	$S_3, S_{13}, S_6, S_{16}, S_9, S_4, S_8, S_{14}, S_2, S_{15}, S_7, S_1$	$S_3, S_{13}, S_1$
<i>Вариант 2, коэффициенты важности: <math>a_1 = 0,125, a_3 = 0,625, a_4 = 0,125, a_5 = 0,125</math></i>			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
Жёсткого ранжирования	$S_{13}, S_3, S_1$	–	$S_{13}, S_3, S_1$
Анализа иерархий	–	$S_{13}, S_{16}, S_3, S_6, S_9, S_1, S_8, S_{14}, S_4, S_{15}, S_2, S_7$	$S_{13}, S_3, S_1$
<i>Вариант 3, коэффициенты важности: <math>a_1 = 0,125, a_3 = 0,125, a_4 = 0,625, a_5 = 0,125</math></i>			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
Жёсткого ранжирования	$S_{13}, S_3, S_1$	–	$S_{13}, S_3, S_1$
Анализа иерархий	–	$S_{13}, S_3, S_{16}, S_6, S_1, S_9, S_4, S_8, S_{14}, S_2, S_{15}, S_7$	$S_{13}, S_3, S_1$
<i>Вариант 4, коэффициенты важности: <math>a_1 = 0,125, a_3 = 0,125, a_4 = 0,125, a_5 = 0,625</math></i>			
Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
Жёсткого ранжирования	$S_1, S_3, S_{13}$	–	$S_1, S_3, S_{13}$
Анализа иерархий	–	$S_1, S_3, S_{13}, S_6, S_4, S_2, S_{16}, S_9, S_8, S_7, S_{14}, S_{15}$	$S_1, S_3, S_{13}$

В качестве наилучшего варианта выбираем систему  $S_{13}$  – трёхсекционный ПДД без диффузора и эжектора. При жёстких требованиях к длине двигателя наилучшим вариантом является односекционный ПДД без диффузора и эжектора.

**Заключение**

1. Пульсирующий детонационный двигатель является одним из перспективных при использовании в системах стабилизации и ориентации ЛА.

2. На основе метода морфологического ящика составлены морфологические таблицы и сгенерировано множество возможных вариантов конструкций ПДД, определено множество допустимых вариантов и сформирована система критериев для сравнительной оценки ПДД.

3. Осуществлены словесная и математическая постановки задачи многокритериального ранжирования вариантов ПДД. Раскрыты особенности решения задач при использовании методов «жёсткого» ранжирования, анализа иерархий, Борда. Сформулирован критерий построения истинных кортежей Парето.

4. Решена задача выбора наилучшего варианта конструкции ПДД для трёх характерных случаев:

- атмосфера учитывается, ПДД испытывает влияние лобового сопротивления;
- атмосфера учитывается, ПДД находится внутри ЛА и не испытывает непосредственное влияние лобового сопротивления;

- влияние атмосферы не учитывается, анализу подлежат лишь ПДД без эжектора.

Приведены наилучшие варианты конструкции ПДД для одного из частных случаев задания коэффициентов важности.

### **Библиографический список**

1. Авиадвигатели XXI века: тезисы III международной научно-технической конференции. М.: ЦИАМ, 2010. (CD-ROM).
2. Импульсные детонационные двигатели / под ред. д.ф.-м.н. С.М. Фролова. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006. 592 с.
3. Иностранные авиационные двигатели, 2005. Справочник ЦИАМ / под ред. В.А. Скибина, В.И. Солонина. М.: Авиамир, 2005. 592 с.
4. ЦИАМ 2001–2005. Основные результаты научно-технической деятельности. Т. II / под общей научной редакцией В.А. Скибина, В.И. Солонина, М.Я. Иванова. М.: ЦИАМ, 2005. 496 с.
5. Сафронов В.В., Поршнева В.А., Жебраков А.С. Выбор эффективных вариантов энергосиловых установок методом гипервекторного ранжирования двигателя // Мехатроника, автоматизация, управление. № 11. 2010. С. 60–64.
6. Говоренко Г.С., Поршнева В.А., Тетерин Д.П., Ушаков В.А. Пульсирующие детонационные двигатели (варианты). Патент РФ на полезную модель № 61807; опубл. 10.03.2007 г.
7. Сафронов В.В., Поршнева В.А., Жебраков А.С. Построение эффективных вариантов стенов для проведения огневых испытаний энергосиловых установок // Труды XV-й Всероссийской научно-практической конференции РАРАН «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Т. 4. Военно-морской флот России. СПб.: Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова, 2012. С. 288–299.
8. Говоренко Г.С., Поршнева В.А., Тетерин Д.П. и др. Стенд для испытания пульсирующих детонационных двигателей. Патент РФ № 86739; опубл. 10.09.2009.
9. Жебраков А.С., Поршнева В.А. Методика проведения огневых испытаний макетного образца пульсирующего детонационного двигателя // Труды XVI-й Всероссийской научно-практической конференции РАРАН «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Т. 4. Военно-морской флот России. СПб.: Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова, 2013.
10. Джонс Дж.К. Методы проектирования. М.: Мир, 1986. 326 с.
11. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1989. 367 с.
12. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 488 с.
13. Сафронов В.В. Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования. Саратов: Научная книга, 2009. 329 с.
14. Руа Б. Проблемы и методы решений в задачах со многими целевыми функциями. В кн. Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. 232 с.
15. Белкин А.Р., Левин М.Ш. Принятие решений: комбинаторные модели аппроксимации информации. М.: Наука. 1990. 160 с.
16. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
17. Ногин В.Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2004. Т. 44, № 7. С. 1259–1268.
18. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия согласованных решений // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2002. № 3. 32 с.
19. Сафронов В.В. Сравнительная оценка методов «жесткого» ранжирования

и анализа иерархий в задаче гипервекторного ранжирования систем // Информационные технологии. 2011. № 7. С. 8–13.

### Информация об авторах

**Сафронов Валерий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Конструкторского бюро «Электроприбор», г. Саратов. E-mail: [svv@kber.ru](mailto:svv@kber.ru). Область научных интересов: системный анализ, теория принятия решений, методы целочисленного программирования, векторная оптимизация сложных систем.

**Поршнев Владимир Александрович**, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского центра,

Конструкторское бюро «Электроприбор», г. Саратов. E-mail: [pva@kber.ru](mailto:pva@kber.ru). Область научных интересов: системный анализ, энергосиловые установки летательных аппаратов, детонация, гиперзвук.

**Жебраков Алексей Сергеевич**, инженер-конструктор второй категории, Конструкторское бюро «Электроприбор», г. Саратов. E-mail: [zas@kber.ru](mailto:zas@kber.ru). Область научных интересов: системный анализ, силовые установки летательных аппаратов, детонация.

## MULTICRITERIAL CHOICE OF THE BEST VARIANT OF THE PULSE DETONATION ENGINE DESIGN FOR AIRCRAFT ANGULAR STABILIZATION AND ORIENTATION SYSTEMS

©2014 V.V. Safronov, V.A. Porshnev, A.S. Zhebrakov

«Electropribor» Design Bureau, Saratov, Russian Federation

The verbal and mathematical formulations of the problem of multicriterion ranging of the pulse detonation engine design variants were carried out. Using the method of morphological box the morphological table was composed, on the basis of which many possible design variants of the pulse detonation engines were generated. When compiling the morphological table a conception of pulse detonation engines in the form of the following subsystems was considered: detonation chamber, components supply system, initiation system, control system. Eventually as valid options, which were subjected to a study on the firing test bench, we selected twenty variants. The system of criteria for the assessment of the pulse detonation engines design variants (specific thrust, frontal thrust, specific consumption, unit weight, length) was proposed. Criteria values were determined during firing tests. The peculiarities of solving problems by using the methods of "hard" ranging, hierarchies analysis, Borda's method were discovered. The criterion formation of the true Pareto tuples was formulated. Using the methods of "hard" ranging, hierarchies analysis, Borda's method, the criterion of the true Pareto tuples formation the applied problems of choosing the best pulse detonation engine variant for three important cases were resolved: - the atmosphere is taken into account, pulse detonation engine suffers the influence of the frontal resistance; - the atmosphere is taken into account, pulse detonation engine is located inside the aircraft and does not suffer the immediate impact of the frontal resistance; - the influence of the atmosphere is not taken into account, only pulse detonation engines without ejector are subject to the analysis. The best pulse detonation engine design variants for different values of the criteria priorities were revealed.

*The pulsing detonation engine, criteria, multicriterion ranging.*

## References

1. Aviadvigateli XXI veka: tezisy III mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Moscow: TsIAM, 2010. (CD-ROM).
2. Impulsnye detonacionnye dvigateli [Pulse detonation engines / ed. by d.f.-m.n. S.M Frolova]. M.: TORUS PRESS, 2006. 592 p.
3. Inostrannye aviacionnye dvigateli, 2005. Spravochnik CIAM / pod red.: V.A. Skibina, V.I. Solonina [Reference book of the Central Institute of Aeronautical Engineering / General editorship: V.A. Skibin, V.I. Solonin]. Moscow: Aviamir Publ., 2005. 592 p.
4. CIAM 2001-2005. Osnovnye rezul'taty nauchno-tehnicheskoy deyatel'nosti. T. II [The Central Institute of Aeronautical Engineering 2001-2005. The main results of scientific and technical activities. V. II / ed. by V.A. Skibina, V.I. Solonina, M.Ya. Ivanova]. Moscow: TsIAM Publ., 2005. 496 p.
5. Safronov V.V., Porshnev V.A., Zhebrakov A.S. The Energy-Power-Plant's Effective Variants Choice by Using the Hypervector Ranking Method // Mehatroniks, Avtomation, Control. No. 11. 2010. P. 60–64. (In Russ.)
6. Govorenko G.S., Porshnev V.A., Teterin D.P., Ushakov V.A. Pul'siruyushchie detonatsionnye dvigateli (varianty) [Pulse detonation engines (variants)]. Patent RF, no. 61807, 2007. (Publ. 10.03.2007.)
7. Safronov V.V., Porshnev V.A., Zhebrakov A.S. Postroenie effektivnyh variantov stendov dlya provedeniya ognevyh ispytaniy energosilovyh ustanovok // Trudy XV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii RARAN "Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti". V. 4. Voenno-morskoy flot Rossii. SPb.: Voenno-morskaya akademiya im. N.G. Kuznetsova, 2012. P. 288–299. (In Russ.)
8. Govorenko G.S., Porshnev V.A., Teterin D.P. i dr. Stend dlya ispytaniya pul'siruyushchih detonacionnyh dvigatelej [Pulse detonation engines test bed]. Patent RF, no. 86739 2009. (Publ. 10.09.2009.)
9. Zhebrakov A.S., Porshnev V.A. Metodika provedeniya ognevyh ispytaniy maketnogo obrazca pul'siruyushchego detonacionnogo dvigatelya // Trudy XVI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii RARAN "Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti". V. 4. Voenno-morskoy flot Rossii. SPb.: Voenno-morskaya akademiya im. N.G. Kuznetsova Publ., 2013. P. 354–362. (In Russ.)
10. Jones J.C. Metody proektirovaniya [Design Methods.]. Moscow: Mir Publ., 1986. 326 p.
11. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. Vvedenie v sistemnyj analiz: ucheb. posobie dlya vuzov [Introduction to system analysis: textbook for Higher Education Institutes] Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1989. 367 p.
12. Moiseev N.N. Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza [Mathematical problems of system analysis]. Moscow: Nauka Publ., 1981. 488 p.
13. Safronov V.V. Osnovy sistemnogo analiza: metody mnogovektornoj optimizacii i mnogovektornogo ranzhirovaniya [Principles of system analysis: methods of multidirectional optimization and multidirectional ranging]. Saratov: Nauchnaya kniga Publ., 2009. 329 p.
14. Rua B. Problemy i metody reshenij v zadachah so mnogimi celevymi funkciyami. V kn. Voprosy analiza i procedury prinyatiya reshenij [Problems and solution methods in the tasks with many target functions. The book Problems of analysis and decision making procedure]. Moscow: Mir Publ., 1976. 232 p.
15. Belkin A.R., Levin M.Sh. Prinyatie reshenij: kombinatornye modeli approksimacii informacii [Decision making: combinatorial models of information approximation]. Moscow: Nauka Publ., 1990. 160 p.
16. Saati T.L. Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij [Decision making. Analytic

hierarchy process]. Moscow: Radio i svyaz` Publ., 1993. 320 p.

17. Nogin V.D. Simplified analytic hierarchy process on the basis of non-linear criteria convolution // Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki. 2004. V. 44, no. 7. P. 1259–1268. (In Russ.)

18. Trahtengerts E.A. Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya soglasovannyh reshenij [Computer support for making of

concerted decisions] // Prilozhenie k zhurnalu "Informacionnye tehnologii". 2002. No. 3. P. 32. (In Russ.)

19. Safronov V.V. Comparative evaluation of methods of hierarchies hard ranging and analysis in the task of systems hypervector ranging // Informacionnye tehnologii. 2011. No. 7. P. 8–13. (In Russ.)

### About the authors

**Safronov Valery Vasilevich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, The main scientific employee of «Electropribor» Design Bureau, Saratov. E-mail: svv@kbep.ru. Area of Research: the system analysis, the decision-making theory, integer programming methods, vector optimization of difficult systems.

**Porshnev Vladimir Aleksandrovich**, Candidate of Science (Engineering), the chief of the research center of «Electropribor» De-

sign Bureau, Saratov. E-mail: pva@kbep.ru. Area of Research: the system analysis, energy-power plants for aircrafts, a detonation, a hypersound.

**Zhebrakov Alexey Sergeevich**, The Design engineer of 2 classes of «Electropribor» Design Bureau, Saratov. E-mail: zas@kbep.ru. Area of Research: the system analysis, power plants of flight vehicles, a detonation.