

Методика выбора конструктивных схем маневрирующих малых космических аппаратов методом аналитической иерархии

Technique of choosing constructive schemes of maneuvering small spacecrafts using analytical hierarchy method

Блинов / Blinov V.

Виктор Николаевич
(blinovviktor@yandex.ru)
доктор технических наук, профессор,
почетный машиностроитель,
заслуженный изобретатель РФ.
ФГБОУ ВПО «Омский государственный
технический университет» (ОмГТУ),
профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение».
г. Омск

Шалай / Shalay V.

Виктор Владимирович
(info@omgtu.ru)
доктор технических наук, профессор,
изобретатель СССР,
почетный работник высшего
профессионального образования РФ,
заслуженный работник высшей школы РФ.
ОмГТУ, заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело»,
ректор.
г. Омск

Чарушина / Charushina E.

Елена Борисовна
(_krain@mail.ru)
ОмГТУ, старший преподаватель кафедры
«Нефтегазовое дело».
г. Омск

Современный этап развития космической техники характеризуется созданием маневрирующих ММКА, в т. ч. на основе аммиачных корректирующих двигательных установок (КДУ) с электротермическими микродвигателями (МД), отличающихся многообразием конструктивных схем КДУ и средств их адаптации в ММКА [1, 2]. Основу разрабатываемой методики выбора конструктивных схем ММКА составляет модернизированный метод аналитической иерархии (МАИ) [3,4].

Рассматривается многокритериальная задача ранжирования оцениваемых конструктивных вариантов ММКА с КДУ на ранних этапах проектирования с использованием МАИ, когда многие критерии не поддаются формализации и ее общее аналитическое решение не представляется возможным.

В общем виде методика решения данной задачи с помощью МАИ представляется следующим образом [4]:

- задается цель функционирования ММКА;
- разрабатываются различные варианты ММКА с КДУ для достижения цели;
- формулируются критерии оценки вариантов ММКА;
- на первом этапе исходная задача формулируется в виде соответствующей иерархической структуры по уровням: цели – критерии – оцениваемые варианты;
- второй этап состоит в реализации попарных сравнений для элементов каждого уровня с учетом специфики требований элементов (критериев, целей) предыдущего более высокого уровня соответствующей иерархии; при этом результаты каждого отдельного такого сравнения (для каждого уровня иерархии) представляются сначала соответствующими матрицами сравнений с учетом требований к согласованности суждений эксперта, принимающего решение, затем определяются собственные векторы для каждой матрицы сравнений;

Ключевые слова: база данных опорных альтернатив – database of support alternatives; корректирующая двигательная установка – correcting propulsion engine; маневрирующий малый космический аппарат – maneuverable small-size spacecraft, метод аналитической иерархии – analytical hierarchy method.

Рассмотрена задача выбора конструктивной схемы маневрирующего малого космического аппарата (ММКА) на ранних этапах проектирования. Предложена методика выбора схем ММКА с использованием базы данных опорных альтернатив с математическими моделями для расчета основных критериев. Приведены сценарии оценки различных вариантов ММКА, блок схема и описание программы выбора конструктивных схем ММКА методом аналитической иерархии.

The paper considers the task of choosing design scheme of maneuverable small-size spacecraft (MSSS) during early design stages. The procedure of choosing design schemes of MSSS using database of support alternatives with mathematical models for calculating main criteria is suggested. The scenarios of estimating different types of MSSS, block diagram and description of choosing design schemes of MSSS using analytical hierarchy method are given.

– на основе найденных значений компонент собственных векторов для каждой матрицы сравнений находятся «веса» или коэффициенты важности для сравниваемых элементов соответствующего уровня иерархии (критериев, вариантов); результаты этих процедур оформляются в виде специальных таблиц, при этом проверяется согласованность суждений экспертов;

– вычисляются индикаторы качества для каждого из оцениваемых вариантов, называемые их приоритетами, по которым и определяется наилучшее конструктивное решение для ММКА.

Недостатки МАИ связаны с критерием качества работы эксперта – с отношением согласованности. Отношение согласованности хорошо работает, когда основные характеристики исследуемого ММКА можно представить следующими расчетными критериями:

– приведенная масса КДУ: масса конструкции, топлива и средств адаптации КДУ в ММКА (массовый критерий);

– реализуемые ММКА с КДУ запасы характеристической скорости (энергетический критерий);

– время орбитального маневра ММКА: условно, как время выработки топлива (временной критерий).

Для получения расчетных значений рассматриваемых критериев в рамках МАИ предложена методика, основанная на использовании опорных альтернатив в виде конструкций созданных ММКА с КДУ, рассматриваемых как квазиоптимальные решения и характеризующиеся (рис.1) [3, 6]:

– различным составом и компоновками КДУ в составе ММКА;

– наличием математических моделей для расчета габаритно-массовых и энергетических характеристик КДУ и средств их адаптации в ММКА.

Разработка качественных критериев оценки ММКА осуществляется с учетом основополагающих принципов проектирования ММКА с КДУ и схемы взаимодействия КДУ с системами ММКА для решения следующих задач анализа (рис. 2):

– технической возможности создания ММКА с КДУ с требуемыми параметрами;

– степени взаимовлияния параметров КДУ и бортовых служебных систем ММКА (с системой электроснабжения и системой ориентации и стабилизации);

– степени влияния КДУ на функционирование целевой аппаратуры ММКА;

– адаптационных свойств КДУ в ММКА: конструктивных (монтаж/демонтаж, выставка вектора тяги, обеспечение тепловых режимов); технологических (заправка/слив аммиака, проверка герметичности, безопасность работ с аммиаком); эксплуатационных (управление логикой работы).

Процесс формирования критериев оценки ММКА осуществляется с использованием схемы взаимодействия КДУ с ММКА и содержит этапы:

– анализ предметной области КДУ – анализ задач орбитального маневрирования ММКА;

– формирование критериев;

– классификация критериев – множество критериев преобразуется в логически связанные группы критериев;

– назначение критериев – определяются наиболее важные критерия с точки зрения формирования конструктивного облика ММКА и КДУ.

При создании ММКА для конкретной проектной ситуации может оказаться предпочтительным определенный вид критериев оценивания. В связи с этим формируется некоторое множество критериев оценки [5]:

$$K_{\text{кду, мка}} = \{K_{\text{кду}1}, K_{\text{кду}2}, \dots, K_{\text{кду}n}, K_{\text{мка}1}, K_{\text{мка}2}, \dots, K_{\text{мка}n}\} \quad (1)$$

Затем выделяются критерии, определяющие конструктивный облик и средства адаптации КДУ в ММКА: $K_{\text{кду, мка}}^{\text{об}}$ (рис.3).

$$K_{\text{кду, мка}}^{\text{об}} = \{K_{\text{кду}1}^{\text{об}}, K_{\text{кду}2}^{\text{об}}, \dots, K_{\text{кду}n}^{\text{об}}, K_{\text{мка}1}^{\text{об}}, K_{\text{мка}2}^{\text{об}}, \dots, K_{\text{мка}n}^{\text{об}}\} \quad (2)$$

Алгоритм оценки конструктивных вариантов ММКА с КДУ разрабатывается с использованием сценариев оценки ММКА. При этом учитывается, что массовый и энергетический критерий математически взаимосвязаны следующим выражением [6]:

$$\Delta V = -g_0 P_{\text{уд}}^{\text{B}} \ln \left(\frac{M_{\text{ММКА}}^0 - \frac{P_{\text{МД}}}{P_{\text{уд}}^{\text{P}}} T^{\text{P}} (N-1) - \frac{P_{\text{МД}}}{P_{\text{уд}}^{\text{B}}} T^{\text{B}} N}{M_{\text{ММКА}}^0 - \frac{P_{\text{МД}}}{P_{\text{уд}}^{\text{P}}} T^{\text{P}} (N-1)} \right) - g_0 P_{\text{уд}}^{\text{P}} \ln \left(\frac{M_{\text{ММКА}}^0 - \frac{P_{\text{МД}}}{P_{\text{уд}}^{\text{B}}} T^{\text{B}} N - \frac{P_{\text{МД}}}{P_{\text{уд}}^{\text{P}}} T^{\text{P}} N}{M_{\text{ММКА}}^0 - \frac{P_{\text{МД}}}{P_{\text{уд}}^{\text{B}}} T^{\text{B}} N} \right) \quad (3)$$

где, ΔV – характеристическая скорость;

$P_{\text{уд}}^{\text{B}}$ – средний удельный импульс тяги МД при выходе на режим;

$P_{\text{уд}}^{\text{P}}$ – средний удельный импульс тяги МД после выхода на режим;

$M_{\text{ММКА}}^0$ – стартовая масса ММКА;

$P_{\text{МД}}$ – тяга МД КДУ;

T^{B} – время выхода МД на режим;

T^{P} – время работы МД на режиме;

N – количество включений КДУ.

На основе опыта создания маневрирующих ММКА с аммиачными КДУ в разработанной методике для ранних этапов проектирования рассмотрен сценарий, состоящий из следующих этапов и предположений (сценарий № 1):

– Экспертом оценивается множество W_1 из n вариантов ММКА с различными компоновками КДУ для решения задач, изложенных в техническом задании:

$$W_1 = \{\text{ММКА}_1, \text{ММКА}_2, \dots, \text{ММКА}_n\} \quad (4)$$

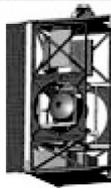
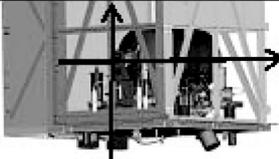
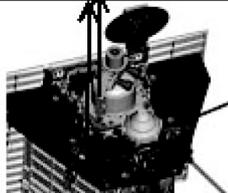
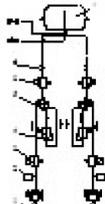
Признак альтернативы		Описание элемента альтернативы / пример			
1	Расположение в МКА	Нижнее торцевое	Центральное	Верхнее торцевое	
					
2	Ориентация топливного бака относительно продольной оси МКА	Взаимно перпендикулярная		Параллельная	
					
3	Выставка вектора тяги	Перемещение в направляющих	Перемещение в направляющих	Угловая выставка сменным пластиком	Перемещение/ поворот ЭТМД
					
4	Используемые элементы	Блок управления	Элементы автоматики		
			 Испаритель, регулятор давления, электроклапан, клапан отсечной, датчик давления		
5	Используемые баки				
6	Резервирование	ЭПК в ПГС	Схема ПГС	БУ КДУ	ЭТМД
				 №1,2	Микродвигатели
7	Способ запуска КДУ	«Горячий»		«Холодный»	
		Разогрев ЭТМД, подача топлива		Разогрев ЭТМД и подача топлива одновременно	

Рис. 1. База данных опорных альтернатив КДУ

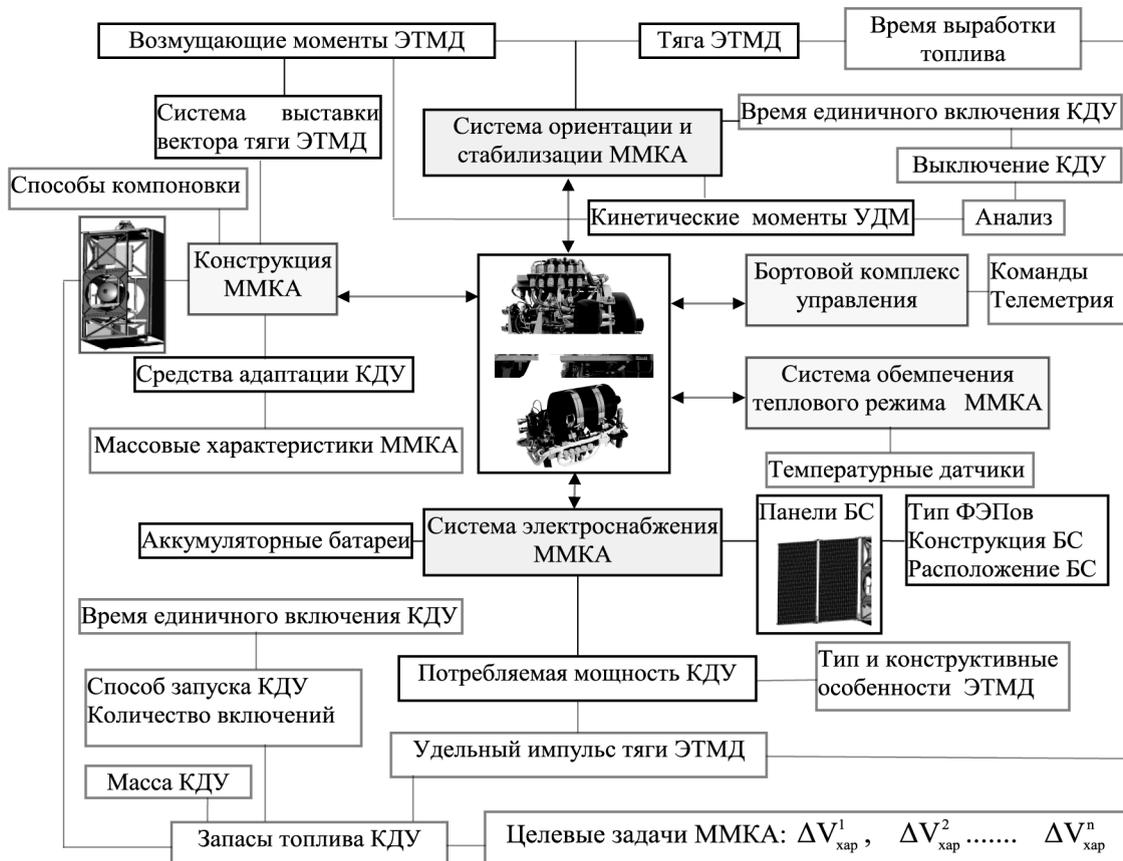


Рис. 2. Схема взаимодействия КДУ с бортовыми системами ММКА

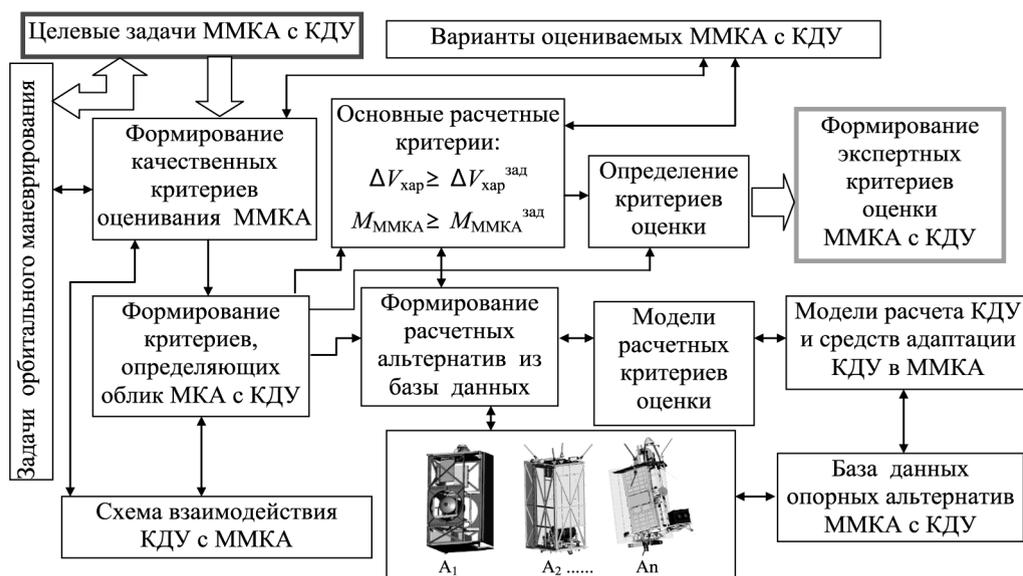


Рис. 3. Схема формирования критериев оценки вариантов ММКА

– Для ММКА с КДУ задана реализуемая характеристическая скорость $\Delta V_{\text{хар}} = \Delta V_{\text{хар}}^{\text{зад}}$ и предельная масса ММКА $m_{\text{ММКА}} = m_{\text{ММКА}}^{\text{зад}}$.

– Масса ММКА $m_{\text{ММКА}}^{\text{зад}}$ представляется в виде массы ММКА без КДУ $m_{\text{ММКА}}^*$, «сухой» массы КДУ $m_{\text{КДУ}}^*$, массы средств адаптации КДУ к ММКА $m_{\text{КДУ}}^{\text{адап}}$ и массы топлива m_{T} :

$$m_{\text{ММКА}}^{\text{зад}} = m_{\text{ММКА}}^* + m_{\text{КДУ}}^* + m_{\text{КДУ}}^{\text{адап}} + m_{\text{T}} \quad (5)$$

– Принимается:

1. вариант ММКА с минимальной массой $m_{\text{КДУ}}^* + m_{\text{КДУ}}^{\text{адап}} + m_{\text{T}}$ обладает массой $m_{\text{ММКА}}^{\text{зад}}$;

2. энергопотребление КДУ не приводит к увеличению массы системы электроснабжения ММКА и обеспечивается формированием циклограммы работы служебной и целевой бортовой аппаратуры при функционировании КДУ.

– В расчетах опорных альтернатив рассматривается «приведенная масса КДУ»:

$$m_i^{\text{кду прив}} = m_i^{\text{кду}*} + m_i^{\text{кду адап}} + m_{\text{T}i} \quad (6)$$

– Для множества $W_1 = \{\text{ММКА}_1, \text{ММКА}_2, \dots, \text{ММКА}_n\}$ из условия выполнения ММКА с КДУ требования по реализации заданной характеристической скорости $\Delta V_{\text{хар}} = \Delta V_{\text{хар}}^{\text{зад}}$ определяется:

1. множество приведенных масс КДУ ($W_1^{\text{кду}}$):

$$W_1^{\text{кду}} = \{m_1^{\text{кду прив}1}, m_2^{\text{кду прив}1}, \dots, m_n^{\text{кду прив}1}\} \quad (7)$$

2. минимальная приведенная масса КДУ:

$$m_i^{\text{кду прив}1} \rightarrow \min(m_i^{\text{кду прив}1}) \quad (8)$$

3. минимальная масса ММКА без КДУ ($m_{\text{ММКА}}^{\text{мин}}$), удовлетворяющая требованиям по $\Delta V_{\text{хар}} = \Delta V_{\text{хар}}^{\text{зад}}$ и $m_{\text{ММКА}} = m_{\text{ММКА}}^{\text{зад}}$:

$$m_{\text{ММКА}}^{\text{мин}} = m_{\text{ММКА}}^{\text{зад}} - m_{i,\text{мин}}^{\text{кду прив}1} \quad (9)$$

– Для всех оставшихся вариантов ММКА для множества

$W_2 = \{\text{ММКА}_1, \text{ММКА}_2, \dots, \text{ММКА}_{n-1}\}$ принимается, что минимальная масса конструкции без КДУ равна:

$$m_{\text{ММКА}}^{\text{мин}} = m_{\text{ММКА}}^{\text{зад}} - m_{i,\text{мин}}^{\text{кду прив}1} \quad (10)$$

– Для множества $W_2 = \{\text{ММКА}_1, \text{ММКА}_2, \dots, \text{ММКА}_{n-1}\}$ с учетом (10) определяются новые приведенные массы КДУ, удовлетворяющие требованиям по $\Delta V_{\text{хар}} = \Delta V_{\text{хар}}^{\text{зад}}$:

$$W_2^{\text{кду}} = \{m_1^{\text{кду прив}2}, m_2^{\text{кду прив}2}, \dots, m_{n-1}^{\text{кду прив}2}\} \quad (11)$$

– По результатам расчетов формируется оценочное по массе множество $W_{\text{оц}}$ из n вариантов ММКА:

$$W_{\text{оц}} = \{\text{ММКА}_1(m_{\text{ММКА}}^{\text{мин}} + m_1^{\text{кду прив}2}), \dots, \text{ММКА}_{n-1}(m_{\text{ММКА}}^{\text{мин}} + m_{n-1}^{\text{кду прив}2}), \text{ММКА}_n(m_{\text{ММКА}}^{\text{зад}})\} \quad (12)$$

Разновидностью данного сценария (сценарий № 2) является случай, когда в техническом задании на проектирование заданы задачи орбитального маневрирования ММКА, для которых определяются требуемые запасы характеристической скорости $\sum \Delta V_{\text{хар}i} = \Delta V_{\text{хар}}^{\text{зад}}$. В качестве задач орбитального маневрирования могут выступать:

- 1) ликвидация ошибок выведения на орбиту функционирования ($\Delta V_{\text{хар}1}$);
- 2) поддержание орбиты функционирования ММКА в течение срока активного существования ($\Delta V_{\text{хар}2}$);
- 3) межорбитальное маневрирование ($\Delta V_{\text{хар}3}$);
- 4) увод ММКА на орбиту утилизации ($\Delta V_{\text{хар}4}$) с заданным временем баллистического существования.

Для практической реализации разработанной методики оценивания конструктивных вариантов ММКА с использованием МАИ разработана программа «Помощник эксперта» на языке программирования «Object Pascal» в среде программирования «Borland Delphi». Блок-схема программы для сценария № 1 представлена на рис. 4.

Визуальный интерфейс программы включает следующие элементы: меню с командами, основное поле программы, на котором размещаются оцениваемые варианты ММКА, статусная строка, показывающая выбранный сценарий расчета. Меню программы состоит из пунктов, представленных на рис. 5 (ОА – опорная альтернатива).

Последовательность действий при работе с программой «Помощник эксперта» включает этапы, проиллюстрированные рис. 6–12.

В подменю «Задание критериев оценивания» вводятся критерии оценивания. Первые три критерия (полная масса ММКА, приведенная масса КДУ, время орбитального маневра) являются основными для выбранного сценария № 1, остальные критерии заполняются в пустых полях формы. Критерий «Полная масса МКА» введен с учетом того, что значение характеристической скорости как критерия оценки задано в сценарии № 1.

В подменю «Попарное сравнение оцениваемых вариантов» сравниваются оцениваемые варианты между собой с помощью шкалы лингвистических оценок $Z_{\text{ш}}^{\text{а}}$ [4]:

- $Z_{\text{ш}}^{\text{а}} = 1$ – равная важность;
- $Z_{\text{ш}}^{\text{а}} = 3$ – умеренное превосходство;
- $Z_{\text{ш}}^{\text{а}} = 5$ – существенное или сильное превосходство;
- $Z_{\text{ш}}^{\text{а}} = 7$ – значительное превосходство;
- $Z_{\text{ш}}^{\text{а}} = 9$ – очень большое превосходство.

Промежуточные значения $Z_{\text{ш}}^{\text{а}}$: 2, 4, 6, 8.

В табл. 1 приведены результаты критериальных расчетов для опорных альтернатив ММКА с центральным (вариант № 1), с нижним торцевым (вариант № 2) и с верхним торцевым (вариант № 3) расположением КДУ (рис. 13). Заданный запас характеристической скорости – 100 м/с. Расчетные значения критериев оцениваемых вариантов являются исходной информацией для назначения $Z_{\text{ш}}^{\text{а}}$ для данных критериев.

В подменю «Результаты расчета» производится расчет критериев оценивания по выбранным оцени-

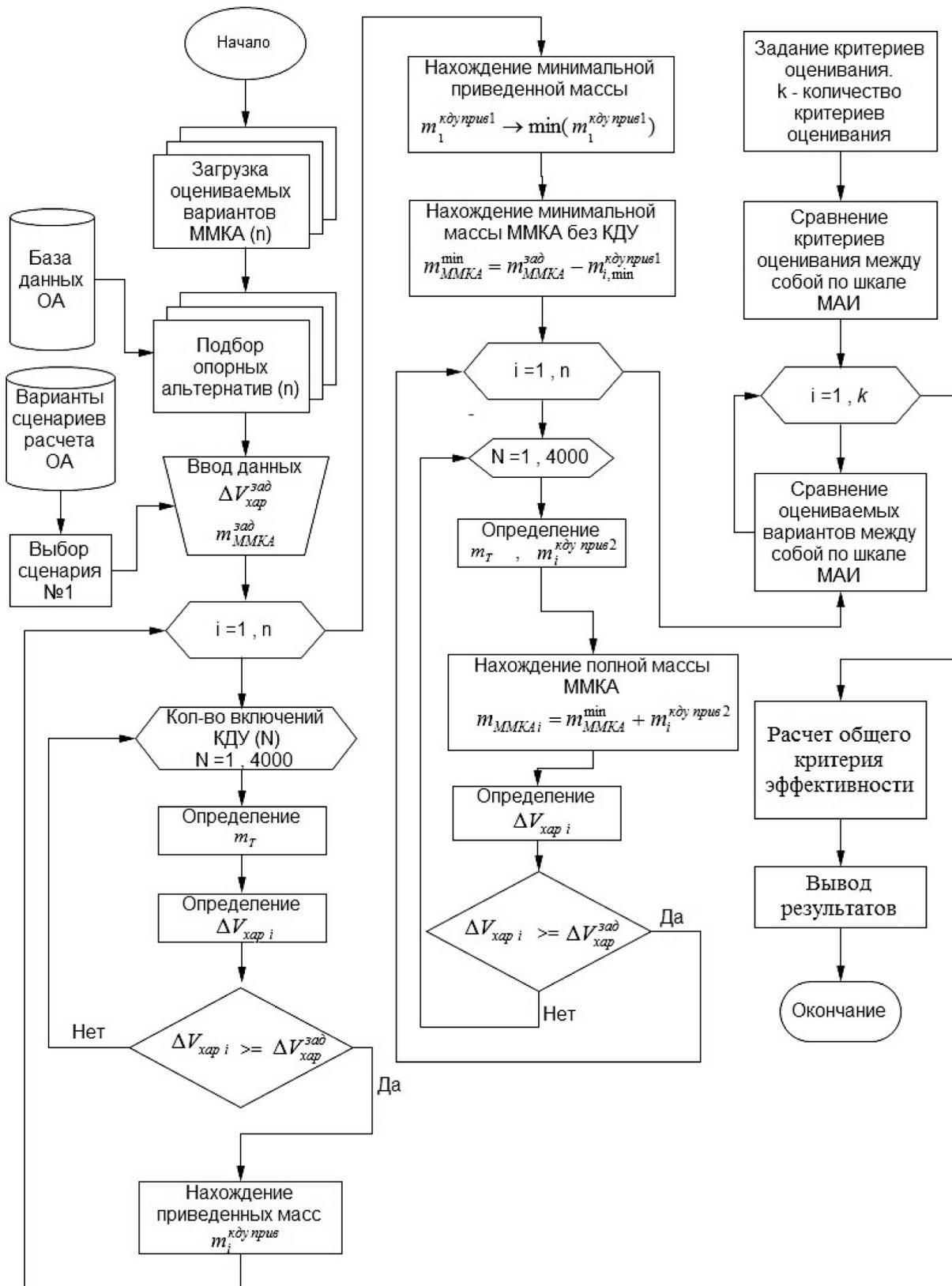


Рис. 4. Блок-схема программы «Помощник эксперта»

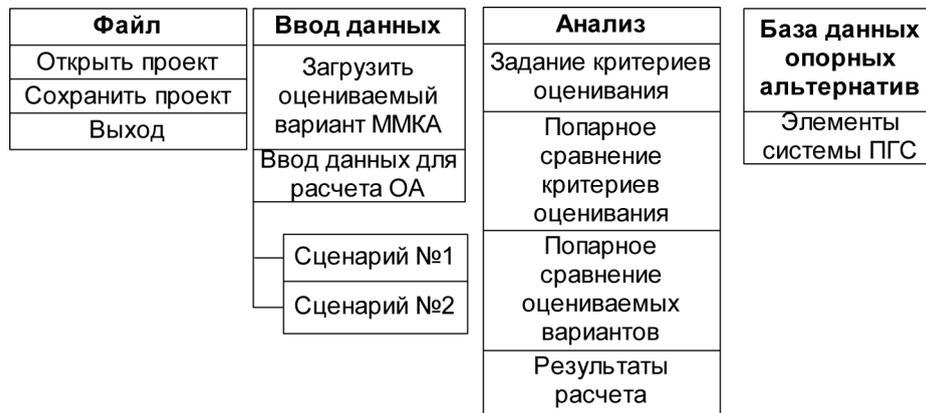


Рис. 5. Основное меню программы

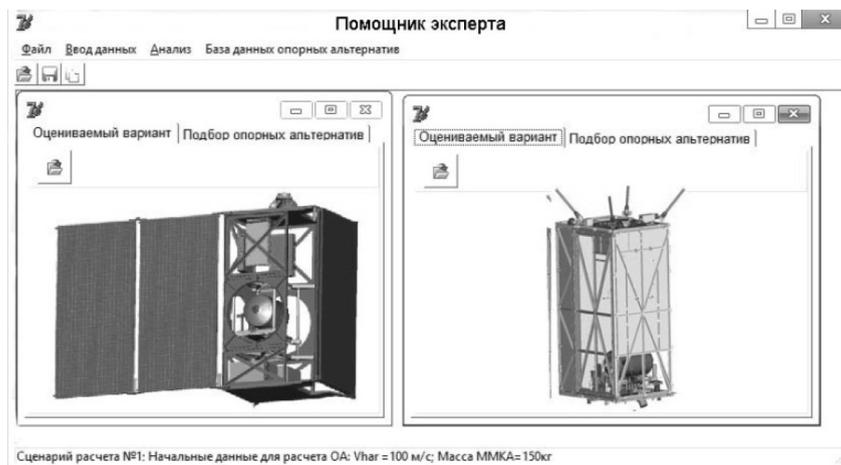


Рис. 6. Основное поле программы с оцениваемыми вариантами

Вариант № 1

Оцениваемый вариант | Подбор опорных альтернатив |

Наименование оцениваемого варианта: Вариант № 1

Вид топливного бака: цилиндрический со сферическими днищами

Плата крепления бака: для бака со сферическими днищами

ПГС состоит из: система резервирования линий и двигателей ПГС

Наименование элемента	Количество	Масса, кг
Муфта	2	0,05
Фильтр	2	0,004
ЭПК	4	0,154
Испаритель	2	0,05
Регулятор давления	2	0,26
ЭТМД	2	0,2
Блок автоматики	1	0,8
Трубопроводы	1	1

Суммарный вес элементов ПГС: 3,544

Система адаптации КДУ: центральная перемещаемая

- центральная перемещаемая
- торцевая неподвижная снизу
- торцевая неподвижная сверху
- центральная неподвижная
- торцевая перемещаемая снизу
- торцевая перемещаемая сверху

- цилиндрический со сферическими днищами;
 - цилиндрический с торосферическими днищами;
 - сферический.
 - для бака со сферическими днищами;
 - для бака с торосферическими днищами;
 - для сферического бака.

Рис. 7. Внешний вид формы для подбора опорных альтернатив

Сценарий №1. Ввод на...

Укажите требуемый запас $V_{хар}$, м/с: 100

Укажите требуемую массу ММКА, кг: 150

OK Отмена

Критерии оценивания

- Полная масса ММКА
- Приведенная масса КДУ
- Время орбитального маневра
- Надежность
- Безопасность работы с аммиаком
- Ремонтопригодность

OK Отмена

Рис. 8. Вид окна ввода данных и форма задания критериев оценивания

База данных опорных альтернатив

Добавить элемент

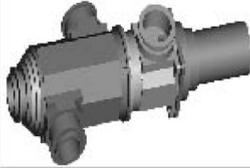
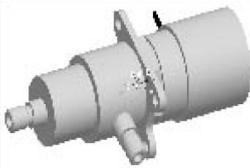
Наименование элемента	Изображение	Масса, кг
Испаритель		0,05
Муфта		0,05
Пусковой прорывной клапан		0,343

Рис. 9. Фрагмент базы данных опорных альтернатив

Попарное сравнение критериев оценивания

Полная масса ММКА	<input type="range" value="2"/>	Приведенная масса КДУ
Полная масса ММКА	<input type="range" value="2"/>	Время орбитального маневра
Полная масса ММКА	<input type="range" value="2"/>	Надежность
Полная масса ММКА	<input type="range" value="2"/>	Безопасность при работе с аммиаком

Рис. 10. Фрагмент формы попарного сравнения критериев оценивания

Попарное сравнение оцениваемых вариантов

Выбор критерия, по которому производится сравнение:

Вариант №	М ₀	Сравнение	Вариант №	М ₀
Вариант № 1	195,34 кг	<input type="range" value="2"/>	Вариант № 2	194,21 кг
Вариант № 1	195,34 кг	<input type="range" value="2"/>	Вариант № 3	185 кг
Вариант № 2	194,21 кг	<input type="range" value="2"/>	Вариант № 3	185 кг

Результаты сравнения:
 Вариант № 1=0,25
 Вариант № 2=0,25
 Вариант № 3=0,5

Рис. 11. Форма для попарного сравнения оцениваемых вариантов

Оцениваемые варианты	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3	Веса критериев оценивания
Критерии оценивания				
Полная масса ММКА	0,25	0,25	0,5	0,275
Приведенная масса КДУ	0,157	0,249	0,594	0,218
Время орбитального маневра	0,25	0,25	0,5	0,173
Надежность	0,493	0,196	0,311	0,138
Безопасность при работе с аммиаком	0,4	0,2	0,4	0,087
Ремонтопригодность	0,25	0,5	0,25	0,109
Обобщенный критерий	0,276	0,265	0,458	

Рис. 12. Окно результатов расчета

Таблица 1

Критерии оценивания	Расчетные значения		
	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Приведенная масса КДУ, кг	26,99	25,86	16,65
Полная масса ММКА, кг	195,34	194,21	185
Время орбитального маневра, ч.	176,8	175,6	167,5

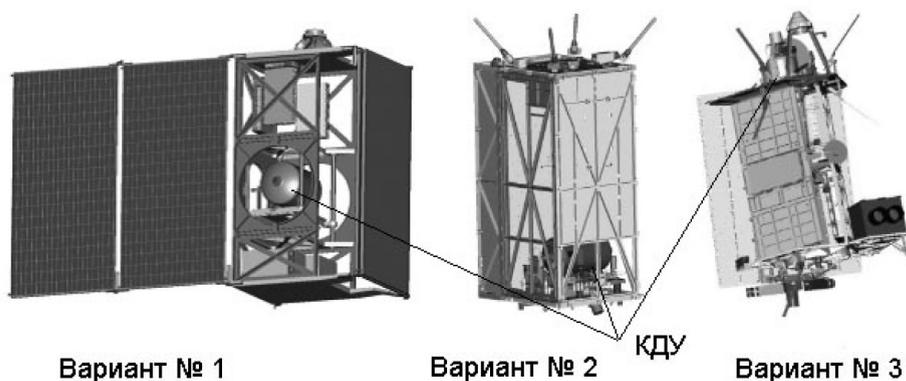


Рис. 13. Опорные альтернативы ММКА

ваемым вариантам с использованием МАИ и выводится результат в виде ранжированной таблицы по степени важности критериев эффективности (рис. 12).

Из рис. 12 следует, что наилучшим оцениваемым вариантом является Вариант № 3, имеющий наибольшее значение обобщенного критерия.

Разработанная методика с использованием программы «Помощник эксперта» повышает достоверность оценки представленных вариантов ММКА с КДУ на начальном этапе проектирования с использованием МАИ.

Литература

1. Исследования электротермических микродвигателей корректирующих двигательных установок маневрирующих малых космических аппаратов: монография / В.Н. Блинов [и др.]. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 264 с.

2. The Studies of Small Space Vehicles Ammoniac Electrothermal Engine Units Design and Structural Layout / V. Blinov [et al.] // Modern applied science. – 2015. – Vol. 9. – No. 5. – P. 337–357.

3. Блинов, В. Н. К выбору опорных альтернатив при оценке эффективности малых космических аппаратов с аммиачными двигательными установками методом аналитической иерархии / В.Н. Блинов, В.В. Шалай, Е.Б. Чарушина // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 2. – С. 210–220.

4. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий : [пер. с англ.] / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1989. – 316 с.

5. Блинов В.Н. Формирование требований к корректирующим двигательным установкам с аммиачными микродвигателями / В.Н. Блинов // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли : материалы IX Всерос. науч. конф., посвящ. памяти гл. конструктора ПО "Полет" А. С. Клинышкова (Омск, 17 февр. 2015 г.) / ПО "Полет" – фил. ФГУП "ГКНПЦ им. М. В. Хруничева", ОмГТУ ; редкол.: В. Н. Блинов [и др.]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. – С. 43–50.

6. Оценка массовой эффективности маневрирующих малых космических аппаратов с двигательной установкой микротяги на аммиаке / В.Н. Блинов [и др.] // Омский научный вестник. – 2012. – Вып. 1. – С. 59–62.