

УДК 629.78

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ИНСПЕКЦИИ НА БАЗЕ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2013 И. С. Ткаченко, И. В. Кауров

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматривается методика интегральной оценки эффективности космической системы орбитальной инспекции на базе малых космических аппаратов с электрореактивными энергодвигательными модулями. Определены основные показатели эффективности системы. Разработан алгоритм расчёта коэффициента интегральной относительной оценки системы орбитальной инспекции. Проведена апробация разработанного алгоритма, позволившая определить наиболее эффективный вариант построения системы при заданных коэффициентах приоритета. Показана существенная зависимость результатов оценки эффективности системы от значений коэффициентов приоритета показателей.

Малый космический аппарат, космическая система орбитальной инспекции, показатель эффективности, интегральная оценка, альтернатива, морфологическая матрица, гистограмма.

Введение

В настоящее время основными источниками информации в системе контроля космического пространства являются наземные радиолокационные, оптические и радиотехнические средства, способные осуществлять наблюдение космических объектов (КО), получать координатную и некоординатную измерительную информацию о КО и передавать её на наземный пункт для накопления, централизованной обработки, обобщения, анализа. При этом система контроля космического пространства таких стран, как США и Китай, располагают не только наземными, но и космическими средствами обнаружения КО, а также и средствами инспекции в космосе.

Космическая инспекция (КИ) – комплекс орбитальных операций, осуществляемый с помощью средств космического базирования и направленный на получение информации о космических объектах путём сближения с инспектируемым объектом с целью его технического диагностирования.

Анализ существующих средств космической инспекции позволяет сделать вывод о том, что высокая эффективность

реализации проектов КА-инспекторов (с точки зрения оперативности развёртывания системы) может быть достигнута за счёт использования «модульных технологий малых космических аппаратов» [1].

Известные КА-инспекторы, как правило, оснащаются химическими ракетными двигателями, работающими на однокомпонентном топливе (гидразине). Вместе с тем практический интерес представляют КА, осуществляющие инспекцию с малой тягой, создаваемой электрореактивными энергодвигательными модулями (ЭРЭДМ), обладающими высокими энергетическими характеристиками.

Космическая система орбитальной инспекции

Космическая система орбитальной инспекции (КСОИ) представляет собой комплекс технических средств, реализующих технологию космической инспекции и обеспечивающих достижение главной цели инспекции – получение информации об орбитальных объектах.

Функционирование КСОИ обеспечивают: ракета-носитель; один или группировка аппаратов-инспекторов; спутник-ретранслятор (в случае необходимости);

наземные станции приёма; командный пункт управления.

Основными параметрами, определяющими систему орбитальной инспекции, являются: P – вектор параметров рабочей орбиты космического аппарата (КА)-инспектора; $N_{КА}$ – количество аппаратов-инспекторов в системе; I_S – общий объём требуемых данных об инспектируемых КО (бит); k – количество одновременно инспектируемых КО; $T_{дост}$ – время доставки информации потребителю (с); $C_{КСОИ}$ – стоимость создания системы (у.е).

Космическая система орбитальной инспекции, как любая сложная техническая система, обладающая иерархической структурой и поливариантностью схем построения, требует разработки системы оценки её эффективности. Очевидно, что оценка эффективности КСОИ по какому-либо одному показателю эффективности не даст объективной информации проектировщику или лицу, принимающему решение (ЛПР), для выбора определённого варианта построения системы. В этой связи необходимо введение совокупности показателей для обеспечения многосторонней оценки КСОИ.

Показатели эффективности представляют собой совокупность важнейших параметров, характеризующих объект с различных сторон по возможностям использования его по назначению. Выбор показателей из множества возможных параметров осуществляется, исходя из следующих соображений:

- существенность показателя для рассматриваемого типа объекта;
- количественная определяемость показателя;
- потенциальная возможность изменения значения показателя.

На основе анализа [2, 3] определены следующие показатели эффективности КСОИ.

Информативность I – показатель, отражающий объём получаемой информации об объекте инспекции:

$$I = N_{КА} \cdot \sum_{l=1}^n u_{ml} \cdot m_{ЦА l}, \quad (1)$$

где u_{ml} – удельный объём информации, полученный с l -го источника за одну операцию инспекции (Мб/кг); n – количество источников информации об инспектируемом объекте (обычно на борту КА-инспектора размещают несколько видов целевой аппаратуры: цифровая фотоаппаратура видимого оптического диапазона; цифровая фотоаппаратура инфракрасного диапазона; средства измерения линейных размеров; средства радиозондирования и др.); $N_{КА}$ – число КА-инспекторов в КСОИ.

Производительность P – показатель, отражающий количество целей, которые могут одновременно инспектироваться КСОИ (соответствует количеству аппаратов-инспекторов $N_{КА}$ в системе).

Оперативность выполнения операции инспекции O – отражает время перехода КА-инспектора в область аппарата-цели.

Запасы характеристической скорости $V_{ХС}$ – отражает манёвренные возможности КА-инспектора.

Стоимость системы C – показатель, отражающий общий уровень затрат на создание системы. Затраты на развертывание системы орбитальной инспекции включают в себя: затраты на создание КА-инспектора(ов) и затраты на выведение КА-инспектора(ов) на орбиту.

Критерий эффективности КСОИ можно представить в виде:

$$\bar{E} = E(I, P, O, V_{ХС}, C)^T. \quad (2)$$

Запись (2) условна, зависимость между компонентами вектора \bar{E} в явном виде установить крайне сложно в связи с их различной физической сущностью, что в дальнейшем и определило выбор метода анализа эффективности системы – метод относительной интегральной оценки.

Постановка задачи

Анализ эффективности КСОИ требует определения основных проектных параметров системы, часть из которых затем переводится в разряд показателей эффективности. В свою очередь, задача определения основных проектных параметров системы орбитальной инспекции имеет иерархическую структуру и включает в себя последовательное решение задач определения параметров ЭРЭДМ и параметров КА-инспектора. При этом первую задачу обычно разделяют на две: проектную и динамическую.

Общая задача оптимизации заключается в поиске проектных параметров \bar{p} , доставляющих максимум обобщённому критерию эффективности системы:

$$\bar{E} = E(I(p), O(p), P(p), V_{x\Sigma}(p), C(p)). \quad (3)$$

Обозначим вектор проектных параметров КСОИ через $p = (p_1, p_2, \dots, p_m)^T$, $p \in P$, где P – множество допустимых проектных параметров системы.

Выделим из множества проектных параметров системы подмножество параметров КА-инспектора. К ним относятся: массово-габаритные характеристики КА-инспектора, как правило, определяемые возможностями конкретного носителя; запас характеристической скорости для выполнения совокупности динамических операций; предельно-допустимое время выполнения динамической операции; массово-габаритные и энергетические характеристики целевой аппаратуры, от которых зависит в основном её состав и информативность получаемых данных; параметры системы энергопитания; тип и количество двигателей, позволяющих реализовать совокупность динамических операций.

Дальнейшая декомпозиция задачи приводит к выделению одной из важных подсистем: электрореактивного энергодвигательного модуля.

Сформулируем проблему совместной оптимизации управлений $u(t)$, траекторий $x(t)$, динамической операции z и проектных параметров p' электрореактивного энергодвигательного модуля.

Под динамической операцией (манёвром) z будем понимать переход КА из начального состояния $x(t_0) = x_0$ в конечное многообразие $x(t_K) = X_K$.

Задачей проектно-баллистической оптимизации будем называть задачу отыскания проектных параметров $\bar{p}' \in P$ и совокупности функций $\bar{u}(t, x, z)$, $\bar{x}(t, z)$ из множества допустимых D , обеспечивающих реализацию диапазона динамических манёвров Z при минимальном (максимальном) значении заданного критерия оптимальности. Критерием оптимальности в задаче проектно-баллистической оптимизации является относительная полезная нагрузка [4].

Результаты решения проектно-баллистической задачи

Решение динамической задачи движения КА-инспектора, оснащённого ЭРЭДМ, показано в работе [5]. Результат её решения представляет собой затраты характеристической скорости, необходимые на осуществление манёвров различных типов (по элементам орбиты), а совокупность этих значений есть диапазон динамических манёвров КА-инспектора.

В работе [5] описан алгоритм синтеза проектных параметров КА-инспектора, содержащий итерационную схему определения проектных параметров ЭРЭДМ, базирующийся на последовательно усложняющихся моделях движения КА-инспектора и уточнении значения динамической характеристики манёвра в зависимости от учитываемых возмущающих факторов: влияние нецентральности гравитационного поля Земли; влияние верхних слоёв атмосферы.

В соответствии с данным алгоритмом могут быть найдены оптимальные параметры ЭРЭДМ, которые затем сравниваются с параметрами реальных двигательных установок. Множество проектных параметров реальных ЭРЭДМ КА-инспектора, а вместе с тем и множество возможных альтернативных вариантов построения КСОИ формируется по принципу табл. 1. Данное множество представляет собой морфологическую матрицу альтернатив [3].

Таблица 1. Формирование множества вариантов построения КСОИ

$M_{КАi}, \text{ кг}$ \ $P_j, \text{ Н}$	P_1	...	P_k
$M_{КА1}$	a_{011}	...	a_{0k1}
...
$M_{КАm}$	a_{01m}	...	a_{0km}

В таблице обозначены $M_{КАi}$ – масса КА-инспектора (кг), где $i = \overline{1, m}$; P_j – тяга двигательной установки (Н), где $j = \overline{1, k}$; a_{0ij} – значения управляющих ускорений (м/с^2). Ожидаемая проектная масса КА-инспектора определяется энергетическими возможностями ракеты-носителя. Для формирования множества альтернатив (табл. 1) в работе [5] использовались энергетические характеристики (масса полезной нагрузки, выводимая на солнечно-синхронную орбиту высотой 400 км и наклоном 97°) российских ракет-носителей лёгкого класса: «Рокот», «Стрела», «Старт-1», «Волна», «Циклон», «Штиль», «Космос», «Союз-2-1в». В качестве двигателей для ЭРЭДМ КА-инспектора рассматривались стационарные плазменные двигатели СПД-25, СПД-35, СПД-50, СПД-60, СПД-70, СПД-100 и импульсный плазменный двигатель АИПД-150. Табл. 1 может быть расширена за счёт введения дополнительных параметров: n^1 – количество двигателей в составе ЭРЭДМ (действующих в одном направлении тяги) и $N_{КА}$ – количество КА-инспекторов, размещаемых в зоне полезной нагрузки носителя.

Алгоритм расчёта коэффициента интегральной относительной оценки КСОИ

Понятие «интегральной оценки» (ИО) объекта может рассматриваться в двух аспектах. С одной стороны, как комплекс абсолютных значений важнейших параметров объекта, позволяющих получить заключение об эффективности объекта, а с другой стороны, интегральная оценка объекта может рассматриваться в виде одного интегрального относительно показателя эффективности [6].

Достоинством данного метода является то, что анализ эффективности одной альтернативы по сравнению с другой ведётся на основе совокупного коэффициента относительной интегральной оценки, не требующего расчёта значения суперпоказателя, что зачастую связано с трудностями процесса перехода к безразмерным величинам показателей эффективности. К недостаткам стоит отнести необходимость определения коэффициентов приоритетов показателей эффективности, процесс поиска которых в любом случае включает субъективную составляющую (мнение экспертов, ЛППР и т. д.).

Структурная схема алгоритма интегральной относительной оценки КСОИ представлена на рис. 1. Отправной операцией алгоритма является определение значимости показателей, т.е. величины их коэффициентов приоритета (коэффициентов весомости). Коэффициенты приоритета показателей оценки эффективности системы a_j определяются любым из известных методов, например, экспертным путем, либо с помощью метода парных сравнений [7]. Наиболее простой способ определения коэффициентов приоритетов, который будет использоваться, – их назначение ЛППР, которое самостоятельно определяет, какой из показателей эффективности является наиболее важным в данный момент времени при сложившихся внешних условиях.

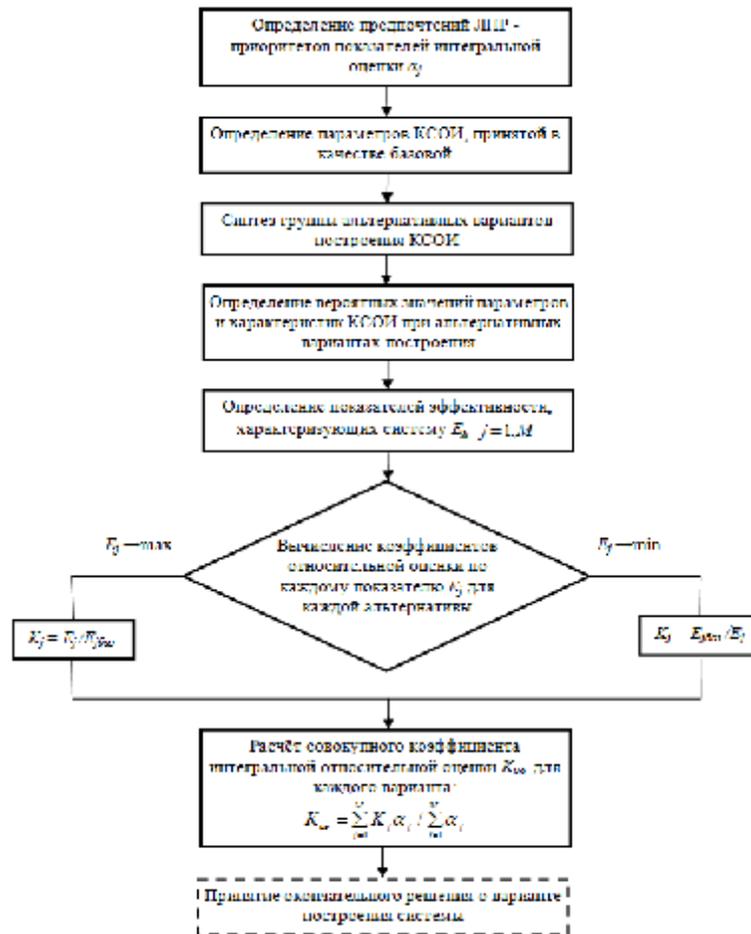


Рис. 1. Структурная схема алгоритма интегральной относительной оценки КСОИ

За определением приоритетов показателей следует описание «базового» варианта построения КСОИ и определение её параметров при данном «базовом» варианте. В качестве базового выбирается один из вариантов, относительно которого проводится оценка эффективности других альтернатив. Следующим шагом является синтез группы альтернативных вариантов построения системы и определение их параметров. После того как определены параметры и характеристики базового и альтернативных вариантов системы на всех уровнях иерархии, формируется группа показателей $E_j, j=1, M$. В данном случае основными показателями эффективности системы являются: I, P, O, V_{XS}, C , которые могут быть определены численно.

За определением показателей следует вычисление коэффициентов относительной оценки по каждому из показате-

лей. При этом для показателей, численные значения которых при повышении эффективности системы уменьшаются (показатели O, C):

$$K_j = E_{jбаз} / E_j. \tag{4}$$

Для показателей, значения которых при повышении эффективности системы увеличиваются (показатели I, P, V_{XS}):

$$K_j = E_j / E_{jбаз}. \tag{5}$$

Совокупный коэффициент интегральной относительной оценки системы определяется по сумме M показателей, взвешенных по их значимости [6]:

$$K_{инт} = \frac{\sum_{j=1}^M K_j a_j}{\sum_{j=1}^M a_j}. \tag{6}$$

Пример реализации алгоритма

Синтез базового варианта КСОИ и группы альтернативных вариантов построения системы производится с помощью морфологической матрицы (табл.1), исходными данными для формирования которой служит информация по ракетам-носителям и электрореактивным двигателям, приведённая выше. С учётом введения дополнительных параметров ($n^1 = 1 \div 3$, $N_{КА} = 1 \div 3$) количество альтернатив в матрице достигает 504 вариантов. Для демонстрации работы алгоритма (рис. 1) выберем 13 вариантов, один из которых условно обозначим как «базовый». В

табл.2 приведены параметры выбранных вариантов, а также численные значения показателей эффективности для каждого варианта (правая часть табл. 2), определённые по методикам, описанным в [5].

Определим коэффициенты относительной оценки по каждому из показателей эффективности КСОИ при различных вариантах её построения (табл. 3) с помощью выражений (4), (5).

С помощью выражения (6) получим коэффициенты интегральной относительной оценки КСОИ при различных вариантах её построения (рис. 2).

Таблица 2. Варианты построения КСОИ

Вариант КСОИ	$N_{КА}$	$M_{КА}$	РН	n^1	Двигатель	$I, Мб$	$P, КА$	$O, час$	$V_{XS}, м/с$	$C, у. е.$
Базовый	2	750	Союз 2-1в	2	СПД-60	487,6	2	1902,3	1095,7	29,9
Альтернативный 1	1	260	Штиль	1	СПД-50	84,2	1	1978,9	547,8	7,5
Альтернативный 2	3	367	Рокот	1	СПД-60	357,4	3	1775,7	1643,5	24,2
Альтернативный 3	2	750	Союз 2-1в	3	СПД-50	484,5	2	1860,4	1095,7	30,4
Альтернативный 4	1	1100	Рокот	3	СПД-60	357,1	1	1775,7	547,8	23,4
Альтернативный 5	1	350	Старт-1	1	СПД-60	113,3	1	1902,3	547,8	10,4
Альтернативный 6	3	467	Циклон	1	СПД-70	452,8	3	1923,9	1643,5	28,1
Альтернативный 7	3	500	Союз 2-1в	1	СПД-70	487,0	3	1775,7	1643,5	29,9
Альтернативный 8	1	1100	Рокот	1	СПД-100	356,6	1	1902,3	547,8	21,9
Альтернативный 9	2	700	Циклон	2	СПД-60	453,2	2	1860,4	1095,7	28,1
Альтернативный 10	1	1400	Циклон	3	СПД-70	452,5	1	1775,7	547,8	26,4
Альтернативный 11	1	1500	Союз 2-1в	3	СПД-70	487,0	1	1902,6	547,8	29,0
Альтернативный 12	2	175	Старт-1	3	АИПД-150	111,0	2	1973,8	1095,7	11,2

Таблица 3. Коэффициенты относительной оценки по показателям эффективности КСОИ

Вариант	Коэффициент				
	K_I	K_P	K_O	K_V	K_C
Базовый	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Альтернативный 1	0,17	0,50	0,96	0,50	3,95
Альтернативный 2	0,73	1,50	1,07	1,50	1,24
Альтернативный 3	0,99	1,00	1,02	1,00	0,98
Альтернативный 4	0,73	0,50	1,07	0,50	1,28
Альтернативный 5	0,23	0,50	1,00	0,50	2,87
Альтернативный 6	0,93	1,50	0,99	1,50	1,06
Альтернативный 7	1,00	1,50	1,07	1,50	1,00
Альтернативный 8	0,73	0,50	1,00	0,50	1,36
Альтернативный 9	0,93	1,00	1,02	1,00	1,06
Альтернативный 10	0,93	0,50	1,07	0,50	1,13
Альтернативный 11	1,00	0,50	1,00	0,50	1,03
Альтернативный 12	0,23	1,00	0,96	1,00	2,65

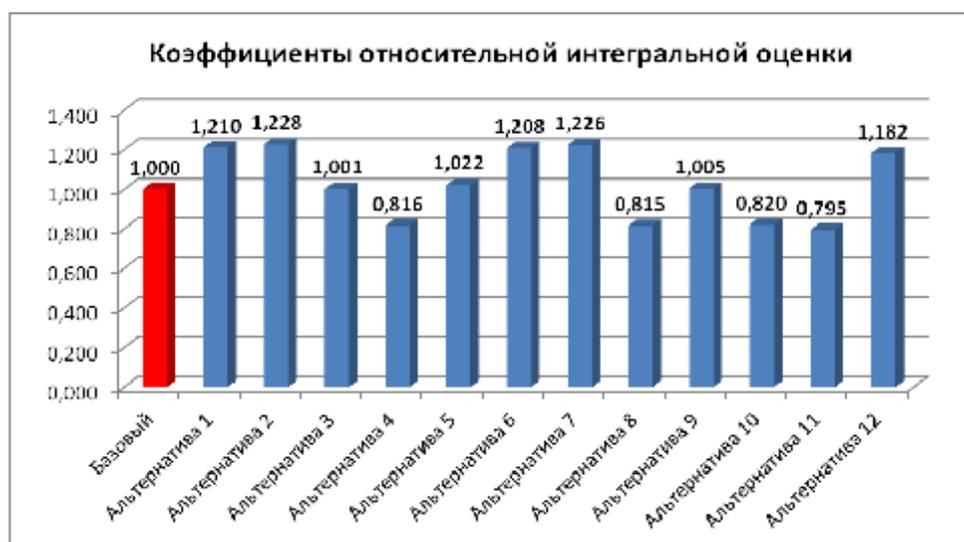


Рис. 2. Гистограмма коэффициентов относительной интегральной оценки



Рис. 3. Гистограмма коэффициентов относительной интегральной оценки (комбинация коэффициентов приоритета (8))

Следует отметить, что значения коэффициентов относительной интегральной оценки, представленные на гистограмме, получены для конкретного набора коэффициентов приоритета показателей a_j :

$$a_1 = 0,21; a_2 = 0,16; a_3 = 0,19; a_4 = 0,21; a_5 = 0,23, \quad \sum_{j=1}^5 a_j = 1. \quad (7)$$

Анализ данных, представленных на гистограмме (рис. 2), показывает, что максимальным коэффициентом интегральной относительной оценки обладает Альтернатива 2 с параметрами, приведёнными в табл. 2.

Как уже было отмечено выше, используемый метод оценки имеет ряд особенностей, основной из которых является зависимость результата от выбранного

набора значения коэффициентов приоритета. Покажем, что изменение приоритетов существенно влияет на результат оценки эффективности. На рис. 3 приведена гистограмма коэффициентов относительной интегральной оценки КСОИ при следующих коэффициентах приоритета показателей a_j :

$$a_1 = 0,15; a_2 = 0,10; a_3 = 0,50; a_4 = 0,10; a_5 = 0,15. \quad (8)$$

При данной комбинации коэффициентов приоритета показатель экономической эффективности (стоимость) системы имеет наибольший удельный вес, что соответствует определённой политике ЛПР, при которой ставится задача достижения

цели системы при минимальных затратах. Анализ данных, представленных на гистограмме (рис. 3), показывает, что наибольший $K_{ц0}$ имеет Альтернатива 1 (табл. 2).

На рис. 4 приведена гистограмма коэффициентов относительной интегральной оценки КСОИ при следующих коэффициентах приоритета показателей a_j :

$$a_1 = 0,20; a_2 = 0,25; a_3 = 0,10; a_4 = 0,20; a_5 = 0,25. \quad (9)$$

При данной комбинации коэффициентов приоритета наибольшее значение коэффициента интегральной относительной оценки имеет Альтернатива 7 (табл.2).

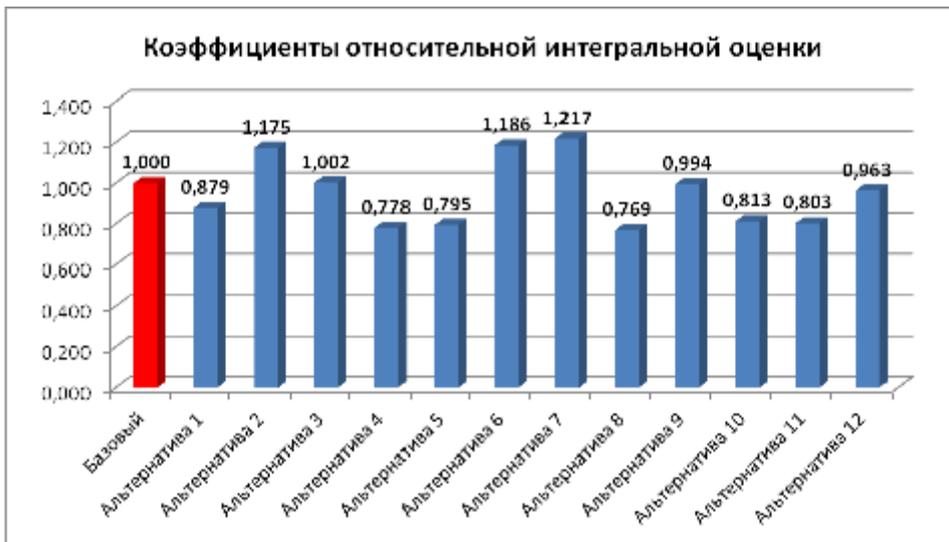


Рис. 4. Гистограмма коэффициентов относительной интегральной оценки (комбинация коэффициентов приоритета (9))

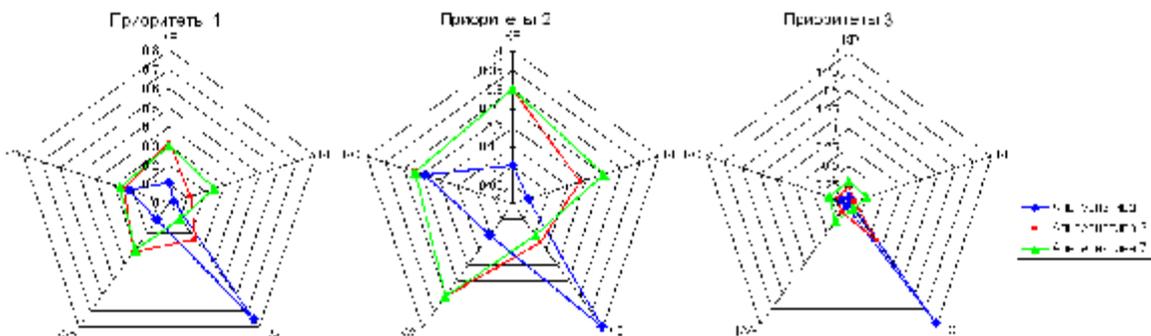


Рис. 5. Диаграммы коэффициентов относительной оценки по показателям эффективности КСОИ

Выводы

Анализ полученных гистограмм (рис.2–4) показывает существенные отличия в значениях коэффициентов относительной интегральной оценки различных вариантов в зависимости от комбинации коэффициентов приоритета (предпочтения ЛПР). На рис. 5 показаны лепестковые диаграммы коэффициентов относительной оценки по каждому показателю эффективности для трёх комбинаций коэффициентов приоритета.

Рассмотренная в статье методика показывает, что метод относительной интегральной оценки носит универсальный характер и может быть применим к задаче оценки эффективности системы орбитальной инспекции на базе малых космических аппаратов.

Зависимость результатов оценки эффективности КСОИ от значений коэффициентов приоритета может рассматриваться как недостаток предложенного метода, однако в случае чётких представлений ЛПР или внешних условий, однозначно определяющих приоритеты показателей, данный факт не снижает эффективности подхода.

В случае, если необходима объективная оценка объекта исследования, должны использоваться специальные методы определения коэффициентов приоритета (метод экспертных оценок, метод парных сравнений и др.), снижающих степень субъективности в данном процессе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Библиографический список

1. Волоцун, В. В. Выбор проектных параметров универсальных платформ малых космических аппаратов [Текст] / В.В. Волоцун, И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов // Вестник СГАУ. – 2012. – №2. – С. 35-47.
2. Малышев, В. В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ синтез и управление [Текст]/ В. В. Малышев, В. Т. Бобронников, О. П. Нестеренко, А. В. Федоров; под ред. В. В. Малышева. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.
3. Лебедев, А. А. Курс системного анализа [Текст]/ А. А. Лебедев. – М.: Машиностроение, 2010. – 256 с.
4. Салмин, В. В. Оптимизация космических перелётов с малой тягой. Проблемы совместного управления траекторным и угловым движением [Текст] / В. В. Салмин. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
5. Ткаченко, И. С. Анализ эффективности космических аппаратов-инспекторов с электрореактивными энергодвигательными модулями [Текст] / И.С. Ткаченко, В.В. Салмин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Вып. 6. – С. 106-115.
6. Маслов, В. Г. Теория и методы начальных этапов проектирования ГТД [Текст]: учеб. пособие / В. Г. Моисеев, В. С. Кузьмичев, А. Н. Коварцев, В. А. Григорьев. – Самара: СГАУ, 1996 – 146 с.
7. Дэвид, Г. Метод парных сравнений [Текст] / Г. Дэвид; пер. с англ. – М.: Статистика, 1978. – 144 с.

INTEGRATED ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF AN ORBITAL INSPECTION SPACE SYSTEM BASED ON SMALL SATELLITES

© 2013 I. S. Tkachenko, I. V. Kaurov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The paper presents a method of integrated assessment of the efficiency of an orbital inspection space system based on small satellites with electrojet power modules. The main indicators of the system's efficiency are defined. An algorithm for calculating the coefficient of integrated relative assessment of an orbital inspection system is developed. The approbation of the developed algorithm was carried out in order to define the most efficient variant of creating the system with the given priority coefficients. The results of assessing the system's efficiency are shown to depend strongly on the values of the coefficients of priority of the indicators.

Small satellite, space system of orbital inspection, efficiency indicator, integrated assessment, alternative, morphological matrix, histogram.

Информация об авторах

Ткаченко Иван Сергеевич, кандидат технических наук, инженер кафедры летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: innovatore@mail.ru. Область научных интересов: проектирование и создание малых космических аппаратов, системный анализ.

Кауров Иван Владимирович, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: ivkaur@yandex.ru. Область научных интересов: проектирование малых космических аппаратов с двигателями малой тяги.

Tkachenko Ivan Sergeevich, candidate of technical science, engineer of the department of aircraft construction, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: innovatore@mail.ru. Area of research: designing and creation of small satellites, system analysis.

Kaurov Ivan Vladimirovich, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: ivkaur@yandex.ru. Area of research: designing of small satellites with small-thrust engines.