

Ю. М. Ермошкин, В. М. Урусов

## КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ КОРРЕКЦИИ ОРБИТЫ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОМ КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ

*При проектировании новых изделий, особенно долгоживущих геостационарных космических аппаратах, возникает задача рационального размещения электрореактивных двигателей коррекции орбиты. Рассмотрены возможные критерии оптимальности при решении такой задачи и результаты их применения.*

*Ключевые слова:* космический аппарат, двигатель, двигательная установка, топливо, рабочее тело.

За последние два десятка лет в отечественных и зарубежных КА все более широко применяются электрореактивные двигатели (ЭРД) [1]. Задача размещения ЭРД на борту возникает каждый раз при разработке нового изделия. Ее сложность и уникальность для каждого типа КА обусловлена сложностью компоновки спутника, наличием в зоне действия струй двигателей крупногабаритных элементов конструкции. Возможности формализации процесса компоновки двигателей на КА весьма ограничены, поэтому каждый раз задачу приходится решать практически заново. Однако на основе опыта разработки ряда изделий можно сформулировать некие общие правила. Задачей настоящей работы является рассмотрение возможных критериев оптимальности размещения ЭРД коррекции орбиты на борту геостационарного спутника и оценка результатов их использования применительно к компоновкам конкретных КА.

*Задача оптимального размещения двигателей коррекции орбиты геостационарного спутника.* Прежде всего, необходимо определить целевую функцию двигательной подсистемы коррекции. Таковых в принципе может быть две: «чистая» задача коррекции орбиты и комбинированная задача, т. е. коррекция орбиты, совмещенная с созданием управляющих моментов для разгрузки маховиков. Ограничимся рассмотрением «чистой» задачи, т. е. задачи только коррекции орбиты геостационарного КА в направлениях «север–юг» и «запад–восток». Следствием такой постановки являются необходимые условия:

– линия действия тяги каждого двигателя проходит через центр масс КА;

– имеется отдельная двигательная установка ориентации для разгрузки маховиков, обеспечения ориентации КА в начальных режимах и режимах обеспечения живучести.

С учетом приведенных условий задача оптимального размещения двигателей коррекции сводится к оптимизации геометрического фактора, т. е. к определению углов установки двигателей и точек их размещения на поверхности КА по некоторому критерию.

Рассмотрим возможные критерии оптимальности размещения двигателей коррекции.

При изменении только геометрического фактора размещения на КА двигателей коррекции изменяется:

– эффективность приложения тяги по осям «север–юг» и «запад–восток», т. е. по номинальным направлениям выдачи тяги. Эффективность, понимаемая как абсолютная величина тяги в номинальном направлении, падает об-

ратно пропорционально косинусам углов отклонения осей двигателей от указанных номинальных направлений;

– силовое взаимодействие струй двигателей с элементами конструкции КА.

Первый эффект можно характеризовать количественно массой рабочего тела, необходимой для выработки заданного суммарного импульса. Очевидно, что эта масса будет минимальной при нулевом отклонении осей двигателей от номинальных направлений выдачи тяги.

Второй эффект – количественно дополнительным запасом топлива ДУ ориентации на компенсацию возмущающих моментов, возникающих от взаимодействия струй двигателей с конструкцией КА.

Очевидно, что наилучшим размещением двигателей коррекции на изделии в данной постановке задачи можно понимать такое размещение, при котором потери в тяге минимальны, и возмущающие моменты от взаимодействия струй двигателей с конструкцией КА также минимальны. Количественно наилучшее размещение можно характеризовать минимальными запасами рабочего тела ДУ коррекции для выработки заданного суммарного импульса и минимальными запасами топлива ДУ ориентации на компенсацию возмущающих моментов от взаимодействия струй двигателей коррекции с конструкцией КА.

С практической точки зрения было бы желательно иметь методику, позволяющую достаточно легко определять «цену» (в килограммах) того или иного варианта размещения двигателей коррекции.

*Оценка изменения массы рабочего тела ДУ коррекции при изменении геометрического фактора размещения двигателей.* «Цена» варианта размещения по параметру эффективности приложения тяги, очевидно, определяется величиной дополнительного запаса рабочего тела ДУ коррекции при отвороте осей двигателей от номинальных направлений:

$$\Delta M = \frac{I_{\Sigma H}}{I_{уд} \cos \alpha} - \frac{I_{\Sigma H}}{I_{уд}} + \frac{I_{\Sigma Д}}{I_{уд} \cos \beta} - \frac{I_{\Sigma Д}}{I_{уд}} = \frac{I_{\Sigma H}}{I_{уд}} \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) + \frac{I_{\Sigma Д}}{I_{уд}} \left( \frac{1}{\cos \beta} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $I_{\Sigma H}$  – суммарный импульс ДУ для коррекции наклона;  $I_{\Sigma Д}$  – суммарный импульс для коррекции долготы;  $I_{уд}$  – удельный импульс двигателя;  $\alpha$  – угол отклонения двигателей коррекции наклона от направления «север–юг»;  $\beta$  – угол отклонения двигателей коррекции долготы от направления «запад–восток».

Формула (1) является простейшей. Предполагается, что для коррекции наклонения и долготы используется один тип двигателя, углы отклонений двигателей коррекции наклонения от оси «север–юг» одинаковы, то же имеет место и для двигателей коррекции долготы.

Отметим, что в частном случае двигатели коррекции наклонения могут быть отклонены в сторону оси «запад–восток». Это дает возможность при осуществлении коррекции наклонения одновременно выдавать импульс тяги вдоль вектора орбитальной скорости. С учетом того, что затраты суммарного импульса на коррекцию наклонения обычно составляют около 80 % от общего запаса суммарного импульса ДУ коррекции, в принципе, даже при достаточно малых отклонениях осей двигателей на направление «запад–восток», можно обеспечить выработку всего требуемого импульса по долготе. Необходимый угол отклонения при этом, очевидно, будет определяться соотношением требуемых суммарных импульсов для коррекции наклонения и долготы:

$$\alpha = \arctg \frac{I_{\Sigma Д}}{I_{\Sigma Н}}. \quad (2)$$

Так, для изделия типа «Экспресс-АМ» соотношение требуемых суммарных импульсов составляет  $\frac{I_{\Sigma Д}}{I_{\Sigma Н}} = 0,217$ . При этом угол  $\alpha$  принимает значение  $\alpha \sim 12,3^\circ$ . Характерно, что эффективность выдачи тяги по направлению «север–юг» при таком отклонении двигателей практически не уменьшается, так как  $\cos 12,3^\circ \approx 0,98$ .

Однако полностью отказаться от двигателей коррекции долготы нельзя, так как долготная составляющая от двигателей коррекции наклонения недостаточна для интенсивных маневров. Для проведения коррекций начального приведения в рабочую точку, перевода в другую точку, коррекции эксцентриситета, увода на орбиту захоронения необходимо использовать долготные двигатели с их номинальной тягой.

*Оценка изменения массы топлива ДУ ориентации при изменении геометрического фактора размещения двигателей коррекции.* Поскольку избежать взаимодействия струй двигателей с элементами конструкции КА в принципе невозможно, возмущающие моменты, возникающие вследствие такого взаимодействия, всегда будут существовать.

Очевидно, что не существует простой зависимости между геометрическим фактором размещения двигателей коррекции и величиной запаса топлива на компенсацию возмущающих моментов, так как эти возмущающие моменты зависят от конфигурации КА, от свойств поверхностей, на которые воздействует реактивная струя и методики использования двигателей. Для каждого размещения двигателей и проектного решения по компоновке КА можно сделать оценки возмущающих моментов и приблизительно оценить запасы топлива на их компенсацию.

Рассмотрим возможную методику оценки затрат топлива ДУ ориентации на компенсацию возмущающих моментов от двигателей коррекции.

Затраты суммарного импульса двигательной установки ориентации и стабилизации (ДУОС) на компенсацию возмущающих моментов от двигателей коррекции про-

порциональны затратам суммарного импульса на коррекцию долготы и наклонения:

$$I_{\Sigma ДУОС} = k_1 I_{\Sigma Д} + k_2 I_{\Sigma Н}, \quad (3)$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты;  $I_{\Sigma Д}$  – суммарный импульс ДУ для коррекции долготы;  $I_{\Sigma Н}$  – суммарный импульс для коррекции наклонения (за срок службы КА).

Наиболее трудоемкой задачей является определение указанных выше коэффициентов. Определим систему координат XYZ с началом в центре масс КА (рис. 1): положительное направление оси Y – по орбитальной скорости, X – по радиусу-вектору (от Земли), Z – по правой тройке (на север). Коэффициенты можно определить следующим образом:

$$k_1 = \frac{1}{P_{ДК}} \left( \frac{M_{ZД}}{L_Z} + k_{XY} M_{XY} \right), \quad (4)$$

где  $P_{ДК}$  – тяга двигателей коррекции;  $M_{ZД}$  – фактическая (по опыту прототипа) или расчетная величина возмущающего момента по оси Z от работы двигателей коррекции долготы (в случае изменения на суточном интервале берется средняя величина момента);  $L_Z$  – эффективное плечо двигателя ориентации, создающего управляющий момент по оси Z;  $M_{XY}$  – фактический (по опыту прототипа) или расчетный возмущающий момент в плоскости XY от работы двигателей коррекции долготы. Коэффициент распределения компенсирующих управляющих моментов по осям X, Y находится по выражению

$$k_{XY} = \frac{k_X}{L_X k_{ex}} + \frac{1 - k_X}{L_Y k_{ey}},$$

где  $k_{ex}, k_{ey}$  – коэффициенты эффективности разгрузок маховиков по осям X, Y, зависящие от методики проведения разгрузок;  $L_X$  – эффективное плечо двигателя ориентации, создающего управляющий момент по оси X;  $L_Y$  – эффективное плечо двигателя ориентации, создающего управляющий момент по оси Y

$$k_2 = \frac{1}{P_{ДК}} \left( \frac{M_{Zкн.ср}}{L_Z} + M_{XYкн.ср} k_{XY} \right), \quad (5)$$

где  $M_{Zкн.ср}$  – средняя величина возмущающего момента по оси Z от двигателей коррекции наклонения;  $M_{XYкн.ср}$  – средняя величина возмущающего момента в плоскости XY от двигателей коррекции наклонения. Осреднение величины возмущающего момента (фактического, по опыту прототипа, или расчетного) производится на выбранном для проведения коррекций интервале в течение суток.

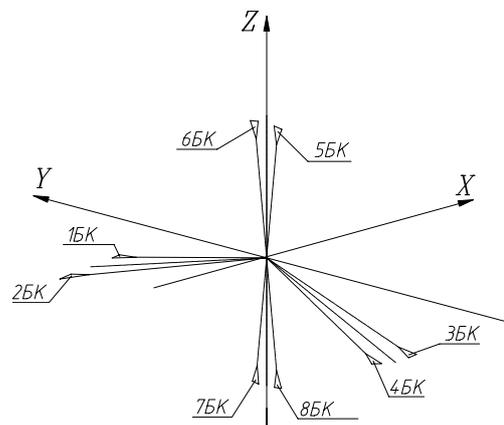


Рис. 1. Типовое размещение двигателей коррекции на КА

Определив по формуле (3) запас суммарного импульса ДУОС на компенсацию возмущающих моментов, можно оценить требуемый запас топлива для этой цели:

$$M_{\text{топл}} = \frac{I_{\Sigma \text{ДУОС}}}{I_{\text{удДУОС}}}. \quad (6)$$

Определение «цены» конкретного варианта компоновки двигателей на КА. Зная проектный облик КА и величины возмущающих моментов от работы двигателей коррекции, можно по формулам (1) и (6) определить «цену» (в килограммах) данного проектного варианта размещения двигателей:

$$M = \Delta M_{\text{РТДУК}} + M_{\text{топлДУОС}}, \quad (7)$$

где  $\Delta M_{\text{РТДУК}}$  – изменение массы РТ двигательной установки коррекции (ДУК) данного варианта размещения двигателей коррекции по сравнению с «идеальным» вариантом, когда оси двигателей направлены вдоль направлений «север–юг» или «запад–восток»;  $M_{\text{топлДУОС}}$  – запас топлива ДУОС на компенсацию возмущающих моментов, возникающих при работе двигателей коррекции в данном варианте размещения.

Отметим, что при данном подходе оценивается только изменяемая часть запаса рабочего тела ДУК и часть топлива ДУОС, необходимая для компенсации возмущающих моментов от работы двигателей коррекции. При этом предполагается, что количество конструктивных элементов двигательной подсистемы (блоков коррекции, баков, СПУ, блоков подачи) остается неизменным. Назовем для краткости данный подход «оценкой по топливу». Он может быть применен в случае, если состав двигательной подсистемы определен из других соображений и не подлежит пересмотру.

Представляет интерес величина вклада в «цену» того или иного варианта компоновки КА массы дополнительного рабочего тела ДУК и топлива ДУОС, т. е. слагаемых в формуле (7). Так, для КА «Экспресс-АМ» оценки показывают, что доля массы топлива ДУ ориентации на компенсацию возмущающих моментов от двигателей коррекции составляет более 88 %. Иными словами, высокая тяговая эффективность двигателей коррекции на КА «Экспресс-АМ» получена за счет значительных затрат массы топлива ДУОС на компенсацию возмущающих моментов.

Рассмотрение возможных вариантов компоновки двигателей коррекции на КА типа «Экспресс-АМ», «SESAT». Представляет интерес вопрос о том, можно ли было добиться лучшей эффективности двигательной подсистемы, изменяя геометрический фактор размещения двигателей, например, применительно к изделиям типа «Экспресс-АМ», «SESAT». Проведем для этих изделий «оценку по топливу», изменяя угол установки двигателей коррекции наклона в плоскости YOZ с исходных ~ 5° до

30° с шагом 5°. Для каждого угла рассчитаем с помощью программного пакета Turbo-Design 4.0 [2], разработанного в МАИ, средние возмущающие моменты в области их минимальной величины на суточном интервале, а затем – массу топлива ДУ ориентации на их компенсацию и «добавку» рабочего тела ДУ коррекции для каждого угла установки двигателей по формуле (7).

Результаты расчетов представлены в табл. 1 и на рис. 2. Как следует из таблицы и графиков, при отвороте двигателей коррекции наклона от направления «север–юг» (ось Z) затраты топлива ДУ ориентации на компенсацию возмущающих моментов уменьшаются вследствие уменьшения силового воздействия струй двигателей на панели солнечных батарей, а затраты рабочего тела ДУ коррекции растут вследствие снижения эффективности приложения тяги. Оптимум достигается при угле установки двигателей около 25°. При таком угле преимущество по сравнению с исходным (базовым) вариантом за счет существенного снижения затрат топлива ДУ ориентации составляет около 13,5 кг. Полученный результат отражает тот факт, что для конкретной компоновки изделия может существовать наилучшее (по определенному критерию) размещение двигателей коррекции.

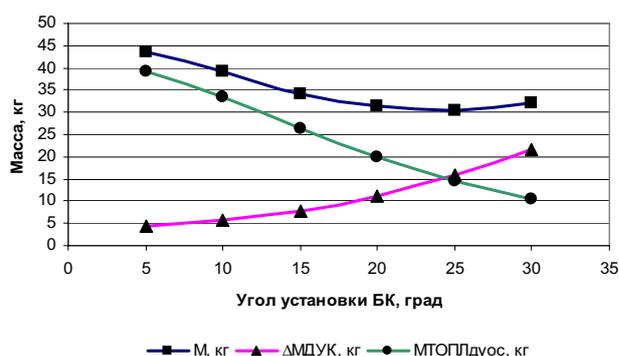


Рис. 2. Расчетное изменение массы рабочего тела ДУ коррекции и топлива ДУ ориентации на компенсацию возмущающих моментов в зависимости от угла установки двигателей коррекции наклона для изделий типа «Экспресс-АМ», «SESAT»

Формирование «цены» варианта размещения двигателей коррекции с учетом массы и количества конструктивных элементов двигательной подсистемы. Рассмотренный выше подход («оценка по топливу») подразумевает неизменность количества двигателей и их функционального разграничения по решаемым задачам (коррекция долготы и коррекция наклона). Однако, если расположить двигатели коррекции наклона таким образом, чтобы их составляющая тяги на ось «запад–восток» была достаточно ощутимой, например, под углами более 30°, то одни и те же двигатели можно использовать

Таблица 1

Угол установки БК 5°...8°	ΔMДУК, кг	Mтопл ДУОС, кг	M, кг
5	4,31	39,26	43,57
10	5,64	33,51	39,15
15	7,93	26,36	34,29
20	11,26	20,04	31,30
25	15,77	14,63	30,40
30	21,68	10,33	32,00

как для коррекции долготы, так и для коррекции наклона без уменьшения степени резервирования. В этом случае, в «цену» конкретного варианта компоновки двигателей было бы целесообразно включить не только массу топлива и рабочего тела, но и массу конструктивных элементов ДУ. Назовем условно такой подход «оценка по суммарной массе». Рассмотрим ниже подход к оптимизации размещения двигателей коррекции на объекте с учетом массы блоков коррекции и СПУ (системы преобразования и управления).

Для определенности сделаем следующие предположения:

1) все двигатели участвуют в выдаче тяги и по долготе и по наклонению, причем вырабатываемый суммарный импульс по наклонению и долготе равномерно распределен по двигателям;

2) баки в пределах своей вместимости допускают варьирование заправки, поэтому в первом приближении количество баков в системе можно принять неизменным и на этом основании исключить массу баков из рассмотрения.

Массу рабочего тела ДУ коррекции, необходимую для решения баллистической задачи (без учета незабора, утечек и т. д.), очевидно, можно оценить по формуле

$$M_{РТДУК} = \frac{I_{\Sigma H}}{I_{уд} n \cos \alpha_1} + \frac{I_{\Sigma H}}{I_{уд} n \cos \alpha_2} + \dots + \frac{I_{\Sigma H}}{I_{уд} n \cos \alpha_n} + \frac{I_{\Sigma Д}}{I_{уд} n \cos \beta_1} + \frac{I_{\Sigma Д}}{I_{уд} n \cos \beta_2} + \dots + \frac{I_{\Sigma Д}}{I_{уд} n \cos \beta_n} = \frac{I_{\Sigma H}}{I_{уд} n} \left( \sum_1^n \frac{1}{\cos \alpha_i} \right) + \frac{I_{\Sigma Д}}{I_{уд} n} \left( \sum_1^n \frac{1}{\cos \beta_i} \right), \quad (8)$$

где  $n$  – общее количество двигателей (блоков коррекции);  $\alpha_i$  – углы осей двигателей относительно оси «север–юг» ( $OZ$ );  $\beta_i$  – углы осей двигателей относительно оси «запад–восток» ( $OY$ );  $\alpha_i < 90^\circ$ ,  $\beta_i < 90^\circ$ . Отметим, что произвольные индивидуальные углы  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  в общем случае не дополняют друг друга до прямого или кратного ему углов, так как двигатели могут быть расположены вне плоскости  $ZOY$ .

С учетом сделанных предположений изменяемая часть массы ДУ коррекции будет определена выражением

$$\Delta M_{ДУК} = M_{СПУ} + nM_{БК} + M_{РТДУК}, \quad (9)$$

где  $M_{БК}$  – масса блока коррекции;  $M_{СПУ}$  – масса СПУ. Остальные составляющие определены выше.

Для полноты оценки для каждого варианта необходимо, как и ранее, оценить по изложенной выше методике (по формулам (3), (6)) затраты массы топлива ДУ ориентации для компенсации возмущающих моментов. Далее можно определить суммарную массу:

$$M = M_{СПУ} + nM_{БК} + M_{РТДУК} + M_{топлДУОС}. \quad (10)$$

По формуле (10) можно сравнивать между собой варианты со специализацией двигателей коррекции по назначению и варианты с универсальными двигателями. Очевидно, что наилучшим вариантом будет вариант с наименьшей массой изменяемой части ДУК и топлива ДУ ориентации, необходимого для компенсации возмущающих моментов.

Для примера определим «цену» варианта размещения 4-х универсальных двигателей коррекции в плоскости  $YOZ$  под углами  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  (рис. 3) к оси  $Z$  и сравним с исходным вариантом размещения 8-и специализированных двигателей на изделии «Экспресс-АМ» (использованные в расчетах средние возмущающие моменты для исходного варианта взяты из экспериментальных данных). Углы более  $45^\circ$  рассматривать не имеет смысла из-за больших потерь тяги двигателей коррекции наклона. Массу блока коррекции примем 5 кг, массу СПУ для управления 8-ю двигателями –  $2 \cdot 20 = 40$  кг, для управления 4-я двигателями –  $1 \cdot 20 = 20$  кг, остальные исходные данные для расчета идентичны изложенным выше.

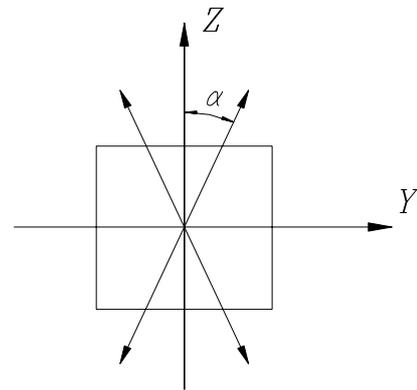


Рис. 3. Схема размещения двигателей с совмещением задач коррекции наклона и долготы

Результаты расчетов представлены в табл. 2 и на рис. 4.

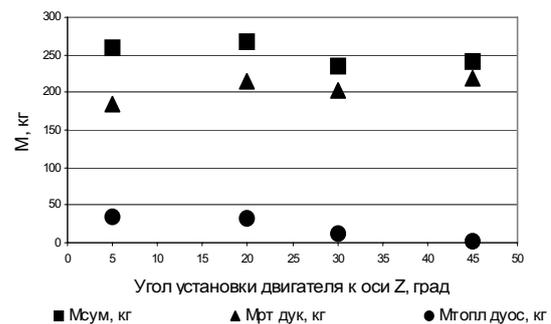


Рис. 4. Зависимость суммарной массы от угла установки двигателей

Таблица 2

Вариант компоновки	$nM_{БК}$ , кг	$M_{СПУ}$ , кг	$M_{РТДУК}$ , кг	$M_{топлДУОС}$ , кг (на компенс. В. М.)	$M_{\Sigma}$ , кг
Исходный (Э-АМ, 8 БК, угол установки двиг. корр. накл. к оси $Z - 5,75^\circ$ )	40	40	144,5	33,9	258,4
4 БК, $\alpha = 20^\circ \beta = 70^\circ$	20	20	195,6	32,6	268,2
4 БК, $\alpha = 30^\circ \beta = 60^\circ$	20	20	182,9	12,9	235,8
4 БК, $\alpha = 45^\circ \beta = 45^\circ$	20	20	198,2	3,0	241,2

При малых углах отклонения двигателей от оси  $Z$  эффективность приложения тяги по долготе низка, а уменьшение затрат топлива ДУОС на компенсацию моментов невелико, поэтому суммарная масса увеличивается по сравнению даже с исходным вариантом (рис. 4). При увеличении угла отклонения до  $30^\circ$  эффективность тяги по наклонению (по оси  $Z$ ) остается еще достаточной (87 % от идеальной), а эффективность тяги по долготе становится уже приемлемой (50 %), затраты топлива на компенсацию моментов заметно уменьшаются. При дальнейшем увеличении угла отклонения до  $45^\circ$  эффективность приложения тяги по наклонению падает до 70 %, и этот фактор перевешивает повышение эффективности тяги по долготе и уменьшение запаса топлива на компенсацию возмущающих моментов. Таким образом, при компоновке с «универсальным» назначением двигателей применительно к изделию типа «Экспресс-АМ», оптимальным является размещение двигателей в плоскости  $YOZ$  под углом примерно  $30^\circ$  к оси  $Z$ . При таком размещении наблюдается наилучший баланс между эффективностью тяги по наклонению и долготе, относительно невелики затраты топлива на компенсацию возмущающих моментов. За счет сокращения количества двигателей и массы СПУ достигается заметное преимущество (22–23 кг) в сравнении с базовым вариантом с 8-ю специализированными двигателями. С учетом уменьшения мас-

сы кабелей (~18 кг) и конструктивных элементов для размещения блоков коррекции на корпусе КА (~7 кг) преимущество может достигать ощутимой величины 47–48 кг.

Предложены и рассмотрены критерии эффективности размещения двигателей коррекции орбиты на геостационарных КА (оценка «по топливу», оценка «по суммарной массе»). Указанные критерии весьма наглядны и позволяют с приемлемыми трудозатратами сравнивать между собой различные варианты компоновки как для случая специализации двигателей по выполняемой задаче, так для случая универсального назначения двигателей. Получаемое с помощью оптимизации по предложенным критериям преимущество в массе, по сравнению с базовым вариантом, может составлять величину порядка 47–48 кг.

#### Библиографические ссылки

1. Effects of interaction of electric thruster jets and spacecraft solar batteries / M. P. Burgasov, A. B. Nadiradzer, A. A. Chirov [at al.] // European Space Power Conference ; Graz, Austria. 23–27 Aug. 1993. (ESA WPP-054, Aug. 1993).
2. Разработка и поставка пакета прикладных программ для расчета воздействия струй СПД и ТКД на элементы КА : отчет о НИР. Тема № 208-97040. Моск. гос. авиационный ин-т. М., 2001.

Yu. M. Yermoshkin, V. M. Urusov

### CRITERIA OF ORBITAL CONTROL THRUSTER OPTIMAL ALLOCATION ON BOARD OF GEOSTATIONARY SPACECRAFT

*During designing of new, especially long-life geostationary spacecrafts we face a problem of rational orbital control thruster allocation. In this paper we consider the possible criteria for solution of such problem and the results of their application.*

*Keywords: spacecraft, thruster, propulsion, fuel, working body.*

© Ермошкин Ю. М., Урусов В. М., 2011

УДК 629.76.78.015

И. Н. Карцан, В. С. Пономарев, Е. С. Жукова, С. В. Литошик

### АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ПЕРВИЧНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ\*

*Анализируются астрономические источники первичной навигационной информации для автономного определения движения объектов.*

*Ключевые слова: зенитное расстояние звезды, сжатие земного сфероида, вектор напряженности.*

Астрономические источники ПНП, а также методы и средства решения задачи навигации в космосе, основанные на использовании этой информации, в значительной степени определяют успех выполнения всех задач, кото-

\* Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России» на 2009–2013 гг. ГК № 14.740.11.0329 от 17.02.2010 г.