

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ И ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОРБИТЕ

Владимир Алексеевич ОБУХОВ родился в 1940 г. в городе Москве. Заместитель директора НИИ прикладной механики и электродинамики (НИИПМЭ). Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Основные научные интересы — в области электрических ракетных двигателей и их применения. Автор более 130 научных работ.

Vladimir A. OBUKHOV, Ph. D., was born in 1940, in Moscow. He is currently the Vice-Director at Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics (RIAME). His major research interests are in the electrical rocket engines and their applications. He has published more than 130 technical papers.

Александр Иванович ПОКРЫШКИН родился в 1953 г. в городе Сваляве Закарпатской области. Начальник лаборатории НИИ прикладной механики и электродинамики (НИИПМЭ). Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Основные научные интересы — в области динамики, баллистики, управления полетом летательных аппаратов. Автор более 120 научных работ.

Alexander I. POKRYSHKIN, Ph. D., was born in 1953, in the Transcarpathian Region. He is currently the Head of a Laboratory at Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of Moscow Aviation Institute (RIAME MAI). His major research interests are in the flight dynamics, ballistics and flight control. He has published over 120 technical papers.

Гарри Алексеевич ПОПОВ родился в 1934 г. в городе Москве. Директор НИИ прикладной механики и электродинамики (НИИПМЭ). Член-корреспондент РАН. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области электрических ракетных двигателей и их применения. Автор более 160 научных работ.

Garry A. POPOV, D.Sci., was born in 1934, in Moscow. He is currently the Director at Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics (RIAME). He is a Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences. His major research interests are in the electrical rocket engines and their applications. He has published more than 160 technical papers.

Наталья Викторовна ЯШИНА родилась в городе Москве. Старший научный сотрудник НИЦ «Поколение» МАИ. Основные научные интересы — в области динамики и управления полетом летательных аппаратов. Автор более 40 научных работ.

Natalia V. YASHINA, was born in Moscow. She is currently a Senior Research Associate at the «Generation» Research Center of Moscow Aviation Institute. Her major research interests are in flight dynamics, ballistics and flight control. She has published over 40 technical papers.

Рассматривается проблема управления движением и ориентацией космического аппарата на высокоэллиптической орбите с помощью электроракетного двигателя. Предложена структура электроракетной двигательной установки, в которой двигатели являются поворотными с изменяемой тягой и расположены по схеме «звезда», т.е. двигатели располагаются равномерно в одной плоскости, а номинальные направления тяг двигателей пересекают ось инерции КА, ортогональную этой плоскости. Управление КА с помощью предложенной двигательной установки позволяет повысить эффективность использования энергетических ресурсов КА: более полно использовать мощность солнечной батареи, а также экономно расходовать запас рабочего тела.

Введение

Система управления движением космического аппарата (КА) на высокоэллиптической орбите (ВЭО) должна решать две основные динамические задачи: поддержание расчетных параметров орбиты КА и обеспечение требуемой ориентации КА.

В качестве исполнительных органов системы управления КА на высокоэллиптической орбите це-

лесообразно использовать электроракетные двигательные установки (ЭРДУ), например стационарные плазменные двигатели (СПД). Электроракетные двигатели (ЭРД) обладают высоким удельным импульсом, что позволяет уменьшить массу рабочего тела по сравнению с химическими двигателями, а следовательно, увеличить массу полезной нагрузки КА.

Однако применение ЭРД требует оснащения КА дополнительными солнечными батареями (СБ) для питания двигателей. Это осложняет решение проблем управления КА, так как, кроме ориентации, связанной с выполнением целевой задачи, появляется необходимость отслеживания ориентации СБ на Солнце.

В работах [1, 2] были рассмотрены вопросы поддержания высокоэллиптических орбит КА, входящих в состав группировки, и расчета необходимых для этого корректирующих импульсов.

В данной работе рассматриваются вопросы формирования структуры двигательной установки, способной реализовать предложенные в работах [1, 2] алгоритмы коррекции орбит КА. Предполагается также, что продольная ось КА должна быть направлена к центру Земли.

Для такого КА задача ориентации должна решаться с учетом той особенности, что, помимо обеспечения направления продольной оси КА к центру Земли, панели солнечной батареи (ПСБ) должны быть направлены на Солнце, чтобы обеспечить необходимой электрической мощностью служебные системы, целевую аппаратуру КА и ЭРДУ во время работы последней.

В большинстве случаев предъявляются достаточно высокие требования по точности ориентации ПСБ на Солнце. Для поддержания необходимой (как правило, высокоточной) ориентации КА целесообразно использовать маховики, а с помощью ЭРДУ осуществлять разгрузку инерциальной системы ориентации.

Использование ЭРДУ для непосредственного применения в качестве исполнительных органов системы ориентации КА в этом случае нецелесообразно, так как для достижения указанной цели необходимо создавать малые импульсы тяги при частом включении двигателей, что для большинства ЭРДУ является трудновыполнимой задачей.

Обычно ось вращения ПСБ располагается перпендикулярно продольной оси КА. Ориентация ПСБ на Солнце состоит из двух операций: разворот КА относительно продольной оси КА и поворот ПСБ относительно собственной оси. Такая схема разворотов, как известно, в некоторых ситуациях приводит к большим угловым скоростям и угловым ускорениям, необходимым для точной ориентации ПСБ на Солнце, что следует учитывать при решении конкретных задач.

Опыт использования ЭРД на ГСО

Задача коррекции и поддержания орбиты КА с помощью ЭРД решается на геостационарных орбитах (ГСО) уже около 25 лет. Если на первых КА

использовались всего 2 ЭРД, то в настоящее время реально существуют и проектируются КА, на которых задействованы 8 двигателей. Общими особенностями систем управления на ГСО являются использование маховиков для поддержания точной ориентации КА; расположение оси панелей СБ перпендикулярно плоскости орбиты, формирование корректирующих воздействий двигательной установки в четырех направлениях.

В качестве недостатка следует отметить потери мощности СБ до 8%, а также неэффективность использования тяги в схемах, когда двигатели устанавливаются под углом 45° к направлению корректирующего воздействия, потери тяги при этом составляют $\sim 30\%$ (геометрическая эффективность использования тяги 0,7).

Указанные недостатки не столь существенны в случае применения ЭРД на ГСО, поскольку даже при недостаточно рациональной схеме установки двигателей экономия массы рабочего тела при замене ЖРД на ЭРД в системах коррекции весьма существенна.

Особенности использования ЭРД для коррекции ВЭО

Опыт использования ЭРДУ на борту КА для коррекции ВЭО в настоящий момент весьма ограничен. Ввиду более сложного углового движения КА с ЭРДУ на ВЭО по сравнению с КА на ГСО прямое использование опыта расположения и работы ЭРДУ на ГСО для ВЭО не представляется возможным.

В то время как на ГСО угол между направлением на Солнце и плоскостью орбиты не превышает 23° , для высокоэллиптической орбиты с наклоном $\sim 64^\circ$ угол между направлением на Солнце и плоскостью орбиты будет лежать в пределах $\pm 87^\circ$. Таким образом, для обеспечения ориентации на Солнце ось ПСБ может быть повернута относительно плоскости орбиты на угол $\pm 87^\circ$, т.е. ориентирована в горизонтальной плоскости практически в любом направлении.

Согласно работам [1, 2], корректирующие воздействия создаются двигателями малой тяги, тяга которых может быть направлена в трансверсальном или бинормальном направлении (рис. 1).

Включение двигателей малой тяги может происходить до четырех раз на одном витке: в окрестности апсидальных точек орбиты и в окрестности точек орбиты, где эксцентрическая аномалия E равна $\pm 90^\circ$ (рис. 2).

С учетом вышесказанного можно сделать следующий основной вывод: для коррекции КА ЭРДУ должна создавать тягу в любом направлении, лежа-

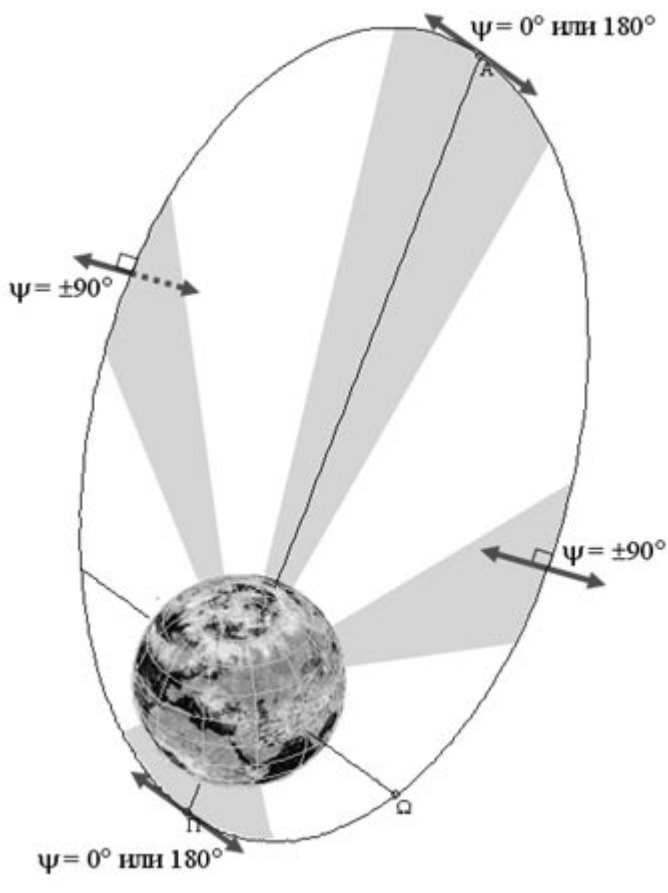


Рис. 1. Ориентация вектора тяги на активных участках

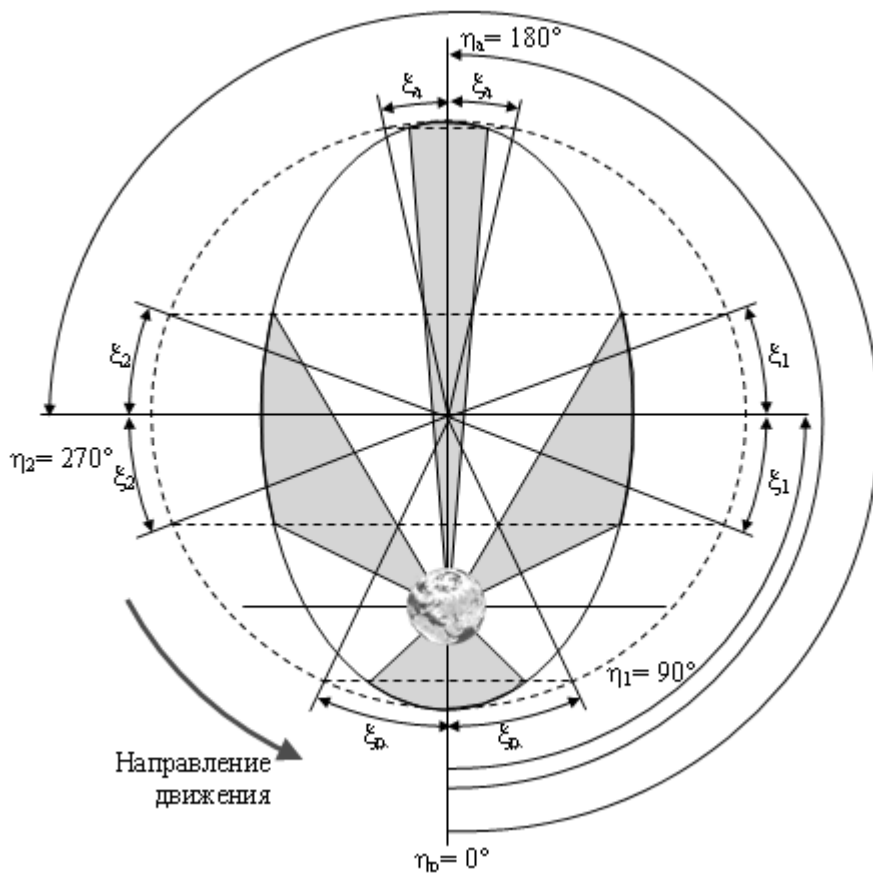


Рис. 2. Схема расположения активных участков на витке

шем в плоскости, ортогональной продольной оси КА. Отметим, что ЭРДУ, применяемые в настоящее время на ГСО, такой возможностью не обладают.

Другой особенностью КА с ЭРДУ на ВЭО является наличие больших угловых скоростей разворота продольной оси КА в плоскости орбиты в районе перигея и районах восходящего и нисходящего узлов орбиты. Для КА на ГСО угловая скорость разворота продольной оси КА в плоскости орбиты практически постоянна и составляет $0,72 \cdot 10^{-4}$ рад/с.

Для 12-часовой орбиты с высотой перигея порядка 1000 км угловые скорости разворота продольной оси КА в районе перигея, восходящего узла орбиты и апогея соответственно составляют:

$11,8 \cdot 10^{-4}$ рад/с; $4,05 \cdot 10^{-4}$ рад/с; $0,36 \cdot 10^{-4}$ рад/с.

В районе перигея за 300 с полета продольная ось КА повернется на 20° , а за 600 с — на 40° . Разворот продольной оси КА приведет к необходимости разворота КА вокруг продольной оси для переориентации ПСБ в пространстве. Это означает, что, в случае относительно длительной коррекции орбиты в районе перигея и узлов орбиты для отслеживания ориентации ПСБ на Солнце, КА должен будет разворачиваться вокруг продольной оси на значительные углы, а для сохранения направления корректирующего импульса относительно плоскости орбиты ЭРДУ должна изменить направление тяги относительно КА в плоскости, ортогональной продольной оси КА. Интенсивность разворота КА относительно продольной оси существенно зависит от расположения Солнца относительно плоскости ВЭО.

Требования к ЭРДУ для управления на ВЭО

Таким образом, при формировании структуры электроракетной двигательной установки для решения задач управления движением центра масс (ц.м.) и ориентации космического аппарата на ВЭО необходимо обеспечить:

- создание корректирующих импульсов в любом направлении в плоскости, ортогональной продольной оси КА;
- изменение направления тяги ЭРД относительно КА во время коррекции орбиты;
- создание управляющих моментов по всем трем осям для обеспечения разгрузки инерциальной системы ориентации.

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод о том, что на высокоэллиптической орбите целесообразно размещать двигатели, в некотором смысле, «равномерно» относительно продольной оси КА. Двигатели при этом должны иметь возмож-

ность поворачиваться относительно двух осей для изменения направления тяги и создания моментов разгрузки инерциальной системы ориентации.

Ось ПСБ, как правило, пересекает продольную ось КА, поэтому количество двигателей должно быть четное: 6, 8, 10, ... Конкретное число двигателей должно быть выбрано из условия эффективности функционирования системы в целом. Ниже рассматривается структура ЭРДУ, включающая 6 двигателей, работающих на двух режимах тяги.

Схема размещения ЭРД на КА для коррекции ВЭО (схема «звезда»)

Предлагаемая ниже структура ЭРДУ для решения задач управления движением ц.м. и ориентации КА на высокоэллиптической орбите основана на следующих принципах:

- для коррекции орбиты предлагается использовать 6 ЭРД;
- ЭРД располагаются в плоскости, ортогональной продольной оси КА и находящейся вблизи центра масс КА;
- направления векторов тяги КА пересекают продольную ось КА и равномерно распределены по направлениям (через 60°) симметрично относительно плоскости, включающей продольную ось КА и ось ПСБ;
- каждый двигатель крепится в двухступенном карданном подвесе;
- двигатели могут работать в двух режимах: 100%-ной тяги и 50%-ной тяги. При работе с тягой в 50% от номинала потребляемая мощность в 2 раза меньше номинальной.

Схема расположения ЭРД приведена на рис. 3.

Расположение ЭРД в одной плоскости и их равномерное распределение по направлениям диктуется, как уже было сказано выше, необходимостью создания корректирующей тяги практически в любом направлении, лежащем в плоскости, ортогональной продольной оси КА. В качестве прототипа такого расположения двигателей можно рассматривать КА серии «Экспресс», однако принципиальными отличиями предлагаемой схемы являются равномерное распределение ЭРД по направлению тяги, наличие двухступенных карданных подвесов, а также работа ЭРД в двух режимах (100% и 50% тяги).

Выбор номинального направления тяги двигателей через центр масс КА обусловлен желанием повысить надежность системы управления при выходе из строя одного из ЭРД.

В настоящее время имеются проработки двухступенных карданных подвесов для ЭРД типа СПД, позволяющих разворачивать двигатели на

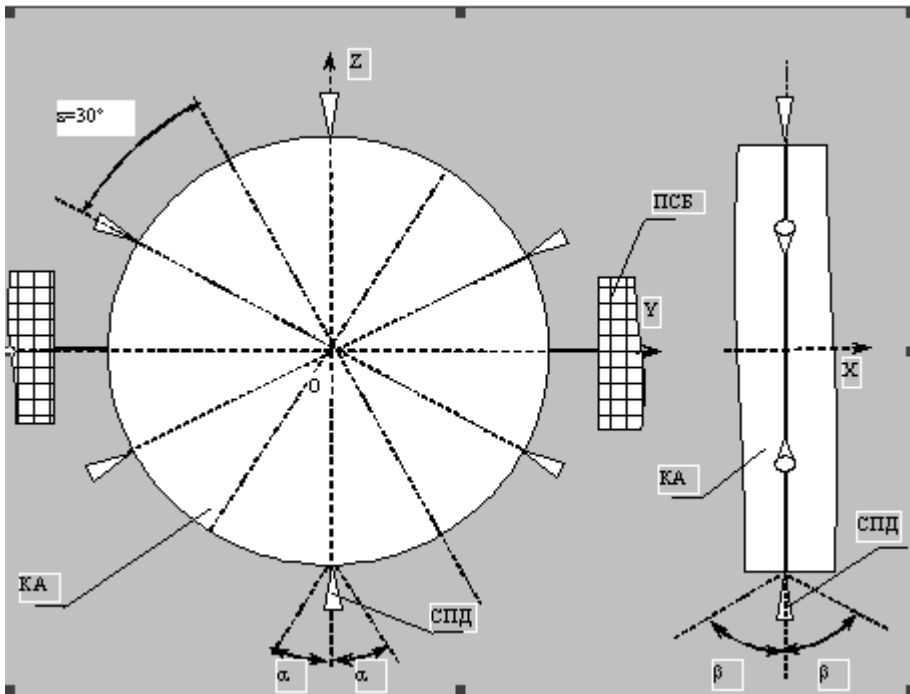


Рис. 3. Схема размещения ЭРД на КА (схема «звезда»)

углы до 45° в двух направлениях. Наличие поворотных двигателей снимает практически все проблемы по точности управления направлением вектора тяги при коррекции орбиты, а также проблемы, связанные с разгрузкой инерциальной системы ориентации. Следует учитывать, что углы поворота двигателей реализуются дискретно с некоторым достаточно малым шагом.

Регулирование тяги двигателя позволяет расширить возможности предлагаемой структуры ЭРДУ. Для иллюстрации рассмотрены СПД с двумя режимами тяги (100 и 50%). Использование этих режимов для коррекции ВЭО позволяет при заданной мощности включать одновременно несколько ЭРД и тем самым, с одной стороны, увеличить количество комбинаций включения двигателей, а с другой стороны, более гибко компенсировать работу системы управления при выходе из строя одного из двигателей.

Особенности предлагаемой структуры ЭРДУ

Предлагаемая структура ЭРДУ обладает рядом особенностей, которые будут рассмотрены ниже.

Расположение и направление тяги

Прежде всего, это равномерное расположение по схеме «звезда» в одной плоскости двигателей, номинальные направления тяг которых пересекают ось инерции КА, ортогональную этой плоскости. Такая схема, с учетом возможности одновременной работы двух двигателей, позволяет реали-

зовать вектор корректирующего импульса по 12 направлениям относительно КА с дискретностью $\epsilon = 30^\circ$: 6 вдоль направлений векторов тяги одного из двигателей и 6 вдоль средних направлений тяг двух соседних двигателей.

Для реализации необходимого направления корректирующего импульса в пространстве достаточно повернуть КА относительно продольной оси КА на угол не более 15° . При этом потеря мощности солнечной энергии из-за поворота ПСБ относительно оптимальной ориентации на Солнце составит не более 4,3% (в предположении, что коэффициент отражения поверхности ПСБ равен 1).

При работе одного двигателя тяга создается в направлении, близком к номинальной ориентации работающего двигателя (имеется в виду создание одновременно корректирующей тяги и управляющих моментов, рис. 4).

При работе двух соседних двигателей результирующая тяга будет направлена по среднему направлению тяг этих двигателей (рис. 5). Если двигатели не поворачивать, то номинальная геометрическая эффективность результирующей тяги составит $0,866 = \cos 30^\circ$, т.е. потери тяги составят не более 13,4%.

Как отмечалось выше, в схемах, когда двигатели устанавливаются в четырех ортогональных направлениях, эффективность тяги при работающих двух соседних двигателях составляет 0,7, потери около 30%.

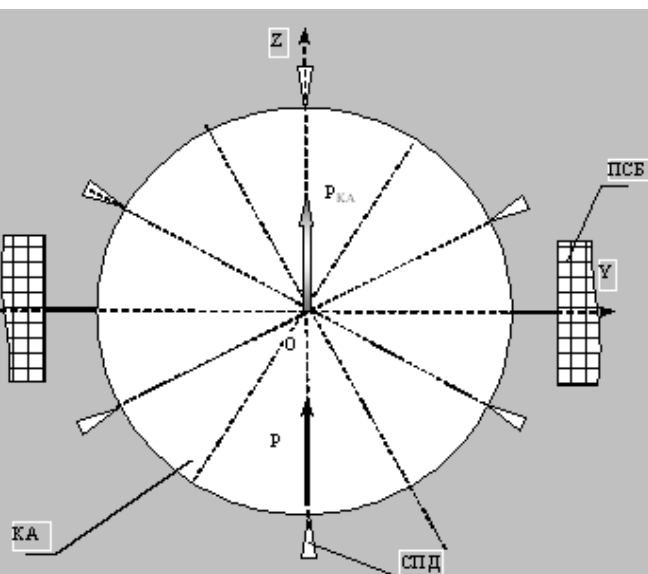


Рис. 4. Создание тяги ЭРДУ одним двигателем вдоль номинального направления тяги одного из двигателей

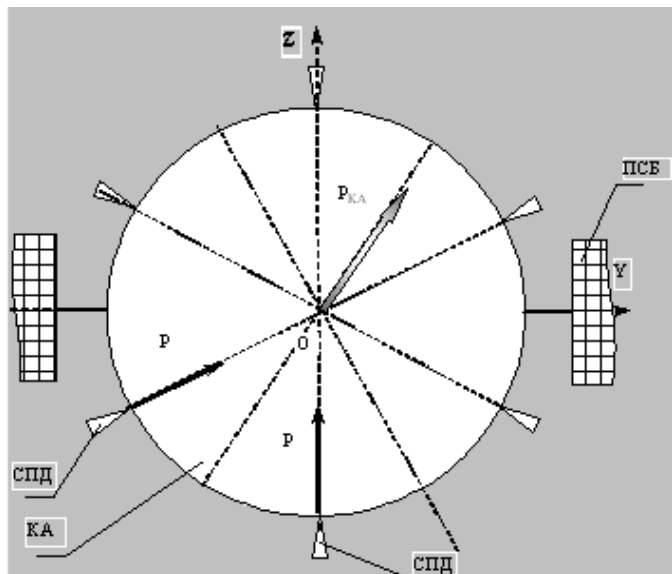


Рис. 5. Создание тяги ЭРДУ двумя соседними двигателями, создающими тягу в номинальном направлении

Поворотные двигатели

Другая особенность, наличие поворотных в двух плоскостях ЭРД, позволяет свести потери тяги при работе двух двигателей к нулю. Для этого достаточно повернуть двигатели на 30° навстречу друг к другу (рис. 6).

Кроме того, возможность поворота двигателей полностью решает проблему разгрузки маховиков. Разгрузку маховиков можно совмещать с проведением коррекции орбиты за счет небольших отклонений направления тяг ЭРД относительно номинальных (рис. 7). При повороте ЭРД на 10° относительно номинального направления геометрические потери использования тяги составляют всего 1,5%.

Если использовать СПД-70 с тягой 0,04 Н, то при расположении двигателей на расстоянии 1 м от

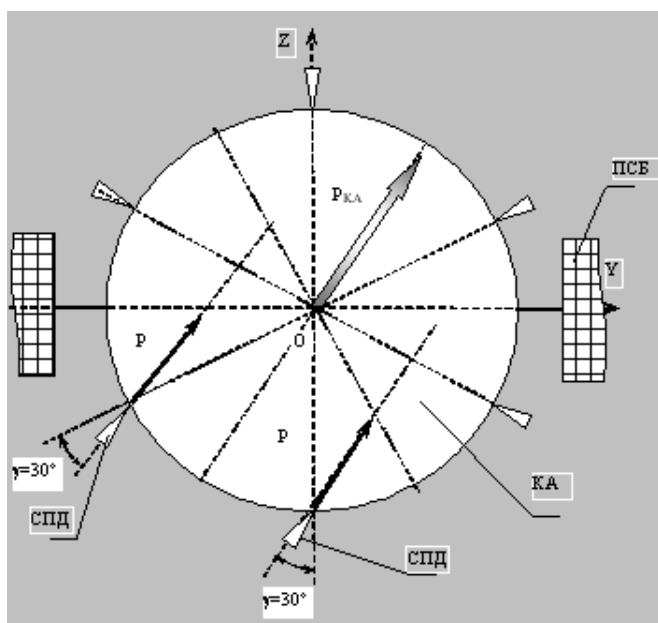


Рис. 6. Создание тяги ЭРДУ двумя соседними двигателями с поворотом двигателей

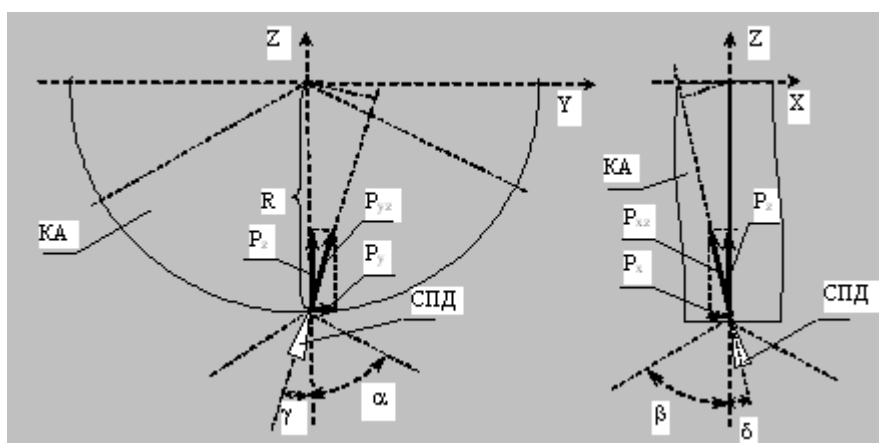


Рис. 7. Создание управляющего момента при отклонении двигателя

главной оси инерции, ортогональной установочной плоскости, поворот на 10° позволит получить момент от одного двигателя, равный $0,007 \text{ Н}\cdot\text{м}$, что примерно в два раза больше, чем моменты, создаваемые двигателями КА «Ямал».

Если проводить разгрузку инерциальной системы ориентации в моменты времени, не совпадающие с коррекцией орбиты, то для создания управляющего момента можно использовать два противоположно расположенных двигателя, работающих в режиме 50% тяги. Двигатели при этом можно отклонять на углы порядка 30° (рис. 8).

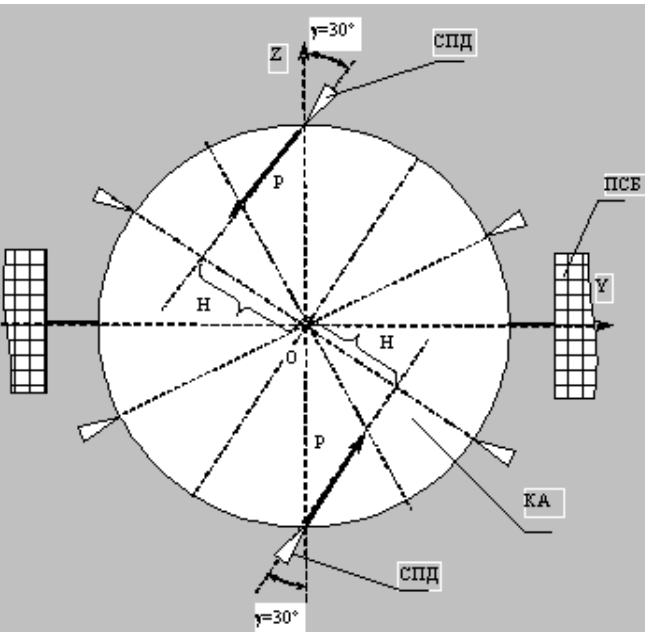


Рис. 8. Создание управляющего момента при нулевой тяге ЭРДУ

Следует отметить, что при коррекции орбиты с одновременной разгрузкой инерциальной системы ориентации направление тяг работающих двигателей могут быть произвольными и отличаться от их номинальных направлений.

Разнотяговость

Использование двух режимов тяги на 100% и на 50% позволяет более полно использовать имеющуюся на борту КА энергетику. Если энергии хватает на работу только одного двигателя, то при включении двух двигателей для создания тяги в промежуточных направлениях их следует включать в режиме 50% мощности.

Если мощности хватает для работы двух двигателей, то при создании тяги в промежуточном направлении два двигателя можно включить на полную мощность, а при создании тяги в направлении тяги одного из двигателей можно использовать три двигателя, один — в номинальном направлении на

полную мощность, а два соседних — на 50% мощности. Если использовать поворот соседних двигателей на 60° , то потери тяги не будет (рис. 9).

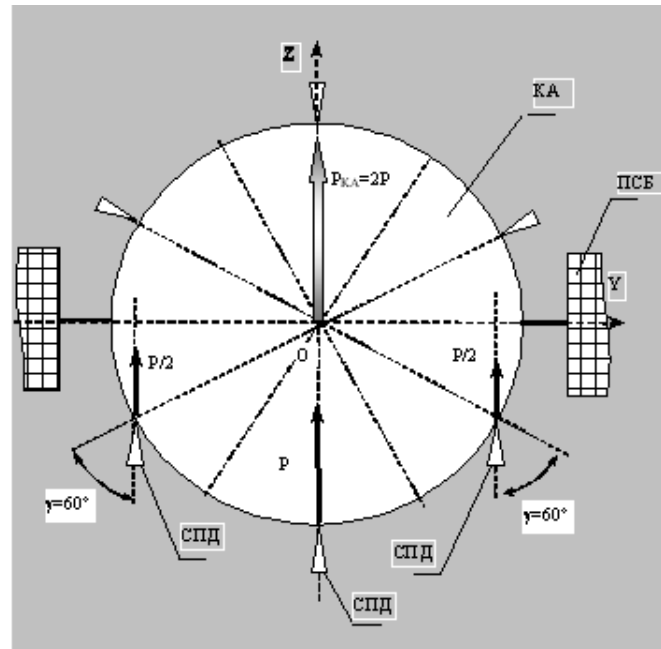


Рис. 9. Создание тяги ЭРДУ с помощью трех двигателей, при наличии мощности, достаточной для работы двух двигателей

Как уже отмечалось выше, для реализации необходимого направления корректирующей тяги в пространстве необходимо в начальный момент времени повернуть КА относительно продольной оси на угол не более 15° . Если процесс коррекции орбиты длительный и для отслеживания ориентации ПСБ на Солнце требуется изменение ориентации КА по углу крена, то разворот по крену следует осуществлять дискретно, путем последовательных разворотов КА относительно продольной оси на 30° и изменения при этом состава работающих двигателей.

Резервирование

Предлагаемая схема расположения ЭРД обладает высокой надежностью. Если по тем или иным причинам тягу необходимо создать в направлении вышедшего из строя ЭРД, то эту задачу можно решать с помощью соседних двигателей (рис. 10), хотя при этом эффективность результирующей тяги, может быть, и снизится. Поскольку номинальный относительный угол между направлениями тяг соседних с вышедшим из строя ЭРД составляет 120° , то эффективность результирующей тяги без поворота двигателей будет не ниже $0,5 = \cos 60^\circ$.

Если ПСБ не мешают повороту двигателей на 60° (рис. 11), то потери результирующей тяги не будет.

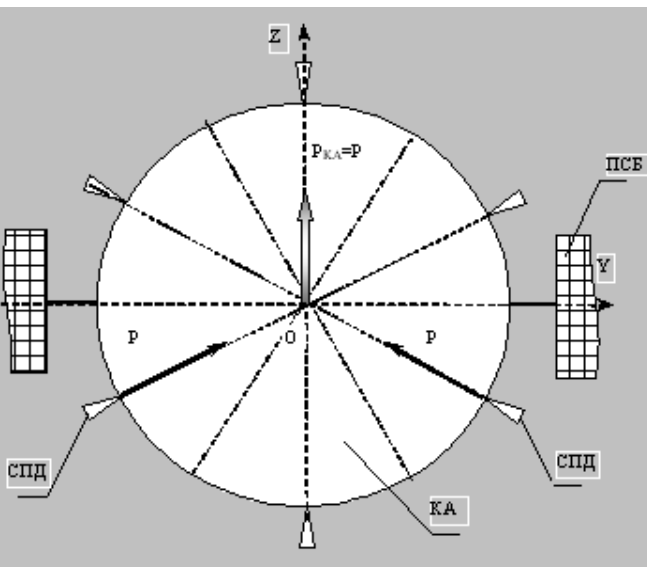


Рис. 10. Резервирование работы вышедшего из строя двигателя за счет включения соседних двигателей

Использование предлагаемой структуры ЭРДУ

Предлагаемая структура электроракетной двигательной установки может быть эффективно использована для решения задач управления движением центра масс и ориентацией космического аппарата на высокоэллиптической орбите. Принципиально эта схема могла бы быть использована также и на ГСО. Следует отметить, что реализация предлагаемой структуры ЭРДУ требует наличия надежных двухступенных карданных подвесов для ЭРД.

Наличие ПСБ накладывает ограничения на углы поворота ЭРД, расположенных вблизи оси ПСБ, поскольку при повороте струя двигателя может попасть на ПСБ. Уменьшить эти ограничения можно за счет выбора соответствующей геометрии ПСБ, расположения оси ПСБ на некотором расстоянии от плоскости установки ЭРД, уменьшения количества двигателей или использования пространственного отклонения направления тяги двигателей в сторону от оси ПСБ.

Выводы

Рассмотрена структура ЭРДУ, в которой двигатели являются поворотными и расположены по схеме «звезда» равномерно в одной плоскости, а номинальные направления тяг двигателей пересекают ось инерции КА, ортогональную этой плоскости.

Предлагаемая структура ЭРДУ позволяет одновременно эффективно решать задачи коррекции высокоэллиптической орбиты и управления ориентацией КА.

Структура позволяет увеличить дискретность возможных направлений тяги, создаваемых двигательной установкой, увеличить эффективность ис-

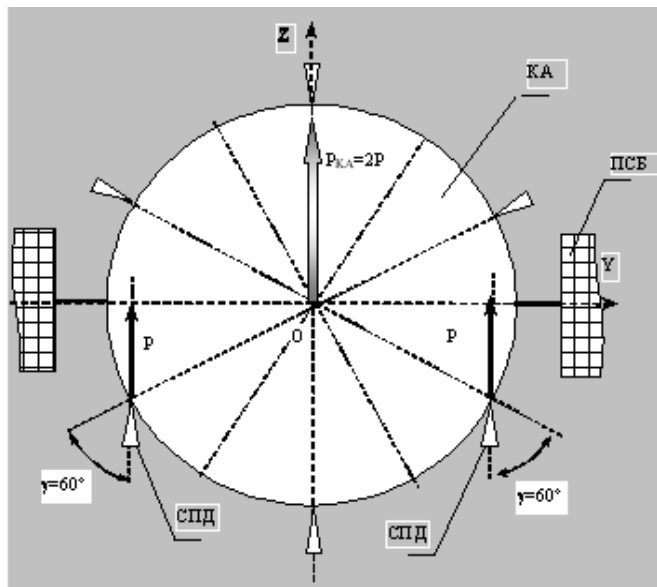


Рис. 11. Резервирование работы вышедшего из строя двигателя за счет включения соседних двигателей с поворотом

пользования тяги и повысить надежность двигательной установки в целом.

Summary

An electrical rocket propulsion system structure is proposed with rotating thrusters. The thrusters have star-like arrangement. They are located uniformly in the same plane while nominal directions of their thrusts cross the spacecraft inertia axis which is orthogonal to this plane. The suggested propulsion system structure allows to solve efficiently such problems as high elliptic orbit correction and spacecraft attitude control. The system ensures to enhance spacecraft energy efficiency by means of more comprehensive using of solar cell panel power and more saving consumption of fuel.

Библиографический список

1. *Konstantinov M.S., Obukhov V.A., Petukhov V.G., Popov G.A., Tchernobelsky G.G.* Spacecraft station-keeping in the Molniya orbit using electric propulsion, 56th International Astronautical Congress, 2005, IAC-05-C1.1.01
2. *Konstantinov M.S., Murashko V.M., Obukhov V.A., Petukhov V.G., Popov G.A., Tchernobelsky G.G.* Application of stationary plasma thrusters for the multispacecraft constellation deployment and maintenance, 56th International Astronautical Congress, 2005, IAC-05-C4.4.03

Работа выполнена в ФГНУ НИИПМЭ при поддержке РФФИ (проект 07-08-13548-офи_ц).

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 12.09.2007