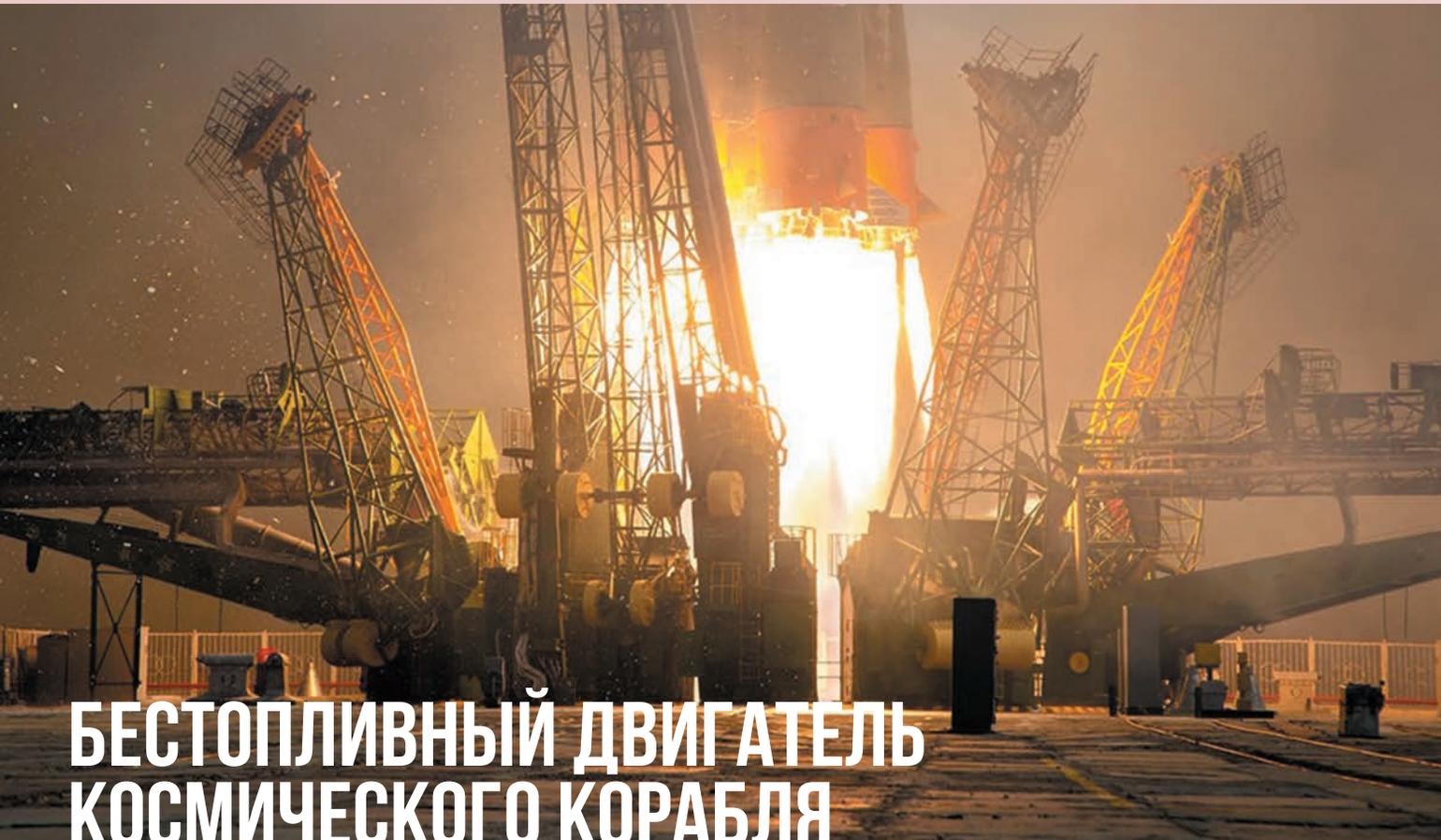


# ИСПОЛЬЗУЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ



## БЕСТОПЛИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ

Существующая напряженность магнитного поля Земли позволяет получить сравнительно небольшие моменты сил, которые, однако, могут действовать продолжительное время, воздействуя на летательный аппарат в космическом пространстве. Магнитная система обладает тем преимуществом, что она не требует расхода рабочего тела, что особенно важно для малогабаритных недорогих спутников, связанных множеством ограничений. Кроме того, отсутствие подвижных частей значительно повышает надежность, а следовательно, и продолжительность активного функционирования такого аппарата.

**Р**азвитие космодинамики и возникновение в связи с этим новых направлений в науке и технике продолжают вызывать повышенный интерес исследователей к решению задач, тесно примыкающих к классической задаче механики о положении твердого тела относительно точки. Одной из таких задач является управление угловым дви-

жением искусственного спутника Земли (ИСЗ), т. е. вращательным движением ИСЗ относительно его центра масс. Решение этой актуальной задачи неизбежно сталкивается с необходимостью учета разнообразных по своей природе сил и моментов, действующих на ИСЗ в околоземном пространстве (гравитационных, аэродинамических, электромагнитных и др.).

### СПУТНИКИ МАЛЫЕ, НО ТРЕБОВАНИЯ БОЛЬШИЕ

Увеличение доли малых спутников в общем числе запускаемых на орбиту космических аппаратов стимулирует создание новых систем управления движением с минимальным или даже нулевым потреблением топлива и/или электрической энергии. Исполнительные органы таких систем управления

Автор — Николай Макаренко

**Для аппаратов, двигательная установка которых работает на участке выведения, выбранный способ ускорения должен обеспечить преодоление земного притяжения — придать аппарату первую космическую скорость, которая для Земли составляет около 7,9 км/с. Соответственно, для этого необходима высокая мощность химического реактивного двигателя**

должны быть компактными и легкими, чтобы удовлетворять весьма жестким требованиям на допустимые габариты и массу, предъявляемым к малым аппаратам. В связи с этими существенными и зачастую противоречащими друг другу ограничениями резонно возникает вопрос обеспечения должной степени функциональности в управлении орбитальным и угловым движением ИСЗ. Скажем, если для управления ориентацией малого спутника используется простая система пассивной одноосной стабилизации, то в силу необходимости идентификации вектора тяги не более двух маршевых двигателей могут быть установлены вдоль единственной стабилизированной оси. В результате этого направление вектора тяги оказывается в каждый момент времени заданным (подобный тип управления называется одноосным), что потенциально сокращает возможности орбитального маневрирования.

Чтобы расширить функциональность экономичных систем управления движением, и в том числе приспособить их к задаче деорбитинга, интенсивно разрабатываются и тестируются новые технические решения, позволяющие максимально эффективно использовать естественные внешние силы и, как следствие, отказаться от тяги реактивных двигателей.

## ДВИГАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Основная задача двигательной установки — изменять скорость или положение космического аппарата. Поскольку требуемая для этого энергия зависит от массы аппарата, конструкторы используют понятие импульса, равного произведению массы на скорость. Таким образом, двигательная установка изменяет импульс космического аппарата.

**При движении вокруг планеты воздействие двигательной установки требуется для изменения орбиты полета и для корректировки положения ИСЗ для обеспечения максимальной освещенности солнечных батарей, направленности антенн и систем наблюдения**



Для аппаратов, двигательная установка которых работает на участке выведения, выбранный способ ускорения должен обеспечить преодоление земного притяжения — придать аппарату первую космическую скорость, которая для Земли составляет около 7,9 км/с, соответственно, для этого необходима высокая мощность химического реактивного двигателя.

При движении вокруг планеты воздействие двигательной установки требуется для изменения орбиты полета и для корректировки положения ИСЗ с целью обеспечения максимальной освещенности солнечных батарей, направленности антенн и систем наблюдения. Это может быть обеспечено короткими периодами включения двигательной установки при больших ускорениях либо длительными периодами включения с малыми ускорениями. При этом второй метод мало пригоден для выведения аппарата в космос, так как при этом требуются непомерные затраты энергии на пре-

одоление планетарной гравитации, а вот в космосе — вполне приемлем.

В орбитальном полете могут проводиться маневры, связанные как с использованием аппарата по назначению, так и вызванные технической необходимостью, например в случае уклонения от других объектов. После исчерпания возможностей маневра период активной жизни аппарата считается завершенным.

В целом двигательная установка космического аппарата — это система, обеспечивающая его ускорение, преобразуя различные виды энергии в механическую. При этом могут отличаться как источники энергии, так и сами способы преобразования; каждый способ имеет свои преимущества и недостатки, их исследования и поиск новых вариантов продолжаются по сей день.

Наиболее распространенный тип двигательной установки космического аппарата — химический ракетный двигатель, в котором газ с высокой ско-



Согласно анализу приведенных FCC цифр относительно времени жизни спутников SpaceX (система Starlink) на орбите Земли, через шесть лет после запуска в среднем на Землю будут падать пять спутников в день. У многих — ненулевой шанс оставить по себе память в виде несгоревшего обломка, который достигнет поверхности планеты, поскольку такие обломки могут и убивать, вероятность этого — 45 % на каждые шесть лет

ростью истекает из сопла Лавала. Увы, но его использование требует использования топлива, а соответственно, такие аппараты имеют ограниченное время использования.

## ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Закон сохранения импульса устанавливает, что при изменении импульса космического аппарата должен меняться импульс чего-то еще, чтобы общий импульс системы был постоянным. Большинство космических аппаратов вынуждены иметь на борту запас рабочего тела, за счет отбрасывания которого может меняться импульс самого аппарата, т. е. быть реактивными. Для двигательных установок, использующих энергию магнитных полей или давления света, этой проблемы не существует.

Хотя закон сохранения импульса устанавливает, что без отбрасывания рабочего тела изменить положение центра масс космического аппарата невозможно, однако в космосе действуют гравитационные силы, магнитные поля и солнечная радиация, которые вполне можно использовать. И на этих принципах существуют двигатели, не требующие рабочего тела или требующие крайне малое его количество.

## КОРРЕКТИРОВКА ПОЛОЖЕНИЯ ИСЗ В КОСМОСЕ

В последние годы малые спутники играют важную роль в технологическом развитии. Привлекательные короткие сроки проектирования и их

**После исчерпания возможностей маневра период активной жизни аппарата считается завершенным.**

**Продолжительность жизни спутников часто определяется прежде всего тем, сколько топлива или сжатого газа они могут нести (если таковые имеются) для поддержания своей орбиты, поскольку они постепенно затягиваются земной гравитацией.**



низкая стоимость, а также возможности, которые обычно рассматриваются как проблемы для больших и дорогих космических аппаратов, побуждают решать задачи управления этими спутниками.

В зависимости от природы управляющих моментов, воздействующих на угловое движение ИСЗ, способов их реализации, а также и от того, какие требуются при этом устройства, различают активные, пассивные и комбинированные системы управления угловым движением ИСЗ.

Если для создания управляющих моментов требуется расход рабочего тела или энергии, имеющихся на борту, а для формирования этих моментов должны быть логический блок, датчики ориентации и исполнительные органы, то такая система называется активной системой управления. Активные системы управления позволяют создать значительные управляющие моменты, которые больше всех возмущающих моментов, и, как следствие, снизить

требования к точности аппроксимации последних. Кроме того, наличие бортового компьютера позволяет перепрограммировать его в течение полета ИСЗ и внести необходимые коррективы в алгоритмы управления, например, по результатам наземных наблюдений за движением ИСЗ.

С помощью активной системы можно реализовывать достаточно произвольные и быстрые угловые развороты, а кинетический момент ИСЗ можно изменять практически на произвольную величину. Активные системы управления обеспечивают необходимую точность ориентации ИСЗ при высоком быстродействии. В этом заключается их основное достоинство. Известными недостатками активных систем являются: ограниченное время работы, сложность, высокая цена, относительно низкая надежность, обусловленная наличием большого количества составных элементов (датчиков, бортового логического устройства, подвижных элементов и т.д.).





Пассивные системы управления, использующие взаимодействие с внешними полями естественного происхождения, не потребляют рабочее тело и энергию, запасенные на борту ИСЗ, и в этом плане выгодно отличаются от активных систем. При разработке пассивных систем управления приходится решать две основные проблемы: как создать восстанавливающий и демпфирующий моменты.

В настоящее время известны различные способы решения этой проблемы, основанные на использовании геофизических полей (гравитационного и магнитного), силовых факторов околоземного пространства, таких как влияние набегающего потока разреженного газа верхних слоев атмосферы и солнечного излучения, а также на использовании свойства быстро закрученного вокруг оси максимального момента инерции тела сохранять неизменную или почти неизменную

ориентацию оси вращения относительно инерциального пространства. Реализация того или иного режима ориентированного движения ИСЗ зависит от того, какие моменты являются преобладающими в своем действии на движение ИСЗ относительно его центра масс.

Однако все известные способы реализации пассивных систем управления ИСЗ обладают общим ограничением, связанным с относительно малыми величинами восстанавливающих и демпфирующих моментов.

Комбинированные системы управления включают в себя как активные, так и пассивные элементы. Активные элементы в этом случае используют либо однократно, например, для предварительного приведения ИСЗ в окрестность программного движения, либо время от времени. При этом используют такие элементы, которые не требуют большого расхода энергии и сложной системы управления, вклю-

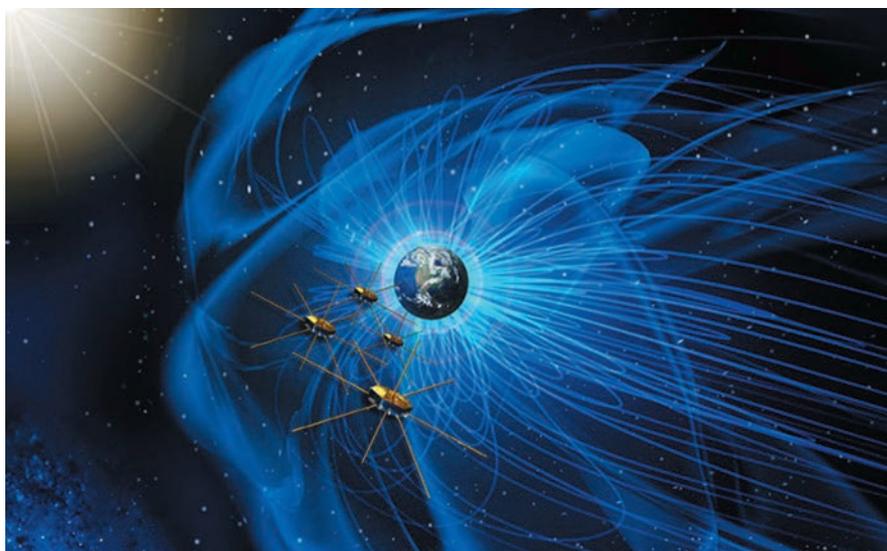
**В настоящее время наиболее перспективными типами пассивных систем управления являются гравитационные системы и магнитные системы, использующие соответственно гравитационное и магнитное поля Земли для создания управляющих моментов**

чающей датчики ориентации. В остальных принципах функционирования пассивных и комбинированных систем управления совпадают.

В настоящее время наиболее распространенными типами пассивных систем управления являются гравитационные системы и магнитные системы, использующие соответственно гравитационное и магнитное поля Земли для создания управляющих моментов.

Магнитные системы управления (МСУ) основаны на формировании управляющего момента путем использования сил взаимодействия магнитного поля Земли с собственным магнитным полем ИСЗ. МСУ позволяют изменять управляющие моменты и, следовательно, реализовать необходимые законы управления, что позволяет обеспечить точную ориентацию ИСЗ. Масса и энергопотребление МСУ незначительны, причем существуют МСУ, не потребляющие энергии. Масса МСУ не зависит от продолжительности ее работы. МСУ просты в конструктивном отношении и имеют высокую надежность. Вследствие этого они особенно полезны на долгофункциональных ИСЗ — метеорологических, геодезических, связи и некоторых других.

Таким образом, наиболее перспективным решением является управление, которое создается за счет взаимодействия магнитным моментом. Это



**Реальные силовые линии магнитного поля Земли, хотя в среднем и близки к силовым линиям диполя, отличаются от них местными нерегулярностями, связанными с наличием намагниченных пород в коре, расположенных близко к поверхности. Из-за этого в некоторых местах на земной поверхности параметры поля сильно отличаются от значений в близлежащих районах, образуя так называемые магнитные аномалии. Они могут накладываться одна на другую, если вызывающие их намагниченные тела залегают на разных глубинах.**

**Небольшая напряженность магнитного поля Земли позволяет получить сравнительно небольшие моменты сил, которые, однако, могут действовать продолжительное время, поворачивая ИСЗ в пространстве на требуемый угол**

Радиационные пояса Земли представляют собой области магнитосферы, в которых накапливаются высокоэнергетичные заряженные частицы. Внутренний пояс состоит преимущественно из протонов, внешний — из электронов. В 2012 г. спутником NASA был открыт еще один пояс, который находится между двумя известными

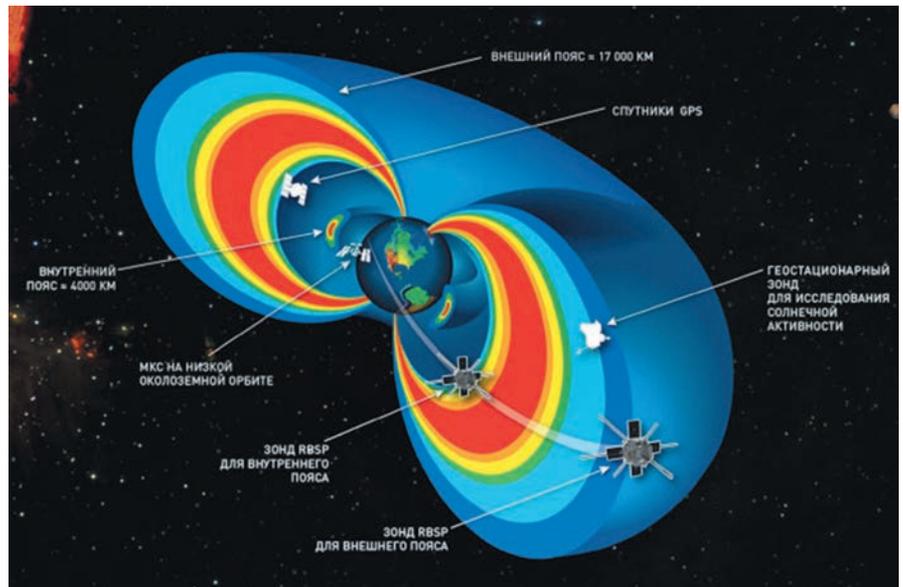
довольно сложная проблема, которую нелегко решить.

## УПРАВЛЕНИЕ — ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Магнитный момент привлекателен в качестве принципа управления прежде всего для небольших спутников. Принцип срабатывания заключается в использовании взаимодействия между магнитным полем Земли и магнитным полем, создаваемым катушкой, установленной на спутнике. Этот принцип управления по своей сути нелинейный, его сложно использовать, поскольку управляющие моменты могут создаваться только перпендикулярно вектору геомагнитного поля. Это было серьезным препятствием для использования управления на основе магнитного момента для управления ориентацией по трем осям.

Магнитная система обладает тем преимуществом, что она не требует расхода рабочего тела и в ней отсутствуют подвижные части, что значительно повышает надежность, а следовательно, и продолжительность активного функционирования такого аппарата.

Однако система управления, построенная по такому принципу, обладает как минимум двумя недостатками: магнитное торможение и потеря осью вращения первоначальной ориентации из-за ряда возмущений. ИСЗ, вращаясь в магнитном поле Земли, теряет часть своей кинетической энергии за счет индуцирования вихревых токов в токопроводящих материалах, гистерезисных потерь и потерь на вихревые токи в магнитном материале. Например, скорость вращения спутника Vanguard (1958 02) уменьшилась в течение года с 2,7 до 0,55 рад/с в основном за счет индуцирования вихревых токов в алюминиевом корпусе. За счет потерь на гистерезис скорость вращения спутника (1960, 01) упала от 0,785 до менее чем 0,002 рад/с за 24 дня.



Небольшая напряженность магнитного поля Земли позволяет получить сравнительно небольшие моменты сил, которые, однако, могут действовать продолжительное время, поворачивая ИСЗ в пространстве на требуемый угол. Так, например, при массе цилиндрического летательного аппарата 5 000 кг и его радиусе 1 м, длине неэкранированной части обмотки 100 м (25 витков обмотки при длине объекта 2 м) и токе в ней 10 А, создаваемый момент в состоянии повернуть летательный аппарат за 1 минуту на 2°, а за 5 минут этот поворот уже может составить 50°. Скорость поворота можно корректировать, изменяя длину обмотки, величину тока в ней или время включения.

## НОВОЕ РЕШЕНИЕ КЛАССИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

При движении ИСЗ по околоземной орбите возникают дополнительно действующие на ИСЗ силы — силы Лоренца. В связи с этим появляется необходимость изучения электродинамических эффектов влияния заряда ИСЗ как на орбитальное, так и на вращательное движение ИСЗ относительно его центра масс.

С развитием высоковольтной техники в последние пять лет интерес к вопросам использования магнитного момента в качестве принципа управления стал возрастать среди специалистов из таких организаций, как NASA, AIAA, American Astronautical Society. Выяснилось, что силы Лоренца могут оказывать заметное влияние на орбитальное движение ИСЗ. В связи с этим появился ряд исследований, в которых анализируется воз-

можность использования сил Лоренца для создания новых геосинхронных орбит, для безреактивных маневров в магнитных полях планет (в частности, Юпитера) и для других приложений.

Продолжительность жизни спутников часто определяется прежде всего тем, сколько топлива или сжатого газа они могут нести (если таковые имеются) для поддержания своей орбиты, поскольку они постепенно затягиваются земной гравитацией.

Zenno Astronautics, базирующаяся в технологическом инкубаторе Окленда LevelTwo, разрабатывает магнитную двигательную систему, работающую от солнечных батарей, которая теоретически могла бы обслуживать спутники в космосе на неопределенный срок. На данный момент они привлекли более одного миллиона долларов финансирования.

Исследователи Zenno Astronautics считают, что до космических испытаний «бестопливной» двигательной установки, которая сможет устранить две из самых больших экологических черных отметок спутниковой индустрии (необходимость неоднократно запускать ракеты для замены спутников после их падения на Землю, а также объем космического мусора, засоряющего орбиту), может пройти совсем мало времени.

Прототип привода был протестирован в вакууме на Земле. Он подчиняется законам физики, используя энергию Солнца для создания слабого направляемого магнитного поля на борту спутника. Таким образом, можно обеспечить, чтобы даже малые спутники имели такие же характеристики орбитального полета, как и большие и очень дорогие.