

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ В КОСМОСЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАНИПУЛЯТОРОВ

УДК 629.78.002

Кобрин В.Н.

Адрианов А.Ю.

В настоящее время в открытом космосе проводятся различные сборочно-монтажные работы по созданию сложных космических объектов [1]. Примером таких работ может служить орбитальный комплекс (ОК) "Мир" и будущая международная космическая станция (МКС) "Альфа". Самым перспективным способом строительства таких комплексов на сегодняшний день является крупномодульная сборка. При этом модули могут соединяться тремя основными способами:

1) автоматическое причаливание и соединение модулей друг с другом;

2) автоматизированная ручная сборка (в том числе с использованием манипуляторов);

3) механизированная сборка с использованием манипуляторов без непосредственного участия человека (в этом случае человек осуществляет контроль).

Необходимо отметить, что хотя первый способ и является сейчас наиболее распространённым, не все задачи космического строительства возможно и целесообразно решать с его помощью. Поэтому в последнее время особое внимание уделяется развитию последних двух способов. Для каждого из них характерно широкое применение манипуляторов. Однако манипуляторы, кроме хорошо известных по их земному применению преимуществ, обладают рядом недостатков, присущих именно их космическому применению. В данной статье речь

пойдёт об одном из таких недостатков, а именно о том влиянии, которое оказывает манипулятор при перемещении грузов на ориентацию космического аппарата (КА), и о методах борьбы с этим влиянием.

Для выработки методов предотвращения разориентации КА в процессе сборки необходимо выяснить основные факторы, влияющие на величину этой разориентации. Для этого рассмотрим математическую модель процесса перемещения груза на примере грузовой стрелы (манипулятора с ручным приводом) орбитального комплекса "Мир".

В процессе орбитального полёта на КА действуют различные возмущения, которые могут быть классифицированы как внешние и внутренние. Внешние моменты обусловлены взаимодействием аппарата с окружающей средой (атмосферой, гравитационным и магнитным полями и т.п.). Внутренние моменты возникают в результате относительного движения отдельных частей КА. Возмущающие моменты создают и манипуляторы, установленные на космическом аппарате, в процессе выполнения технологических операций.

В общем случае сборка в космосе представляет собой процесс, состоящий из следующих действий: перемещение манипулятора к месту хранения сборочных элементов; захват сборочного элемента; перемещение сборочного элемента от места хранения к месту сборки; позиционирование его на месте сборки; непосредственно соединение этого элемента с собираемой конструкцией.

Эти действия отработаны в земных условиях для различных отраслей промышленности. Однако в космосе задача сборки с использованием манипуляторов несколько видоизменяется.

Представим себе "легкий" (4-5 тонн) космический аппарат, предназначенный для автоматической сборки космических конструкций из унифицированных элементов (УЭ), например ферм различного назначения. На его борту установлены один или два манипулятора для осуществления сборочных операций. Ясно, что действия манипуляторов будут вносить возмущения в

ориентацию КА. Допустим также, что аппарат не оснащен средствами для мгновенного исправления изменений, внесенных в его ориентацию. А его система ориентации и управления движением (СОУД) вырабатывает корректирующие моменты для поддержания какого-то среднего положения КА во время выполнения данной сборочной операции.

В связи с этим возникает потребность в учете изменений в положении КА, произошедших от момента начала перемещения УЭ до момента соединения последнего с собираемой конструкцией.

При такой постановке вопроса предположение о том, что аппарат является абсолютно твердым телом, справедливо не всегда. Если моменты, создаваемые манипулятором (внутренние моменты), соизмеримы с внешними моментами или являются основной причиной вращательных движений КА, то последний необходимо представлять как систему твердых тел.

Векторным дифференциальным уравнением угловых движений КА, представляемого системой твердых тел, является следующее уравнение [2]:

$$\bar{M} = \frac{d\bar{K}}{dt}, \quad (1)$$

где \bar{M} — вектор главного момента сил, действующих на аппарат;

\bar{K} — вектор кинетического момента аппарата.

Для облегчения определения кинетического момента введём следующие основные допущения:

1) КА состоит из основного несущего тела (корпуса) S_0 с массой m_0 и отдельных носимых тел S_i с массами m_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$);

2) предположим, что упругая связь между движущимися частями и корпусом отсутствует;

3) угловое движение аппарата ограничивается его вращением вокруг центра масс;

4) поступательное движение КА не учитывается.

Зададим вращательное движение несущего тела в инерциальном пространстве вектором угловой скорости $\bar{\omega}$ связанной системы координат $OXYZ$ с началом в центре масс тела S_0 (рис. 1).

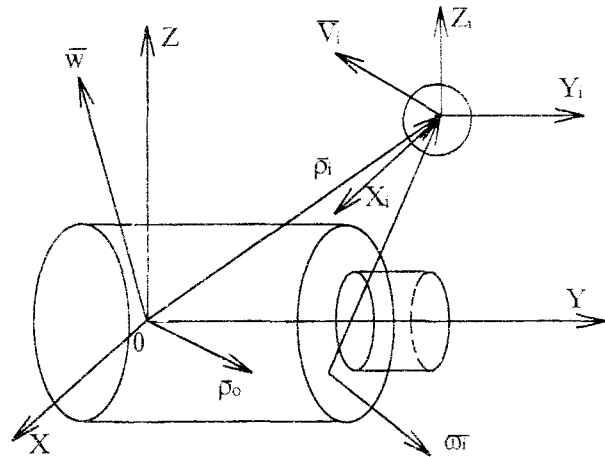


Рис. 1. Физическая модель перемещения груза

Движение носимого тела S_i в системе координат $OXYZ$ зададим радиус-вектором \bar{r}_i , определяющим положение центра масс тела S_i и относительной угловой скорости $\bar{\omega}_i$. Согласно [2] при данных допущениях выражение для кинетического момента КА можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{K} = & \left\{ J + \sum_{i=1}^N J_i + \sum_{i=1}^N m_i (\bar{\rho}_i \bar{\rho}_i J_e - \bar{\rho}_i \bar{\rho}_i) \right. \\ & \left. - m(\bar{\rho}_0 \bar{\rho}_0 J_e - \bar{\rho}_0 \bar{\rho}_0) \right\} \bar{\omega} + \sum_{i=1}^N J_i \bar{\omega}_i + \\ & + \sum_{i=1}^N m_i \bar{\rho}_i \times \bar{V}_i - m \bar{\rho}_0 \times \bar{V}, \quad (2) \end{aligned}$$

где J — тензор инерции тела S_0 относительно его центра масс;

J_i — тензор инерции тела S_i относительно осей связанной системы координат $O_i X_i Y_i Z_i$ с осями, параллельными соответствующим осям системы координат $OXYZ$ и началом O_i в центре масс тела S_i ;

\bar{r}_0 — радиус-вектор, определяющий положение центра масс всей системы носимых

тел. аппарата относительно центра масс тела S_0 , причём:

$$\bar{r}_O = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \bar{r}_i}{m}, \quad m = m_O + \sum_{i=1}^N m_i.$$

В формуле 2 J_e — проекция тензора инерции J на оси инерциальной системы координат, которая определяется по зависимости:

$$J_e = A^T J A,$$

где $A = \|a_{mn}\|$ — матрица направляющих косинусов, определяющих взаимное расположение инерциальной и связанной систем координат ($n, m = 1, 2, 3$);

$\bar{V}_i = \dot{\bar{r}}_i$ — скорость изменения \bar{r}_i в системе координат OXYZ;

$\bar{V} = \dot{\bar{r}}_O$ — скорость изменения \bar{r}_O в системе координат OXYZ.

Уравнение (2) можно записать как:

$$\bar{K} = \left\{ J + \sum_{i=1}^N (J_i + J'_i) - J_O \right\} \bar{\omega} + \sum_{i=1}^N J_i \bar{\omega}_i + \sum_{i=1}^N m_i \bar{\rho}_i \times \bar{V}_i - m \bar{\rho}_O \times \bar{V}, \quad (3)$$

где $J_i = m_i (\bar{\rho}_i \bar{\rho}_i J_e - \bar{\rho}_i \bar{\rho}_i)$ — тензор инерции материальной точки с массой, равной массе i -го тела и совпадающей с его центром масс относительно системы координат OXYZ;

$J_O = m (\bar{\rho}_O \bar{\rho}_O J_e - \bar{\rho}_O \bar{\rho}_O)$ — тензор инерции материальной точки с массой, равной массе системы и совпадающей с центром масс системы относительно системы координат OXYZ.

Преобразуем (3) в виде:

$$\bar{K} = J(t) \bar{\omega} + \sum_{i=1}^N J_i \bar{\omega}_i + \sum_{i=1}^N m_i \bar{\rho}_i \times \bar{V}_i - m \bar{\rho}_O \times \bar{V}, \quad (4)$$

где $J(t)$ — тензор инерции КА как системы твёрдых тел переменный во времени из-за движения носимых тел.

Теперь (1) можем переписать в виде:

$$\bar{M} = \frac{d}{dt} \left(J(t) \bar{\omega} + \sum_{i=1}^N J_i \bar{\omega}_i + \sum_{i=1}^N m_i \bar{\rho}_i \times \bar{V}_i - m \bar{\rho}_O \times \bar{V} \right). \quad (5)$$

В общем случае вектор главного момента равен [2]:

$$\bar{M} = \bar{M}_{\text{внеш}} + \bar{M}_{\text{СОУД}}$$

где $\bar{M}_{\text{внеш}}$ — вектор момента внешних сил;
 $\bar{M}_{\text{СОУД}}$ — вектор момента от СОУД.

Тогда уравнение (5) примет вид:

$$\frac{d}{dt} (J(t) \bar{\omega}) = \bar{M}_{\text{внеш}} + \bar{M}_{\text{СОУД}} - \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N J_i \bar{\omega}_i + \sum_{i=1}^N m_i \bar{\rho}_i \times \bar{V}_i - m \bar{\rho}_O \times \bar{V} \right) \quad (6)$$

или

$$J(t) \bar{\omega} = \int_0^{t_k} \bar{M}_{\text{внеш}} dt + \int_0^{t_k} \bar{M}_{\text{СОУД}} dt - \sum_{i=1}^N J_i \bar{\omega}_i - \sum_{i=1}^N m_i \bar{\rho}_i \times \bar{V}_i + m \bar{\rho}_O \times \bar{V}. \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на величину угловой скорости. Рассмотрим следующие факторы:

1. $J(t)$ — тензор инерции несущего тела. Этот фактор имеет огромное значение. При достаточно большой его величине по сравнению с $\sum_{i=1}^N J_i$ носимые тела не могут

оказать существенного влияния на ориентацию КА, и наоборот. Расчёты, проведённые для одной из конфигураций орбитального комплекса "Мир", наглядно это показали (рис. 2). При такой конфигурации момент инерции комплекса относительно продольной оси на порядок меньше моментов инерции относительно двух других осей. Если перемещение груза стрелой производится в плоскости перпендикулярной этой оси, то угловая скорость, приобретаемая станцией относительно продольной оси в конце

технологической операции, в десятки раз превышает угловые скорости относительно двух других осей.

2. \bar{w}_i и \bar{V}_i — скорости движения носимых тел. Эти скорости также имеют существенное значение. Их влияние, оказываемое на станцию, линейно зависит от их величин.

3. J_i и m_i — массовые и инерционные характеристики носимых тел. Они имеют существенное значение, если их величина сравнима с J и $m_{ка}$ (см. п.1).

4. ρ_i — радиус-вектор носимого тела (аналогично п.2).

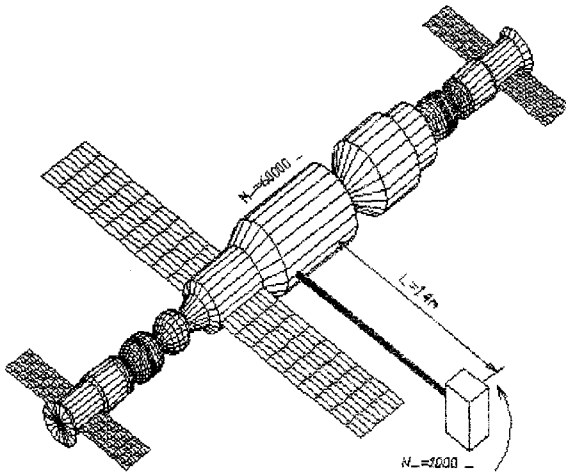


Рис. 2. Моделирование перемещения груза при одной из конфигураций станции "Мир"

Исходя из рассмотренных выше параметров, можно дать следующие рекомендации для предотвращения разориентации станции:

1. Космический аппарат, на котором будет установлен манипулятор для перемещения массивных грузов, должен иметь массовые и инерционные характеристики, значительно превышающие аналогичные характеристики грузов.

2. Скорость перемещения груза должна быть снижена до минимально возможной величины, особенно в случае несоблюдения условия 1.

3. Точка крепления манипулятора должна выбираться как можно ближе к центру масс КА.

4. Траектория перемещения груза должна по возможности находиться в

плоскости, перпендикулярной к оси, относительно которой КА имеет наибольший момент инерции. Например, для конфигурации, показанной на рис. 3, и траектории перемещения груза, лежащей в плоскости, проходящей через продольную ось КА, при той же скорости перемещения груза угловая скорость станции к концу технологической операции оказывается небольшой и может быть легко скомпенсирована СОУД.

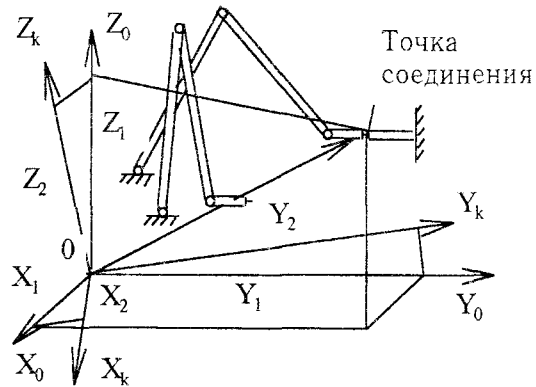


Рис. 3. Перемещение груза с помощью манипулятора изменяемой геометрии

Из уравнения (7) при известных массовых и геометрических характеристиках носимых тел, а также законах движения последних можно получить угловую скорость несущего тела \bar{w} . Все эти параметры известны при проведении реальных сборочных работ.

Зная величины $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, можно определить углы поворота КА относительно соответствующих осей:

$$\varphi_x = \int_{t_0}^{t_k} \omega_x dt, \quad \varphi_y = \int_{t_0}^{t_k} \omega_y dt, \quad \varphi_z = \int_{t_0}^{t_k} \omega_z dt. \quad (8)$$

Таким образом, зная углы поворота, можно определить координаты точки соединения в новой системе координат $Ox_k Y_k Z_k$ (рис. 3):

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = M_x M_y M_z \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где M_x, M_y, M_z — матрицы поворота старой системы координат относительно соответствующих осей [3]:

$$\begin{aligned}
 M_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_x & -\sin \varphi_x \\ 0 & \sin \varphi_x & \cos \varphi_x \end{bmatrix}; \\
 M_y &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_y & 0 & \sin \varphi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_y & 0 & \cos \varphi_y \end{bmatrix}; \\
 M_z &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_z & -\sin \varphi_z & 0 \\ \sin \varphi_z & \cos \varphi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Зная новые координаты точки соединения можно определить поправки, которые должна обеспечить система управления манипулятором для приведения УЭ в необходимое положение:

$$\begin{pmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \\ \Delta_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

При этом необходимо учитывать, что КА продолжает движение с определенной скоростью до подачи корректирующего импульса СОУД.

К сказанному выше следует также добавить, что при рациональном использовании внешнего гравитационного момента можно значительно снизить возмущающий момент от манипулятора, о чем свидетельствует опыт многолетней эксплуатации грузовой стрелы орбитального комплекса "Мир".

Литература: 1. Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г. Управление космическими летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1974. — 348 с. 2. Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. — М.: Наука, 1974. — 600 с. 3. Механика промышленных роботов: Учебное пособие для вузов. В 3-х кн. Кн. 1. Кинематика и динамика. /Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. — М.: Высшая школа, 1988. — 304 с. 4. Александров А.П., Гречка В.Д., Кобрин В.Н., Цыганков О.С. Сборочно-монтажные и ремонтно-восстановительные работы в космическом пространстве. — Харьков: ХАИ, 1990. — 248 с. 5. Цыганков О.С., Кобрин В.М. Технологічна діяльність космонавта. Підручник для авіаційних вищих навчальних закладів. — Харків: ХАІ, 1995. — 300 с.

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ — НЕОБХОДИМАЯ ПРЕДПОСЫЛКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВА

УДК 669:004.8:338.4

Гончаров А.Б.

Интенсификация воздействия хозяйственной деятельности на природную среду привела к резкому качественному ухудшению ее состояния, чрезвычайно обострив проблему согласования социально-экономических и экологических целей развития общества. Необходимость усиления экологической направленности социально-экономического развития страны определяется следующим.

Во-первых, резко возрастает влияние экологических факторов на развитие общества, увеличиваются масштабы экологического ущерба в экономической и социальной сферах воспроизводства. В развитых странах ежегодный экономический ущерб от загрязнения окружающей среды оценивается равным потере от 5 до 10 % валового национального продукта.

Во-вторых, загрязнение окружающей среды и снижение качества продукции (с точки зрения ее экологической чистоты и безопасности) приводит к росту затрат на преодоление негативных последствий этих процессов. В результате все большая доля совокупного общественного труда тратится на обезвреживание вредных отходов, очистку сточных вод, восстановление нарушенных природных ресурсов.

Экологические проблемы экономического развития принадлежат сегодня к числу самых острых и актуальных.

Качество окружающей природной среды, ее воспроизводственный и возобновительный потенциалы уменьшаются с наращиванием масштабов ресурсопользования и объемов загрязняющих веществ и отходов. По данным зарубежных ученых, на 1 дол. США национального дохода мировое сообщество тратит в среднем около 1 т природных ресурсов, которые человек "изымает" из окружающей среды и пускает в переработку. Из