СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ

УДК 621.865.6+629.7

ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЧАЛИВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2020 г. Ю. Ф. Голубев^{а,*}, А. В. Яскевич^{b,**}

^а ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия ^b РКК "Энергия", Королев, Россия *e-mail: golubev@keldysh.ru **e-mail: Andrey. Yaskevich@rsce.ru Поступила в редакцию 24.01.2020 г. После доработки 13.02.2020 г.

Принята к публикации 30.03.2020 г.

Описывается метод гибридного моделирования, применяемого для отработки процесса причаливания космических аппаратов, т.е. их стыковки с использованием космического манипулятора. В этом методе динамика манипулятора и относительное движение соединяемых объектов вычисляются с помощью специально разработанной математической модели, а стыковочные агрегаты представлены реальными экземплярами. Относительное движение этих агрегатов воспроизводится на 6-степенном стенде, управляемом компьютером.

DOI: 10.31857/S0002338820040058

Введение. Стыковка космических аппаратов (КА) на орбите с использованием космического манипулятора выполняется в тех случаях, когда один из соединяемых аппаратов доставляется другому в виде полезного груза или когда при соединении применяются простые устройства, не обеспечивающие компенсацию относительно больших промахов и поглощение энергии сближения. Манипулятор, установленный на одном из аппаратов, осуществляет функции системы сближения. Он перемещает присоединяемый объект, создавая условия для образования первичной механической связи стыковочных интерфейсов, окончательное жесткое соединение которых реализует отдельный механизм. В англоязычной литературе такая операция получила название berthing (причаливание, швартовка). Точность наведения, необходимая для образования первичной механической связи, обеспечивается включением человека-оператора в контур управления манипулятором.

При наземной отработке подобных операций актуальной проблемой является адекватный учет пространственных динамических и упругих свойств механизма манипулятора в реальном времени работы оператора. Физическое, натурное моделирование с применением реального манипулятора нецелесообразно из-за невозможности корректной компенсации сил тяжести, действующих на него как на пространственную систему тел. Математическое моделирование причаливания в реальном времени упрощается, когда агрегаты для соединения КА не имеют механизмов демпфирования и разработаны специально с учетом условий сближения, которые обеспечивает манипулятор. Простота их конструкции позволяет воспроизвести операцию на компьютерном моделирующем программном комплексе, включающем человека-оператора в контур управления.

Относительные перемещения стыковочных агрегатов в процессе их соединения невелики. Если первичная механическая связь создается до совмещения их стыковочных плоскостей (до их жесткого контакта), то для наземной отработки причаливания применяется гибридное моделирование на 6-степенном динамическом стенде. В этом случае агрегаты, средства визуального наблюдения и прицеливания, ручки управления манипулятором представлены реальными образцами, а пространственный упругий манипулятор заменяется математической моделью в виде соответствующей системы уравнений движения, интегрирование которой осуществляется в реальном времени. Такой метод экспериментальной отработки был впервые предложен и реализован в ракетно-космической корпорации (РКК) "Энергия". В данной работе рассматривается схема 6-степенного стенда, на котором реализуется гибридное моделирование причаливания, коротко излагается история выполненных экспериментов и используемых при этом моделей, более подробно описана отработка стыковки модуля малого исследовательского модуля (МИМ1-Рассвет) [1] к международной космической станции (МКС) манипулятором SSRMS (space station remote manipulator system).

1. Операции, выполняемые космическими дистанционно управляемыми манипуляторами. Появление и применение дистанционно управляемых космических манипуляторов обусловлено увеличением размеров КА, расширением сферы их использования и необходимостью облегчения работы космонавтов на внешней поверхности КА. Первые дистанционно управляемые манипуляторы входили в состав американских многоразовых космических кораблей типа Space Shuttle и имели общее название SRMS (shuttle remote manipulator system) [2]. Они обеспечивали захват свободно летающих объектов, их перемешение и удержание с целью ремонта, их визуальную инспекцию и при необходимости укладку в отсек полезного груза, а также быстрое перемещение астронавтов, находящихся в открытом космосе. Дистанционно управляемые манипуляторы многоразовых кораблей, в том числе и российского корабля "Буран", имели антропоморфную кинематику, упрощенно копирующую движения человеческой руки. Они были многозвенными и имели шесть степеней подвижности, а их корневое звено жестко крепилось на корпусе космического корабля рядом с его бортом. Основные органы управления манипулятором располагались внутри кабины корабля, на его верхней палубе, через иллюминаторы которой можно было наблюдать отсек полезного груза. Впоследствии некоторые функции управления стали доступны астронавту, нахоляшемуся вне кабины, на передвижном рабочем месте, которое перемешал манипулятор.

При строительстве и эксплуатации МКС начал активно использоваться антропоморфный манипулятор SSRMS [3, 4], который имеет семь степеней подвижности (рис. 1, *a*). Его кинематическая схема является полностью симметричной относительно центрального (локтевого) шарнира, что делает возможным "перешагивание" манипулятора с одного места крепления (базовой точки) на другое с сохранением функциональных свойств. Такие базовые точки расположены в различных местах на внешней поверхности станции и увеличивают объем доступного пространства. Рабочие места оператора для управления манипулятором SSRMS расположены внутри модулей "Destiny" и "Cupola" американского сегмента МКС. Обслуживание японского модуля станции осуществляет неподвижно установленный на нем дистанционно управляемый манипулятор [5], имеющий такую же кинематику, как и манипулятор SRMS.

Операции, выполняемые дистанционно управляемыми космическими манипуляторами, в наиболее общем виде состоят из трех этапов: взятие объекта манипулирования, его перемещение, точное позиционирование относительно целевого устройства или сближение и соединение с ним. На первом этапе схват манипулятора (рис. 1, δ) [6] приближается к такелажному элементу (рис. 1, δ) [7], установленному на перемещаемом объекте. При использовании манипуляторов SRMS или SSRMS механическое соединение обеспечивается за счет охвата конца такелажного элемента тросами схвата и их последующего стягивания. Для точного наведения применяется телекамера на схвате и мишень на такелажном элементе. Управление осуществляется оператором с помощью ручек управления на основе визуальной информации. Алгоритм решения обратной задачи кинематики манипулятора учитывает конструктивные ограничения и пересчитывает сигналы, поступающие от этих ручек, в сигналы управления приводами манипулятора.

Перенос объекта манипулирования в заданную окрестность места "сборки" осуществляется, как правило, в автоматическом режиме, под управлением компьютера. Это обусловлено ограниченными возможностями визуального наблюдения рабочего пространства. Кроме этого, такой режим снимает нагрузку с человека-оператора. На завершающем этапе точного позиционирования или сближения управление манипулятором вновь выполняет оператор.

Дистанционно управляемые космические манипуляторы имеют большие линейные размеры (для перемещения объектов) и упругую податливость редукторов приводов и звеньев. При их движении даже небольшие угловые деформации могут приводить к существенным боковым колебаниям схвата, что затрудняет точное позиционирование. Мощность приводов космических манипуляторов позволяет правильно перемещать их лишь при отсутствии силы тяжести. Поэтому в наземных условиях тренировка операторов, направленная на получение навыков управления, на реальном манипуляторе практически неосуществима.

С учетом относительно небольших размеров схвата и такелажного элемента процесс взятия объекта в наземных условиях можно достаточно аккуратно воспроизвести с использованием гибридного моделирования, когда динамика их относительного движения рассчитывается в



Рис. 1. Дистанционно управляемый манипулятор SSRMS MKC (*a*), схват манипулятора с телекамерой (*б*) и такелажный элемент с мишенью (*в*) (фото NASA)

реальном времени на компьютере, а воспроизводится с помощью промышленного манипулятора. Так как штырь применяемого такелажного элемента имеет простейшую геометрию, то возможна разработка программного комплекса, моделирующего в реальном времени движение манипулятора и факт взятия такелажного элемента (без стягивания его тросами).

С помощью манипулятора наряду с перемещением грузов и облегчением работы астронавтов выполняется более сложная операция — присоединение (berthing) к МКС новых строительных модулей или транспортных космических кораблей. Ей предшествует взятие манипулятором присоединяемого объекта и его перемещение в заданную область установки. Соединение модуля или корабля со станцией выполняется с помощью универсальных стыковочных [8] или более простых специализированных устройств, предназначенных только для причаливания с учетом точного наведения манипулятором под управлением человека-оператора [9]. В последнем случае корректное математическое моделирование их взаимодействия возможно в реальном времени [10].

При причаливании КА с помощью стыковочных агрегатов основной задачей оператора, управляющего манипулятором, является достижение сцепки, т.е. зацепления защелок одного агрегата за упоры другого, и перевод исполнительного механизма манипулятора в расслабленное состояние (выключение приводов и тормозов в шарнирах). После этого механизмы стыковочных агрегатов обеспечивают их стягивание и жесткое соединение. При этом манипулятор, оставаясь в соединении с объектом манипулирования, оказывает незначительное сопротивление.

Податливость исполнительного механизма манипулятора зависит от его конфигурации. Такелажный элемент, используемый манипулятором для взятия, размещается на периферии объекта манипулирования. При перемещении корабля или строительного модуля, который, как правило, имеет значительную массу, возникает взаимное влияние их поступательных и угловых движений. Стыковочные механизмы, обеспечивающие достижение сцепки, обладают различной податливостью и часто применяются впервые совместно с конкретным типом манипулятора. С учетом этих факторов на стадии проектирования причаливания бывает необходимо оценить саму возможность достижения сцепки.

В условиях действия силы тяжести ограниченное физическое моделирование операции причаливания с помощью реального манипулятора, стыковочного агрегата и инерционного макета переносимого КА возможно лишь на плоскостном стенде, в котором сила тяжести, действующая на каждое тело механической системы, компенсируется соответствующими опорами на воздушной подушке. Но с точки зрения воспроизведения полной динамики манипулятора такое моделирование не является удовлетворительным, так как в нем не реализуется пространственная траектория движения. Опоры на воздушной подушке делают его исполнительный механизм более жестким, чем в условиях невесомости. Кроме того, эти опоры обладают собственной инерцией, и при перемещении по горизонтальному полу на них неизбежно действуют силы трения, что дополнительно искажает динамику всей конструкции.

В полностью компьютерных программных комплексах реального времени сложные стыковочные механизмы неизбежно представляются упрощенными математическими моделями, адекватность которых необходимо подтверждать экспериментально в условиях слабого контактного взаимодействия агрегатов, свойственного операции причаливания, что трудно осуществимо.

2. Гибридное моделирование процесса причаливания КА. При проектировании причаливания КА с использованием нового устройства соединения или стыковочного агрегата, изначально не ориентированного на работу совместно с манипулятором, необходимо предварительно оценить саму возможность выполнения данной операции. Такая оценка может быть получена на основе гибридного моделирования причаливания на 6-степенном динамическом стенде, разработанном в РКК "Энергия" и используемом для экспериментальной отработки агрегатов стыковки КА. Адаптация такого стенда для отработки причаливания реализуема, прежде всего, потому, что относительные перемещения стыковочных агрегатов или устройств при выполнении операции причаливания даже меньше, чем при стыковке. На рис. 2 представлена упрощенная схема 6-степенного динамического стенда гибридного моделирования.

Для воспроизведения процесса в реальном времени применяются реальные стыковочные агрегаты (1), относительное перемещение которых обеспечивает подвижная 6-степенная платформа (2) с кинематикой Гью-Стьюарта [11, 12] и управляемыми гидроприводами (3). Один из агрегатов устанавливается на подвижной платформе, другой — на устройстве (4) измерения сил и моментов контактного взаимодействия, которое расположено над подвижной платформой на силовой ферме (5). Это измерительное устройство содержит шесть тензометрических датчиков, ориентированных по непараллельным направлениям. Сигналы (6) этих датчиков поступают на вход аналого-цифрового преобразователя и далее — в управляющий компьютер (7), который выполняет несколько функций. Его программы, во-первых, пересчитывают показания шести датчиков в три компоненты силы и три компоненты момента контактного взаимодействия стыковочных агрегатов. Во-вторых, они интегрируют дифференциальные уравнения динамики относительного движения стыкуемых КА, вычисляют требуемые значения относительных положений и скоростей стыковочных агрегатов и управляют подвижной платформой стенда. Начальные условия, а также места установки каждого из агрегатов (на подвижной платформе или на устройстве измерения сил и моментов) задаются программой испытаний. Входными данными для математической модели движения являются геометрические и инерционные характеристики стыкуемых КА, измеренные значения сил и моментов контактного взаимодействия и показания датчиков (δ) стыковочного механизма активного агрегата. В ней вычисляются значения сил и моментов, создаваемых системой управления активного объекта. В-третьих, программы управляющего компьютера пересчитывают относительные положения и скорости стыковочных агрегатов в требуемые линейные перемещения и скорости штоков (9) гидроприводов подвижной платформы на основе решения для нее обратной задачи кинематики. Эти управляющие сигналы (10) подаются на входы регуляторов каждого отдельного гидропривода.

В состав 6-степенного стенда входят еще две подсистемы, не показанные на рис. 2. Под его основанием расположена насосная станция, обеспечивающая давление в гидроприводах. Сигналы с тензометрических датчиков поступают также в аналоговую подсистему аварийного контроля, которая блокирует гидроприводы платформы в случае превышения заранее заданных значений



Рис. 2. Упрощенная схема 6-степенного стенда для отработки причаливания

сил и моментов контактного взаимодействия. Посредством отдельного пульта осуществляется приведение стыковочного механизма активного стыковочного агрегата в исходное перед стыковкой или втянутое положение.

Гибридное моделирование каждого варианта программы испытаний при экспериментальной отработке стыковки реализуется следующим образом. Предварительно подвижная платформа автоматически в программном режиме управления выводится в заданное положение с заданной относительной скоростью, которые соответствуют начальным условиям для стыковочных агрегатов и в реальном полете должны быть обеспечены космическим манипулятором. После этого управление осуществляется на основе решения системы дифференциальных уравнений относительного движения стыкуемых КА с учетом начальных условий, измеренных сил и моментов контактного взаимодействия, а также сил и моментов системы управления активного объекта, вычисленных исходя из показаний дискретных датчиков стыковочного механизма, фиксирующих наступление первого контакта и сцепки. Процесс стыковки моделируется не полностью, он останавливается, не доходя до появления контакта стыковочных плоскостей агрегатов. Это объясняется тем, что при увеличении контактной жесткости до величины, сопоставимой с осевой жесткостью гидроприводов подвижной платформы, в контурах управления гидроприводов возникают автоколебания. Каждое испытание завершается при достижении заданного максимального значения модельного времени или аварийно, в случае превышения заданных максимальных значений сил и моментов контактного взаимодействия. Для возможности последующей обработки создаются файлы результатов, в которых кроме значений измеренных контактных сил и моментов запоминаются относительные положения и скорости стыкуемых КА и агрегатов, показания датчиков стыковочного механизма – дискретных и аналоговых, фиксирующих движение звеньев устройств демпфирования.

При воспроизведении причаливания КА на 6-степенном стенде компьютерная модель движения интегрирует дифференциальные уравнения и рассчитывает кинематические соотношения, которые описывают перемещение не только этих аппаратов, но и манипулятора, переносящего один из них. Для модели манипулятора сигналы управления формирует оператор. Обычно он использует две ручки управления (11). Левая задает требуемые линейные, а правая – требуемые угловые скорости движения переносимого объекта. Система координат, в которой определены эти величины, связана с мишенью (12), установленной рядом с агрегатом, к которому производится причаливание. Оператор наблюдает мишень с помощью телекамеры (13), установленной на перемещаемом КА рядом с его стыковочным агрегатом, и монитора (14) на рабочем месте оператора. При необходимости выполнения коррекции относительного углового положения стыкуемых КА используются дополнительные обзорные телекамеры (15) и мониторы (16).

Оператор, наблюдая мишень (12), с помощью ручек управления задает значения линейных и угловых скоростей телекамеры (13), которые поступают в компьютер, где преобразуются в скорости схвата манипулятора и далее, с помощью решения обратной кинематической задачи, – в требуемые скорости вращения выходных валов его приводов. Эти сигналы управления поступают в модели регуляторов приводов, а вычисленные напряжения на выходе этих моделей – в модели динамики электродвигателей и редукторов. Вычисленные моменты на выходных валах приводов входят в дифференциальные уравнения динамики манипулятора и перемещаемого объекта, в результате интегрирования которых определяются сигналы управления подвижной платформой.

Реальные стыковочные агрегаты и 6-степенной стенд до настоящего времени имеются в наличии только в РКК "Энергия". Это частично определило российский приоритет в данном виде экспериментальной отработки операции причаливания КА.

3. Спроектированные и реализованные операции причаливания и их экспериментальная отработка. Потребность экспериментальной оценки возможности причаливания КА манипулятором впервые возникла в 80-е г. ХХ в. при реализации программы многоразового орбитального корабля "Буран". В первом полете второго экземпляра этого корабля предполагалось разместить в его отсеке полезного груза блок научной аппаратуры. Корабль (1) должен был пристыковаться к одному из стыковочных портов орбитальной станции "Мир" (2), захватить своим бортовым манипулятором (3) блок научной аппаратуры (4), перенести его к месту стыковки и соединить с другим, соседним стыковочным портом (рис. 3).

Стыковку и корабля, и блока научной аппаратуры к станции "Мир" предполагалось осуществить с использованием андрогинных периферийных стыковочных агрегатов (АПАС) (5) [8], у которых центральная часть является свободной. Поэтому мишень (6) для наведения блока научной аппаратуры располагалась вдоль продольной оси пассивного агрегата на блоке научной аппаратуры, а телекамера (7) — вдоль продольной оси активного агрегата на станции "Мир".

Опыт применения 6-степенного стенда для оценки возможности выполнения этой операции был ранее опубликован в [13], где была представлена упрощенная модель динамики механической системы "манипулятор—полезный груз". Упрощения были введены, прежде всего, потому, что для управления стендом использовался удаленно расположенный компьютер с относительно небольшим быстродействием. В модели движения станция и состыкованный с ней корабль, обладающие большой инерцией, считались неподвижным основанием. Динамика перемещаемого полезного груза описывалась уравнениями Ньютона—Эйлера для твердого тела, а движение манипулятора — рекуррентными уравнениями с учетом инерции только приводов. Матрица жесткости исполнительного механизма и алгоритм управления, основанный на решении



Рис. 3. Упрощенная схема причаливания блока научной аппаратуры к орбитальной станции бортовым манипулятором многоразового космического корабля



Рис. 4. Приведение манипулятором SRMS в позицию для стыковки стыковочного отсека к орбитальному кораблю Space Shuttle в полете STS-74 (*a*); модуля ΦГБ к связке Space Shuttle + модуль NODE1 в полете STS-88 (*б*) (фото NASA)

обратной задачи кинематики для скоростей, были предоставлены разработчиком манипулятора — ЦНИИ робототехники и технической кибернетики. Матрица демпфирования упругих колебаний механической системы вычислялась на основе экспертной интервальной оценки логарифмического декремента затухания.

Сцепка периферийных стыковочных агрегатов достигается при совмещении плоскостей их стыковочных колец, когда происходит срабатывание трех защелок, расположенных равномерно по их периметру. Необходимость совмещения двух плоскостей в трех парах точек является достаточно сложным требованием для упругого манипулятора, но оно может быть выполнено в результате управления, обеспечивающего последовательное срабатывание защелок. В результате экспериментальной отработки причаливания с участием сертифицированных операторов после тренировки была достигнута сцепка и тем самым доказана принципиальная возможность выполнения причаливания. Первый этап экспериментальной отработки завершился в июле 1991 г., но вскоре программа "Буран" была закрыта.

Первая реальная стыковка, выполненная с использованием периферийных стыковочных агрегатов АПАС и космического манипулятора, была осуществлена 14 ноября 1995 г. в ходе полета многоразового транспортного космического орбитального корабля Space Shuttle HACA (полет STS-74) при доставке к орбитальной стации "Мир" стыковочного отсека (рис. 4, *a*). По оценке специалистов NASA и Rockwell Int., сила, развиваемая бортовым манипулятором SRMS орбитального корабля (1), была недостаточной для обеспечения сцепки агрегатов АПАС. Поэтому в полном объеме причаливание не выполнялось. Манипулятор (2) перемещал стыковочный отсек (3) с пассивным агрегатом АПАС (4) в положение для стыковки – перед активным агрегатом АПАС (5) на переходном тоннеле корабля – и расслаблял свои шарниры. После этого за счет включения двигателей орбитального корабля Space Shuttle осуществлялись его быстрое движение в направлении стыковочного отсека и стыковка с ним. Затем выполнялась обычная стыковка связки "корабль + стыковочный отсек" к станции "Мир".

В последующем подобная операция была выполнена дважды для соединения первых модулей МКС – американского модуля NODE1 (Узловой 1) и российского модуля ФГБ (функционально-грузовой блок) в полете STS-88 корабля Space Shuttle в течение 5–7 декабря 1998 г. (рис. 4, δ). По ранее отработанной схеме сначала модуль NODE1 (δ) был установлен на стыковочный агрегат (5) корабля Space Shuttle, а затем модуль ФГБ (7) – на "задний" стыковочный агрегат (5) модуля NODE1, такой же, как у Space Shuttle. Специалисты РКК "Энергия" для анализа динамики выполнения данных операций не привлекались.

В 1997 г. из-за предполагаемой задержки запуска Служебного модуля, необходимого для поднятия орбиты связки модулей ФГБ и NODE1, NASA инициировала работу по анализу возможности стыковки к ФГБ КА с двигательной установкой, доставляемого орбитальным кораблем Space Shuttle. Стыковка бортовым манипулятором корабля предполагалась к модулю ФГБ, у которого свободный порт был оснащен пассивным агрегатом стыковочной системы типа "штырьконус", обеспечивающей более легкие условия для сцепки, чем периферийные агрегаты АПАС. Проводился двусторонний анализ данной операции при взаимном обмене исходными данными.

Специалисты NASA моделировали причаливание в реальном времени на математическом программном комплексе с упрощенной моделью стыковочных агрегатов типа "штырь-конус". В РКК "Энергия" выполнялось гибридное моделирование этой операции на 6-степенном стенде с использованием реальных агрегатов. Компьютер, управляющий стендом, был более мощным, чем предшествующий, и располагался в непосредственной близости от подвижной платформы. Это позволило применить более детальную модель манипулятора [14]. В моделях приводов кроме уравнений динамики двигателей были реализованы алгоритмы реальных цифровых регуляторов, учтены жесткости и люфты редукторов. Исполнительный механизм манипулятора описывался рекуррентными уравнениями динамики для последовательной цепочки твердых тел и уравнениями динамики деформаций каждого тела под действием инерционных сил и моментов, а также сил и моментов, действующих со стороны всех предшествующих тел. Вклад деформаций в динамику переносного движения не учитывался. Экспериментальная отработка описанной выше операции причаливания на 6-степенном стенде, выполненная летом 1998 г., показала, что сцепка успешно достигается даже при невысоком уровне тренированности оператора, управляющего манипулятором. В реальном полете данная операция не была реализована, так как Служебный молуль стартовал в соответствии с графиком.

В 2003–2004 гг. для проверки возможности достижения сцепки периферийных агрегатов АПАС при причаливании была разработана модель этой операции [15], показанной на рис. 4, *а*. В ней динамика исполнительного механизма манипулятора как цепочки твердых тел описывалась рекуррентными дифференциальными уравнениями, а его упругие свойства учитывались с помощью матриц жесткости и демпфирования. Экспериментальная проверка на 6-степенном стенде не была выполнена, но данная модель впоследствии была использована при гибридном моделировании причаливания российского модуля МИМ1 (малый исследовательский модуль 1) к МКС станционным манипулятором SSRMS. Эта операция была успешно реализована 18 мая 2010 г. в полете STS-132 корабля Space Shuttle к MKC. Более подробно ее экспериментальная отработка рассматривается в следующем разделе.

Причаливание манипулятором SSRMS в реальном полете было впервые выполнено в сентябре 2009 г. [16]. Японский грузовой корабль HTV был соединен с MKC агрегатами CBM (common berthing mechanism) [9], специально разработанными для таких операций. Они имеют направляющие элементы и очень простые механизмы без устройств демпфирования для образования первичной механической связи после совмещения стыковочных плоскостей. Гибридное моделирование такой операции связано с большими трудностями из-за высокой жесткости контакта. Для отработки операции использовался математический моделирующий программный комплекс реального времени, что оказалось вполне оправданным при существующей конструкции агрегатов. В настоящее время манипулятор SSRMS регулярно выполняет причаливание к MKC грузовых кораблей HTV и Dragon.

4. Экспериментальная отработка причаливания модуля MUM1 (Рассвет) к MKC. Проектирование процесса установки модуля MUM-1 на модуль ΦГБ МКС проводилось с начала 2007 г. до весны 2010 г. Эта операция была наиболее полно исследована и отражена в отчетных документах по сравнению с предшествующими, упомянутыми выше. Предполагалось, что модуль доставляется кораблем Space Shuttle и переносится в зону стыковки его бортовым манипулятором SRMS и станционным манипулятором SSRMS в автоматическом режиме управления. После этого оператор, управляя манипулятором SSRMS, должен был обеспечить сцепку двух агрегатов российской системы стыковки типа "штырь-конус" [8] (рис. 5).

Допустимые нагрузки на элементы манипулятора значительно меньше, чем для стыковочных агрегатов. Поэтому большие скорости сближения недопустимы. Для преодоления промахов и достижения сцепки при малых скоростях манипулятор должен создать силу, которая может находиться на пределе возможностей его приводов. Задачей совместного исследования специалистов космического центра им. Л. Джонсона NASA, Канадского космического агентства (CSA) и РКК "Энергия" являлась разработка процедуры управления манипулятором SSRMS, позволяющей выполнить операцию при соблюдении взаимно приемлемых ограничений.

Для наведения МИМ-1 в процессе причаливания были предусмотрены используемые при обычной стыковке прицельная телекамера на модуле и мишень на МКС, установленная вблизи



Рис. 5. Конфигурация манипулятора SSRMS при причаливании модуля МИМ-1 (*a*) (данные NASA), активный и пассивный агрегаты системы стыковки типа "штырь-конус" (*б*)



Рис. 6. Модели изображений с прицельной (δ) и обзорных (a, e) телекамер на стенде SES NASA при математическом моделировании в реальном времени причаливания модуля МИМ-1

пассивного агрегата. Изображение этой мишени, получаемое прицельной телекамерой, является интегральной характеристикой и бокового промаха, и углового рассогласования стыковочных интерфейсов по тангажу и рысканию. Для определения реального промаха необходимо выполнить угловое выравнивание стыкуемых объектов. С этой целью использовались обзорные телекамеры. Оператор манипулятора на своем рабочем месте наблюдал (рис. 6) телевизионное изображение (δ) с прицельной телекамеры на модуле МИМ-1, изображение (a) с обзорной камеры на ферме S1L американского сегмента и изображение (a) с обзорной камеры, расположенной на кисти манипулятора SRMS.

Такелажный элемент, с которым соединяется схват, расположен на некотором удалении от центра масс переносимого модуля, и его ориентация не совпадает с направлением сближения.

Вследствие этого силовое воздействие упругого манипулятора на модуль вызывает его дополнительное вращение даже при выдаче команд только на поступательные перемещения. В процессе наведения многократно устранялись сначала угловые рассогласования осей стыковочных агрегатов на основе их изображений, формируемых обзорными телекамерами, а после этого — "чистый" боковой промах и угловое рассогласование относительно продольной оси с помощью прицельной телекамеры. Искусство управления в данном случае состояло в минимизации числа таких выравниваний.

Специалистами космического центра им. Л. Джонсона (JSC) NASA были определены два режима моделирования причаливания на математическом моделирующем программном комплексе SES (software engineering system) реального времени с различными вариантами начальных условий, в обозначения которых добавлялась аббревиатура RT (real time) или NRT (non real time). При моделировании причаливания в реальном времени управление манипулятором обеспечивал оператор, задающий требуемые скорости движения модуля с помощью двух управляющих рукояток на основе визуальной информации от прицельной и обзорных телекамер. В этом режиме осуществлялось необходимое выравнивание стыковочных агрегатов, время достижения сцепки могло достигать 15 мин.

Варианты причаливания не в реальном времени были промоделированы без участия оператора на основе предположения о реализации простейшего управления — задании только максимальной осевой скорости сближения 1.9 см/с. При этом параметры начальных условий были равномерно распределены в диапазоне, определяемом возможностями стыковочных агрегатов.

При моделировании обоих режимов управления использовалась разработанная в JSC NASA приближенная несертифицированная математическая модель взаимодействия стыковочных агрегатов. С целью тестирования полученные результаты необходимо было сопоставить с аналогичными данными, полученными при полунатурном моделировании причаливания на 6-степенном стенде PKK "Энергия". Для поддержки такой отработки NASA предоставила результаты моделирования и дала возможность специалистам PKK "Энергия" не только принять участие в тренировках штатных операторов, но и самим получить начальные навыки управления манипулятором в процессе причаливания российского модуля.

Основной целью испытаний на 6-степенном стенде являлось подтверждение возможности стыковки модуля МИМ1 с помощью реальных агрегатов типа "штырь-конус" при начальных условиях, реализуемых манипулятором SSRMS. Второй задачей испытаний было получение данных, необходимых для валидации контактной модели, разработанной для программного комплекса SES реального времени NASA. В программу испытаний вошли 10 вариантов начальных условий RT и 10 наихудших вариантов NRT. Начальные условия задавались в виде углов в шарнирах манипулятора, а также линейных и угловых рассогласований стыковочных интерфейсов. Для возможности сравнения результатов испытаний, полученных на SES и на 6-степенном стенде, была сохранена нумерация вариантов, используемая NASA.

Структурная схема 6-степенного стенда при отработке причаливания модуля МИМ-1 приведена на рис. 2. Были использованы уравнения движения манипулятора и модуля, описанные в [15], но основание манипулятора считалось неподвижным, так как инерция МКС почти на 2 порядка больше, чем у всех движущихся тел механической системы. Значения матрицы жесткости для конфигурации SSRMS при причаливании МИМ-1 предоставило Канадское космическое агентство. Геометрические и инерционные параметры звеньев манипулятора были получены из [17], а параметры моделей приводов, одинаковых для всех шарниров SSRMS, были взяты такими же, как у привода корневого шарнира манипулятора SRMS [18]. Алгоритм управления манипулятором SSRMS по скорости от задающих рукояток с учетом обхода сингулярных конфигураций и наличием кинематических зон торможения в шарнирах был разработан самостоятельно по аналогии с алгоритмами, изложенными в [19].

Дискретные датчики стыковочного механизма активного агрегата системы типа "штырь-конус", используемой для стыковки модуля МИМ-1, фиксируют наступление характерных событий. В частности, сигнал датчика DK1 указывает на контакт головки штыря с приемным конусом, сигнал датчика DSG — на возникновение сцепки, т.е. захвата головки в гнезде приемного конуса при срабатывании защелок, сигнал датчика DK2 — на контакт головки штыря с дном приемного гнезда. Сигнал сцепки означает успешное выполнение причаливания, сигнал DK2 в данной операции предназначен для контроля движения головки в гнезде приемного конуса. Сигналы аналоговых датчиков характеризуют относительные перемещения звеньев осевого и

ГОЛУБЕВ, ЯСКЕВИЧ



Рис. 7. Изображения с прицельной телекамеры (*a*) и с обзорных телекамер (*б*) при гибридном моделировании причаливания модуля МИМ-1

бокового демпферов механизма, т.е. направление и интенсивность контактного взаимодействия стыковочных агрегатов: LPS — ход осевого демпфера, BPR и BPT — боковые отклонения штанги во взаимно перпендикулярных направлениях. При гибридном моделировании значения датчиков поступали в программу моделирования движения управляющего компьютера и на пульт управления системой стыковки.

При отработке причаливания на 6-степенном стенде использовались рукоятки управления манипулятором, телекамеры, мишень и мониторы, имевшиеся в распоряжении РКК "Энергия". Предполагалось (и впоследствии было подтверждено на практике), что существующие различия в аппаратуре компенсируются адаптивными способностями человека-оператора. Прицельная телекамера была установлена на подвижной платформе, мишень — на неподвижной части стенда, а две обзорных телекамеры — на стенах стендового зала. Получаемые с них изображения по-казаны на рис. 7.

Результат гибридного моделирования каждого варианта представлял собой файл, содержащий задаваемые сигналы управления от рукояток, скорости и углы поворотов в шарнирах манипулятора, кинематические параметры модуля, сигналы с дискретных и аналоговых датчиков стыковочного механизма активного агрегата. Для упрощения оперативного анализа большого объема разнородных данных использовалась программа визуализации, генерирующая динамическую мнемосхему – интегрированное многооконное представление процесса причаливания (см. рис. 8). Ее верхнее окно (1) отображает информацию о контактном взаимодействии стыковочных агрегатов – их каркасную модель, кинематические параметры относительного движения стыковочных агрегатов, сигналы дискретных и аналоговых датчиков стыковочного механизма. В окне (2) в центре мнемосхемы отображаются конфигурация (углы в шарнирах и геометрия) манипулятора и направления осей его шарниров, сигналы управления, снимаемые с левой (HL1-HL3) и правой (HR1–HR3) рукояток. В масштабируемом с помощью "мыши" окне (3) показываются относительные положения стыкуемых объектов, стыковочных агрегатов, телекамеры прицеливания и мишени. В нижнем окне отображаются контактные силы или другие параметры процесса в виде функций времени. Вертикальная черта в центре соответствует текущему времени моделирования. Программа визуализации связана с файлом результатов очередного варианта моделирования. При его последовательном просмотре временные функции в нижнем окне перемещаются слева направо, проходя через ось текущего времени. Их численные значения отображаются в левой части нижнего окна. В соответствии с изменяющимся текущим временем моделирования изменяется и содержимое верхнего и центральных окон мнемосхемы.

На рис. 8 и в анимационном файле, доступном по ссылке, указанной в подрисуночной подписи в работе [20], представлены результаты гибридного моделирования варианта NRT-74, в котором оператор задает левой рукояткой только скорость движения вперед, без углового и бокового выравнивания стыковочных агрегатов. Такой вариант реализуется за более короткое время. В данном случае сцепка достигается на 48-й с, осевая контактная сила, незначительно превышающая 1000 H, создается в основном при ударе головки штанги в дно гнезда приемного конуса изза того, что при таком управлении манипулятор не останавливается при сцепке. Для уменьшения объема указанного анимационного файла скорость отображения этого процесса увеличена в 4 раза. Однако не во всех вариантах "грубого" управления достигается сцепка. При больших



Рис. 8. Динамическая мнемосхема, визуализирующая процесс причаливания модуля МИМ-1 (вариант NRT-74 – управление без выравнивания)

боковых и угловых промахах головка штыря упиралась в приемный конус и приводы манипулятора не могли преодолеть сопротивление контактной реакции.

При гибридном моделировании RT-вариантов (точное наведение с выравниванием) оператор, управляющий манипулятором, периодически выполнял относительное выравнивание стыковочных агрегатов, и успешность достижения сцепки определялась уровнем его тренированности. Опыт, полученный на программном комплексе SES реального времени NASA, позволил сформировать правильные навыки управления, которые обеспечили качественное выравнивание стыковочных агрегатов перед началом контакта и уровень нагрузок, приемлемый для SSRMS. На рис. 9 задаваемые оператором сигналы управления и изменения относительного положения стыковочных агрегатов, полученные в результате гибридного моделирования причаливания (вариант RT-3), представлены в виде графиков. Более точное управление реализуется оператором на более длительном интервале времени по сравнению с NRT-вариантами и в работе [20] средствами анимации не иллюстрируется из-за больших размеров видеофайлов.

Сначала оператор выполнял угловое выравнивание (1) с использованием информации от обзорных телекамер, а затем устранение бокового промаха (2) по изображению мишени, передаваемому прицельной телекамерой.

На завершающем этапе он задавал в основном скорость сближения (*3*) и осуществлял незначительную коррекцию боковых промахов и угловых рассогласований. На рис. 10 для этого варианта приведены графики показаний упомянутых выше дискретных и аналоговых датчиков стыковочного механизма и измеренных контактных сил, значительно меньших по амплитуде, чем в варианте NRT-74 управления без выравнивания (более 1000 Н на рис. 8 и в анимационном файле).



Углы ориентации активного стыковочного агрегата относительно пассивного



В ходе полунатурной отработки причаливания модуля МИМ-1 на 6-степенном стенде были получены следующие основные результаты.

1. При точном управлении (RT-варианты) с относительным выравниванием стыковочных агрегатов всегда достигается сцепка и контактные нагрузки не превышают уровней, допустимых для манипулятора.

2. При грубом управлении (NRT-варианты) нагрузки на манипулятор могут превышать допустимые для него пределы, а сцепка стыковочных агрегатов может быть недостижима.

3. Основным источником информации при угловом выравнивании по тангажу и рысканию являются изображения стыковочных агрегатов, получаемые с обзорных телекамер, последующее устранение бокового промаха и крена осуществляется с применением прицельной телекамеры.

4. Обеспечена валидация программного комплекса SES, используемого для тренировки операторов по управлению манипулятором.

ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ



Рис. 10. Показания дискретных и аналоговых датчиков, контактная сила при движении головки штыря стыковочного механизма по приемному конусу и в его гнезде (вариант RT-3 — управление с выравниванием)

Заключение. Представлен предложенный и реализованный РКК "Энергия" способ экспериментальной отработки причаливания КА на основе гибридного моделирования на 6-степенном динамическом стенде. При последующем анализе различных операций причаливания были использованы математические модели манипуляторов с возрастающей степенью детальности. В ходе объединенных исследований на 6-степенном стенде, проведенных специалистами NASA, Канадского космического агентства и РКК "Энергия", была подтверждена возможность выполнения причаливания к МКС модуля МИМ-1 (Рассвет) станционным манипулятором SSRMS при условии точного наведения (выравнивания) в процессе сближения. Данная операция 18 мая 2010 г. впервые была успешно реализована на орбите. Опыт, полученный в процессе такой экспериментальной отработки, используется при наращивании МКС и может быть полезен при построении космических станций следующего поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. https://ru.wikipedia.org > wiki > Рассвет_(модуль_МКС). Дата обращения 09.01.2020.
- Sadchev S.S., Fuller B.R. The Shuttle Remote Manipulator System and Its Use in Orbital Operations // The Space Congress Proceedings. Cocoa Beach, FL, 1983 (20th) Space: The Next Twenty Years. URL: http://commons.erau.edu/space-congress-proceedings. Дата обращения 16.01.2020.
- 3. Canadaarm2's Data Sheet. URL: https://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/canadarm2/data-sheet.asp. Дата обращения 16.01.2020.
- 4. Mobile Servicing System. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_Servicing_System.
- 5. Japanese Experiment Module Remote Manipulator System. URL: http://iss.jaxa.jp/en/kibo/about/kibo/rms/. Дата обращения 16.01.2020.
- 6. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Canadarm2_Latching_End_Effector_(ISS049-E-004178).jpg. Дата обращения 16.01.2020.

ГОЛУБЕВ, ЯСКЕВИЧ

- 7. https://www.wikiwand.com/en/Grapple_fixture. Дата обращения 16.01.2020.
- 8. Сыромятников В.С. Стыковочные устройства космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1984. 216 с.
- 9. *McLaughlin R.J., Warr W.H.* The Common Berthing Mechanism (CBM) for International Space Station. https://spacecraft.ssl.umd.edu/design_lib/ICES01-2435.ISS_CBM.pdf. Дата обращения 16.01.2020.
- 10. *Ma O., Buhariwala K., Roger N., MacLean J., Carr R.* MDSF A Generic Development and Simulation Facility for Flexible, Complex Robotic Systems // Robotica, 1997. V. 15. P. 49–62.
- 11. *Gough V.E., Whitehall S.G.* Universal Tyre Test Machine // Proc. 9th International Technical Congr. FISITA. London: Institution of mechanical Engineers, 1962. P. 117–137.
- 12. *Stewart D*. A Platform with Six Degrees of Freedom // Proc. Institute of Mechanical Engineers. 1965. V. 180. Pt. 1. № 15. P. 371–386.
- 13. *Яскевич А.В.* Уравнения движения манипулятора и полезного груза для полунатурной экспериментальной отработки операции стыковки // Тр. центра научно-технической информации "Поиск". Сер. XXII. "Ракетно-космическая техника". 1993. № 4. С. 3–20.
- 14. *Яскевич А.В.* Разработка методов автоматизированного формирования процедур расчета движения механических систем космических манипуляторов для полунатурного моделирования процессов управления: Дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
- 15. *Яскевич А.В.* Математическая модель космического манипулятора для полунатурной отработки операций причаливания полезного груза // Изв. РАН. ТиСУ. 2004. № 4. С. 157–176.
- 16. Черный И. Сентябрьская космическая демонстрация HTV // Новости космонавтики. 2009. № 11. С. 17–19.
- Nguyen P.K. Teleoperation: From the Space Shuttle to the Space Station. Progress in Astronautics and Aeronautics. V. 161. Teleoperation and Robotic in Space / Eds. S.B. Skaar, C.F. Ruoff. N.Y.: Amer. Inst. of Astronautics and Aeronautics Inc., 1994. P. 353–410.
- Payload Deployment and Retrieval System Simulation Database // SPAR-RMS-TM.2163. Bramton: SPAR Aerospace Ltd., 1996.
- 19. Space Shuttle Orbiter. Operational Level C. Functional Subsystem Software Requirements. Remote Manipulator System (RMS). STS87-0017-26. Houston: NASA/JSC, 1996.
- 20. *Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В.* Гибридное моделирование на 6-степенном стенде причаливания космических аппаратов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 117. 24 с. https://doi.org/10.20948/prepr-2019-117, URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-117.