



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • [Электронная библиотека](#)

[Препринты ИПМ](#) • [Препринт № 117 за 2019 г.](#)



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

[Голубев Ю.Ф.](#), Яскевич А.В.

Гибридное моделирование
на 6-степенном стенде
причаливания космических
аппаратов

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: 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. doi:[10.20948/prepr-2019-117](https://doi.org/10.20948/prepr-2019-117)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-117>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

Ю.Ф. Голубев, А.В. Яскевич

**Гибридное моделирование
на 6-степенном динамическом стенде
причаливания космических аппаратов**

Москва — 2019

Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В.

Гибридное моделирование на 6-степенном динамическом стенде причаливания космических аппаратов

В настоящей работе описаны основные особенности гибридного моделирования процесса причаливания космических аппаратов, то есть их стыковки с использованием космического манипулятора. При таком моделировании исполнительный механизм и относительное движение соединяемых объектов описываются математической моделью, а стыковочные агрегаты представлены реальными экземплярами. Относительное движение этих агрегатов воспроизводится на 6-степенном стенде, управляемом компьютером.

Ключевые слова: космический аппарат, причаливание, стыковочный механизм, космический манипулятор, 6-степенной стенд

Golubev Yu.F., Yaskевич A.V.

Spacecraft berthing hybrid simulation by using 6-DOF facility

This paper describes main features of hybrid simulation of spacecraft berthing, i.e. their docking by using space robotic arm. Arm and relative motion of joined objects in such simulation are described by math model and docking units are represented as real copies. Relative motion of these units are reproduced by computer controlled 6-DOF facility.

Key words: spacecraft, berthing, docking mechanism, space robotic arm, 6-DOF facility

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ: 19-01-00123)

Оглавление

Введение	3
1. Операции, выполняемые космическими дистанционно управляемыми манипуляторами	4
2. Гибридное моделирование процесса причаливания космических аппаратов	7
3. Спроектированные и реализованные операции причаливания и их экспериментальная отработка	10
4. Экспериментальная отработка причаливания модуля МИМ1 к международной космической станции	15
Заключение.....	23
Библиографический список.....	23

Введение

Одним из вариантов соединения космических аппаратов на орбите является их стыковка с использованием космического манипулятора. Она выполняется в тех случаях, когда один из соединяемых аппаратов доставляется другим в виде полезного груза или когда при соединении не используются стыковочные механизмы, которые могут обеспечить компенсацию промаха и поглощение энергии сближения. Манипулятор, установленный на одном из аппаратов, выполняет функции системы сближения, перемещает другой объект, создавая условия для образования первичной механической связи стыковочных интерфейсов, окончательное жесткое соединение которых выполняет отдельный механизм. В англоязычной литературе такая операция получила название *berthing* (причаливание, швартовка). Точность наведения, необходимая для образования первичной механической связи, обеспечивается включением в контур управления манипулятором человека-оператора.

При наземной отработке подобных операций актуальной проблемой является адекватный учет пространственных динамических и упругих свойств исполнительного механизма манипулятора в реальном времени, в котором действует оператор. Физическое, натурное моделирование с использованием 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 космических аппаратов разработаны специально с учетом использования только манипулятора. В этом случае для образования первичной механической связи они имеют направляющие элементы и очень простые механизмы без устройств демпфирования. Такое упрощение конструкции позволяет использовать компьютерный моделирующий стенд, включающий человека-оператора в контур управления.

Относительные перемещения стыковочных агрегатов в процессе их соединения невелики. Поэтому если первичная механическая связь создается до совмещения их стыковочных плоскостей (до их жесткого контакта), то для наземной отработки может быть использовано гибридное моделирование причаливания 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, уравнениями движения, интегрирование которых осуществляется в реальном времени. Такая схема экспериментальной отработки была впервые предложена и реализована в ракетно-космической корпорации (РКК) «Энергия».

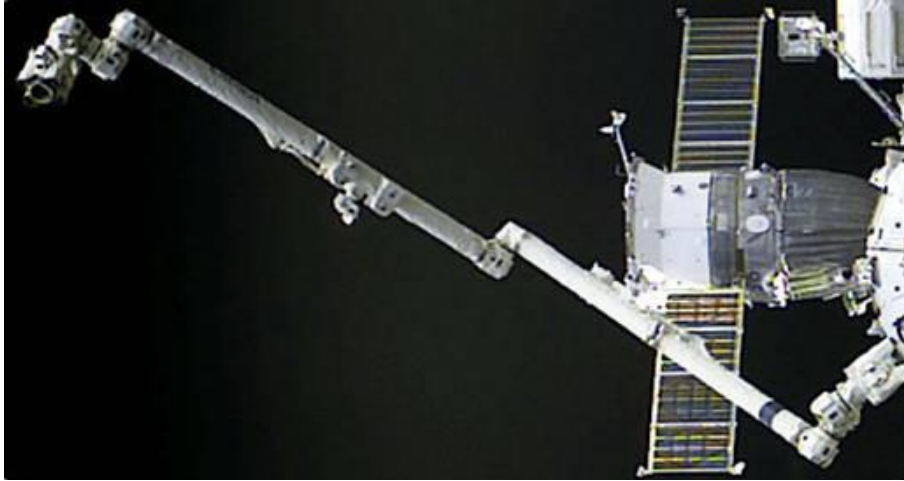
В данной работе рассматривается схема 6-степенного стенда, на котором реализуется гибридное моделирование причаливания, кратко излагается история выполненных экспериментов и используемых при этом моделей, более подробно рассматривается отработка стыковки модуля МИМ1 к международной космической станции манипулятором SSRMS.

1. Операции, выполняемые космическими дистанционно управляемыми манипуляторами

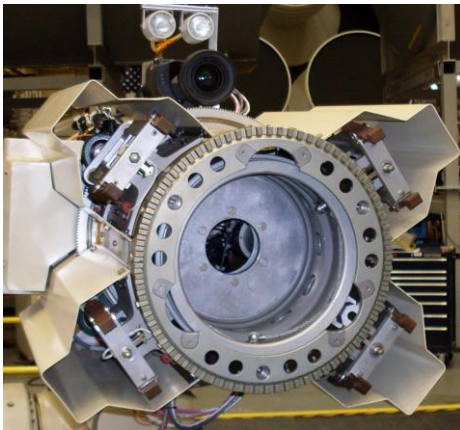
Появление и применение дистанционно управляемых космических манипуляторов обусловлено увеличением размеров космических аппаратов, расширением сферы их применения и необходимостью облегчения деятельности космонавтов на их внешней поверхности. Первые дистанционно управляемые манипуляторы входили в состав американских многоразовых космических кораблей типа Space Shuttle и имели общее название SRMS (Shuttle Remote Manipulator System) [1]. Они обеспечивали захват свободно летающих объектов, их перемещение 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 многосуставными 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, находящемуся вне кабины, на передвижном рабочем месте, которое перемещал манипулятор.

При строительстве и эксплуатации международной космической станции (МКС) начал активно использоваться манипулятор SSRMS (Space Station Remote Manipulator System) [2,3], который также был антропоморфным, но имел семь степеней подвижности (рис. 1.а). 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, обеспечивая доступ к ним. Рабочие места оператора для управления этим манипулятором расположены внутри модулей «Destiny» и «Cupola» американского сегмента МКС. Обслуживание японского модуля станции выполняет неподвижно установленный на нем дистанционно управляемый манипулятор [4], 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 и точное позиционирование относительно целевого устройства или сближение с ним. На первом этапе схват манипулятора (рис. 1.б) сближается с такелажным элементом (рис. 1.в), установленным на перемещаемом объекте. Механическое соединение обеспечивается за счет охвата конца такелажного элемента тросами схвата (рис. 1.г) и их последующего стягивания.



а



б



в



г

Рис. 1. а) Дистанционно управляемый манипулятор SSRMS международной космической станции, б) схват манипулятора с телекамерой, в) такелажный элемент с мишенью, г) захват такелажного элемента тросами схвата

Для точного наведения используются телекамера на схвате и мишень на такелажном элементе. Управление осуществляется оператором с помощью ручек управления на основе визуальной информации. Сигналы с этих ручек на основе решения обратной задачи кинематики манипулятора с учетом конструктивных ограничений пересчитываются в управляющие сигналы его приводов.

Перенос объекта манипулирования в заданную точку «сборки» осуществляется, как правило, в автоматическом режиме, под управлением компьютера. Это обусловлено ограниченными возможностями визуального наблюдения рабочего пространства, в котором осуществляется перемещение. Кроме этого, такой режим снимает нагрузку с 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 редук-

торов приводов и звеньев. Поэтому 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 практически невозможна эффективная тренировка операторов на реальном манипуляторе в наземных условиях, направленная на получение навыков управления.

С учетом относительно небольших размеров схвата и такелажного элемента процесс взятия такелажного элемента в наземных условиях можно воспроизвести с использованием гибридного моделирования, когда динамика их относительного движения моделируется в реальном времени на компьютере, а воспроизводится с помощью промышленного манипулятора. Так как штырь такелажного элемента имеет простейшую геометрию, то возможно создание математического стенда реального времени, моделирующего движение манипулятора и факт взятия такелажного элемента (без стягивания его тросами).

При строительстве и эксплуатации космических станций появилась потребность выполнения более сложной для манипулятора операции – присоединения к ней строительных модулей или космических кораблей. Такая операция в англоязычной литературе получила название *berthing* (причаливание, швартовка). Ей предшествует взятие манипулятором присоединяемого объекта и его перемещение в заданную область установки. Соединение модуля или корабля со станцией выполняется с помощью универсальных стыковочных [5] или специализированных устройств, например предназначенных только для причаливания с учетом точного наведения [6], которое может обеспечить манипулятор, управляемый оператором. При использовании простых специализированных устройств соединения корректное математическое моделирование их взаимодействия возможно в реальном времени на компьютерных стендах [7], которые могут быть использованы для проверки сценариев причаливания и тренировки операторов с целью получения навыков управления.

При причаливании космических аппаратов с использованием стыковочных агрегатов основной задачей оператора, управляющего манипулятором, является достижение сцепки, то есть 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.

Приведенная к схвату податливость исполнительного механизма манипулятора зависит от его конфигурации. Такелажный элемент, используемый для взятия, размещается на периферии объекта манипулирования. Поэтому при перемещении корабля или строительного модуля, который, как правило, имеет значительную массу, существует взаимное влияние его поступательных и угловых движений. Стыковочные механизмы, обеспечивающие достижение сцепки,

обладают различной податливостью и часто используются 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 использованием реального манипулятора, стыковочного агрегата и инерционного макета переносимого космического аппарата 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 корректным, так как в нем не реализуется пространственная траектория движения. Из-за использования опор его исполнительный механизм становится 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.

Компьютерные стенды реального времени, используемые в настоящее время для тренировки операторов, могут воспроизводить достаточно точно контактное взаимодействие только сравнительно простых устройств. Сложные стыковочные механизмы могут быть представлены в них упрощенными математическими моделями, адекватность которых необходимо подтверждать экспериментально в условиях слабого контактного взаимодействия агрегатов, свойственного операции причаливания с использованием манипулятора.

2. Гибридное моделирование процесса причаливания космических аппаратов

Перспективной альтернативой перечисленным методам может быть оценка реализуемости причаливания на 6-степенном динамическом стенде, разработанном в РКК «Энергия» и используемом для экспериментальной отработки агрегатов стыковки космических аппаратов. Адаптация такого стенда для отработки причаливания возможна, 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 для выполнения гибридного моделирования.

Для воспроизведения процесса в реальном времени используются реальные стыковочные агрегаты 1, относительное перемещение которых обеспечивает 6-ступенная платформа 2 с кинематикой Гью-Стьюарта [8, 9] и управляемыми гидроприводами 3. Один из агрегатов устанавливается на подвижной платформе, другой – на устройстве 4 измерения сил и моментов контактного

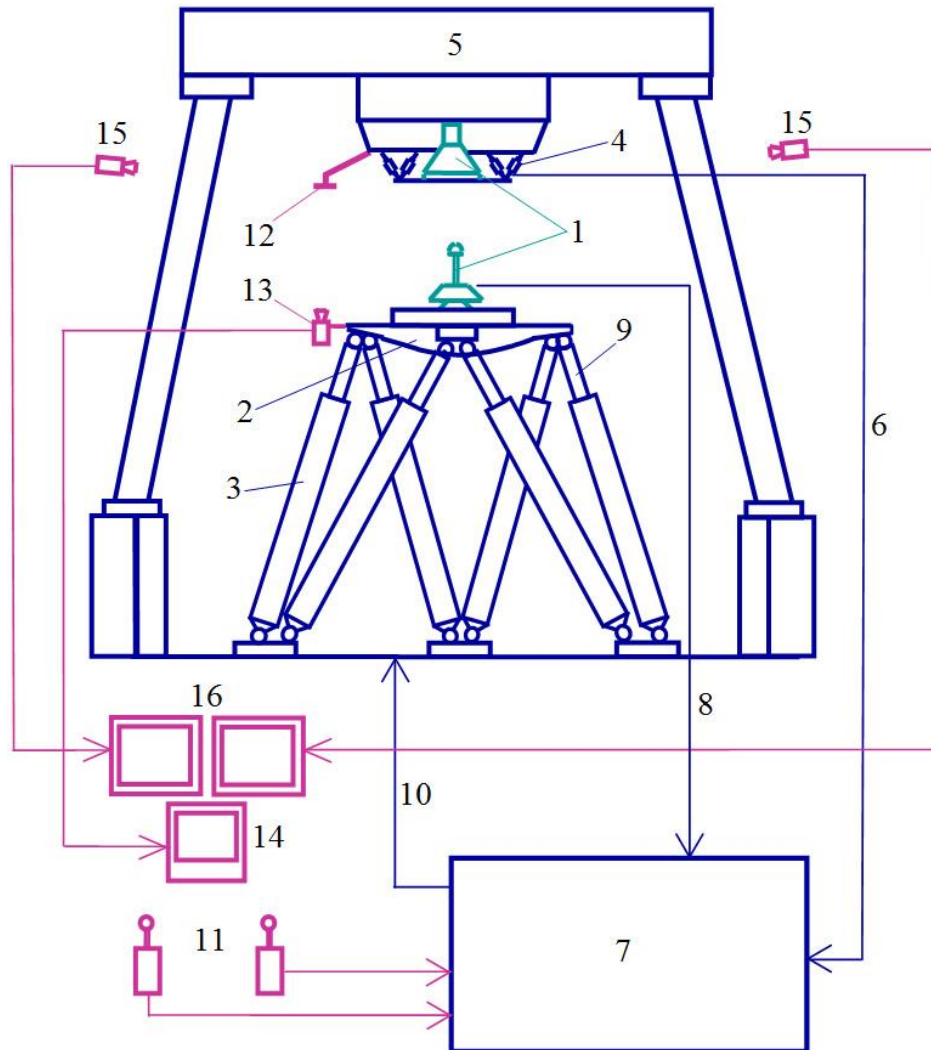


Рис. 2. Упрощенная схема 6-степенного стенда для отработки причаливания

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 космических аппаратов и вычисляют требуемые значения относительных положений и скоростей стыковочных агрегатов. 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 уравнений движения являются геометрические и инерционные характеристики стыкуемых космических аппаратов, вычисляемые в модели значения сил и моментов, создаваемых системой управления активного объекта, измеренные значения сил и моментов контакт-

ного взаимодействия и показания датчиков 8 стыковочного механизма активного агрегата. В третьих, на основе решения обратной задачи кинематики для платформы Гью-Стюарта они пересчитывают относительные положения и скорости стыковочных агрегатов в требуемые линейные перемещения и скорости штоков 9 гидроприводов. Эти управляющие сигналы 10 подаются на входы регуляторов каждого отдельного гидропривода. Основные компоненты стенда, используемые при отработке стыковки, и дополнительные для отработки причаливания показаны различными цветами.

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 сил и моментов контактного взаимодействия. Управление стыковочным механизмом активного стыковочного агрегата – приведение его в исходное перед стыковкой или втянутое положение, осуществляется отдельным пультом.

Гибридное моделирование при реализации каждого варианта программы испытаний при экспериментальной отработке стыковки реализуется следующим образом. Предварительно подвижная платформа автоматически в программном режиме управления выводится в заданную точку с заданной относительной скоростью, которые соответствуют начальным условиям для стыковочных агрегатов и в реальном полете должны быть обеспечены космическим манипулятором. После этого управление осуществляется в замкнутом контуре, то есть на основе решения системы дифференциальных уравнений относительного движения стыкуемых космических аппаратов 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 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. Очередное испытание завершается при достижении заданного максимального значения модельного времени или аварийно, в случае превышения заданных максимальных значений сил и моментов контактного взаимодействия. В файлах результатов для возможности последующей обработки кроме значений измеренных контактных сил и моментов запоминаются относительные положения и скорости стыкуемых космических аппаратов и агрегатов, показания датчиков стыковочного механизма – дискретных и аналоговых, фиксирующих движение звеньев устройств демпфирования.

При воспроизведении на 6-степенном стенде причаливания космических аппаратов реализуемая компьютером модель движения использует дифферен-

циальные уравнения и 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 космическом аппарате рядом с его стыковочным агрегатом, и монитора 14 на рабочем месте оператора. При необходимости выполнения коррекции относительной угловой ориентации стыкуемых космических аппаратов используются дополнительные обзорные телекамеры 15 и мониторы 16. Все элементы установки, используемые при гибридном моделировании причаливания, выделены другим цветом.

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. Испытание завершается при достижении сцепки или аварийно из-за превышения допустимых величин контактных сил и моментов.

Реальные стыковочные агрегаты и 6-ступенной стенд до настоящего времени имеются в наличии только в РКК «Энергия». Это частично определило российский приоритет в данном виде экспериментальной отработки операции причаливания космических аппаратов.

3. Спроектированные и реализованные операции причаливания и их экспериментальная отработка

Потребность экспериментальной оценки возможности причаливания космического аппарата манипулятором впервые возникла в 80-е годы XX века 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 (рис. 3) 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.

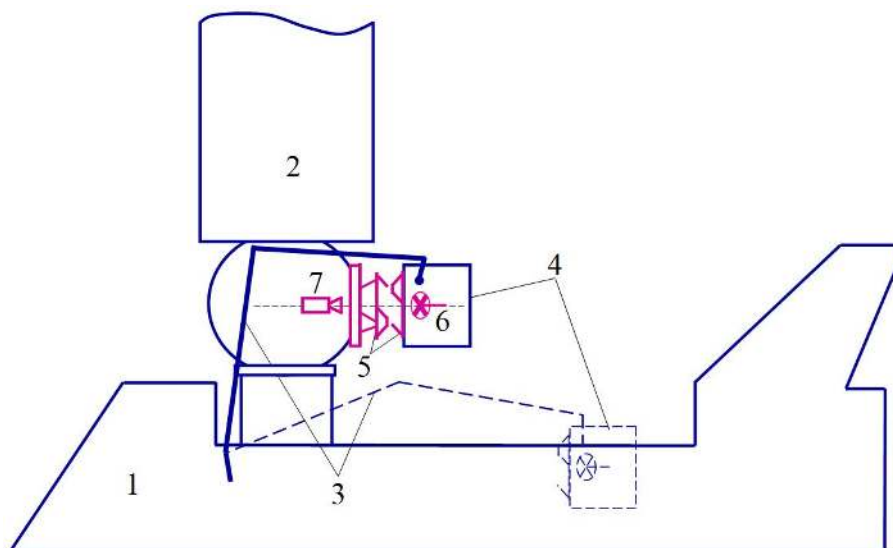


Рис. 3. Упрощенная схема причаливания блока научной аппаратуры к станции бортовым манипулятором многоразового космического корабля

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

Использовать 6-ступенной стенд для оценки возможности выполнения этой операции было впервые предложено А.В. Яскевичем в 1989 г. Им была разработана упрощенная модель динамики механической системы «манипулятор-полезный груз» [10]. 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 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 резуль-

тате 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 выполнена 14 ноября 1995 г. в ходе полета многоразового транспортного космического орбитального корабля Space Shuttle НАСА (полет STS-74) при доставке к орбитальной станции «Мир» стыковочного отсека (рис. 4.а). По оценке специалистов NASA и Rockwell Int., сила, развиваемая бортовым манипулятором SRMS (Shuttle Remote Manipulation System) 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. После этого выполнялась обычная стыковка связки «корабль + стыковочный отсек» к станции «Мир».

В последующем подобная операция была выполнена дважды для соединения первых модулей международной космической станции (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.б). По ранее отработанной схеме сначала модуль NODE1 (6) 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 космического аппарата 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 «штырь-конус», обеспечивающей более легкие условия для сцепки, чем периферийные агрегаты АПАС. Проводился двусторонний анализ данной операции при взаимном обмене исходными данными.

Специалисты NASA разрабатывали упрощенную модель стыковочного механизма типа «штырь» и использовали математический стенд реального времени SES (Software Engineering System). В РКК «Энергия» была разработана модель манипулятора для гибридного моделирования операции на 6-степенном

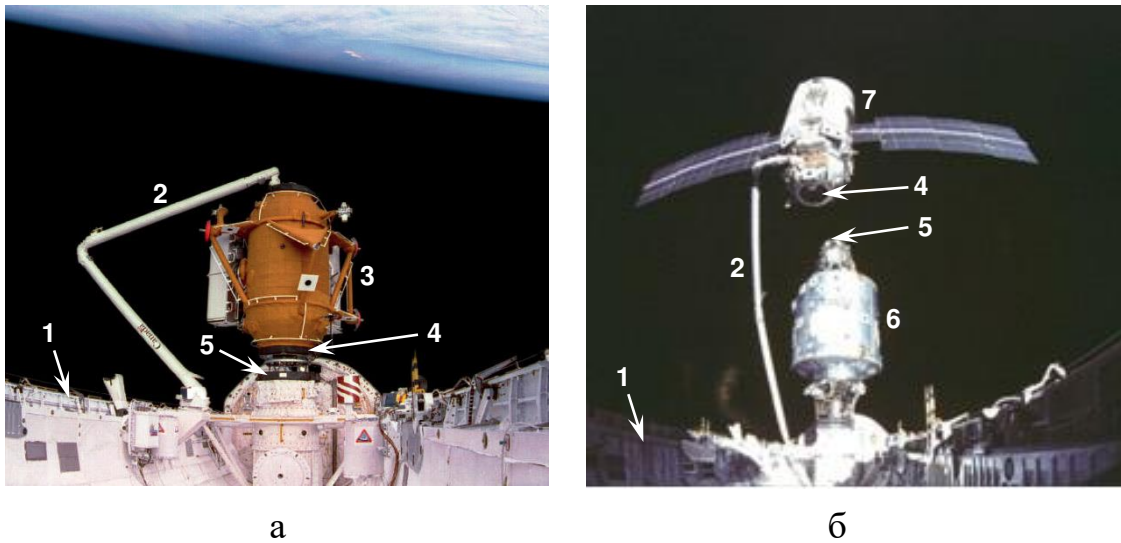


Рис. 4. а) Подведение манипулятором SRMS (Shuttle Remote Manipulation System) в позицию для стыковки стыковочного отсека к ОК кораблю Space Shuttle в полете STS-74; б) модуля ФГБ (Функционально-Грузовой Блок) к связке Space Shuttle+NODE1 в полете STS-88.

стенде с использованием реальных стыковочных агрегатов типа «штырь-конус». Для управления стендом использовался компьютер, расположенный в непосредственной близости от подвижной платформы, более мощный, чем предшествующий. Это позволило применить более детальную модель манипулятора [11]. 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 модуль стартовал в соответствии с графиком.

В 2003-2004 гг. для проверки возможности достижения сцепки при использовании периферийных агрегатов АПАС была разработана модель операции причаливания [12], 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 в составе 6-степенного стенда при экспериментальной оценке возможности причаливания российского модуля МИМ1 (Малый Исследова-

тельский Модуль 1) к МКС стационарным манипулятором SSRMS (Space Station Remote Manipulator System). Эта операция была успешно реализована 18 мая 2010 г. в полете STS-132 корабля Space Shuttle к МКС. Более подробно ее экспериментальная отработка рассматривается в следующем разделе.

Причаливание в полном объеме, без использования реактивных двигателей космических аппаратов, в реальном полете было впервые выполнено в сентябре 2009 г. [13]. Японский грузовой корабль HTV был присоединен к МКС с использованием агрегатов СВМ (Common Berthing Mechanism) [6], специально разработанных 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 стенд, что оказалось вполне оправданным при существующей конструкции агрегатов. В настоящее время манипулятор SSRMS регулярно выполняет причаливание к МКС грузовых кораблей HTV и Dragon.

В августе 2014 г. в РКК «Энергия» на 6-ступенном стенде была выполнена экспериментальная оценка возможности причаливания с использованием новых стыковочных агрегатов, разработанных специально для таких операций. Активный агрегат (1) (рис. 5) для сцепки использует очень простой, без устройств демпфирования, механизм (2) типа «штырь» с приводом. Пассивный агрегат (3) имеет приемный конус (4), малый диаметр которого соответствует возможностям манипулятора при сближении объектов. Для наведения используются иллюминатор (5) для телекамеры, расположенной внутри, и мишень (6). Направляющие элементы (7) обеспечивают выравнивание агрегатов при их стягивании.

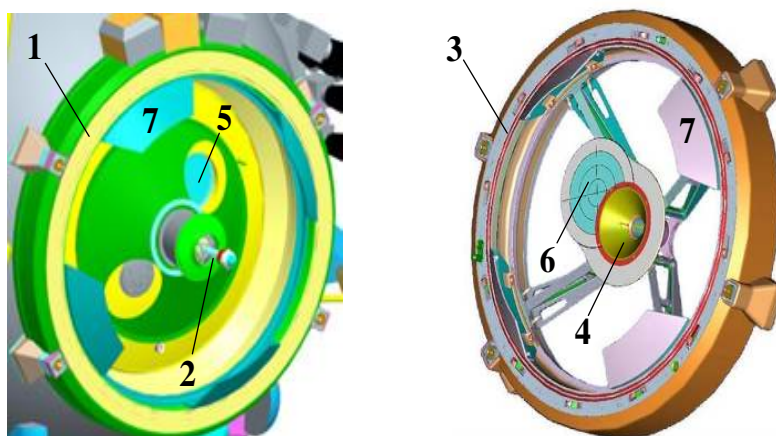


Рис. 5. Активный и пассивный агрегаты разработки РКК «Энергия» для выполнения причаливания

4. Экспериментальная отработка причаливания модуля МИМ1 к международной космической станции

Проектирование процесса установки модуля МИМ-1 (Малый Исследовательский модуль 1) на модуль ФГБ (Функционально-Грузовой Блок) 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 стационарным манипулятором SSRMS в автоматическом режиме управления. После этого оператор, управляя манипулятором SSRMS [10], должен был обеспечить сцепку двух агрегатов российской системы стыковки типа «штырь-конус» [5] (рис. 6).



а



б

Рис. 6. а) Конфигурация манипулятора SSRMS при причаливании модуля МИМ-1 (данные NASA), б) активный и пассивный стыковочные агрегаты системы «штырь-конус»

Допустимые нагрузки на элементы манипулятора значительно меньше, чем для стыковочных агрегатов. Поэтому большие скорости сближения недо-

пустимы. 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 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. 7) телевизионное изображение (1) с прицельной телекамеры на модуле МИМ-1, изображение (2) с обзорной камеры на ферме S1L американского сегмента и изображение (3) с обзорной камеры на кисти манипулятора SRMS.

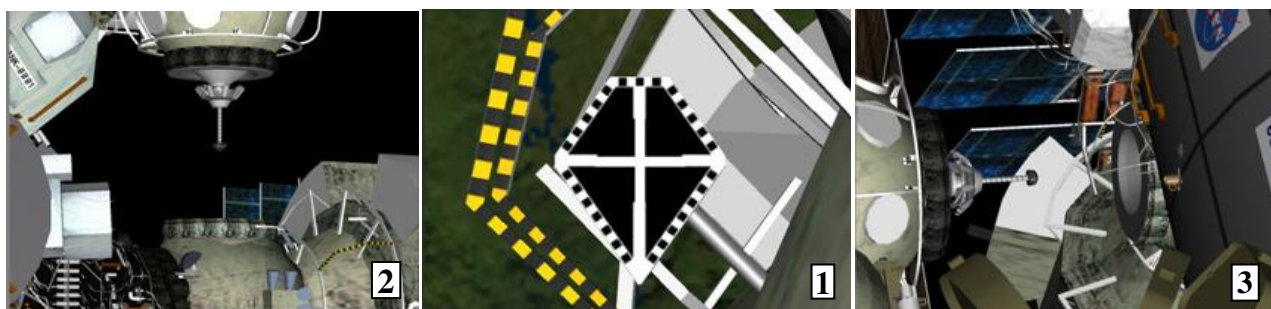


Рис. 7. Модели изображений с телекамер на математическом стенде реального времени NASA

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 центра им. Л. Джонсона NASA были определены два режима моделирования причаливания на математическом моделирующем стенде

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/сек. 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 РКК «Энергия». Для поддержки такой отработки NASA предоставила результаты моделирования и дала возможность специалистам РКК «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 использованием реальных агрегатов типа «штырь-конус» при начальных условиях, реализуемых манипулятором SSRMS. Второй задачей испытаний было получение данных, необходимых для верификации контактной модели, используемой на математическом стенде реального времени NASA. В программу испытаний вошли 10 вариантов начальных условий реального времени (RT) и 10 наихудших вариантов нереального времени (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 [12], но основание манипулятора считалось неподвижным, так как инерция МКС почти на два 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 [14], а параметры моделей приводов, одинаково-

вых для всех шарниров SSRMS, были взяты такими же, как у привода корневого шарнира манипулятора SRMS [15]. Алгоритм управления манипулятором SSRMS по скорости от задающих рукояток с учетом обхода сингулярных конфигураций и наличием кинематических зон торможения в шарнирах был разработан А.В. Яскевичем самостоятельно, по аналогии с алгоритмами, изложенными в [16].

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, то есть 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 бокового демпферов механизма, то есть 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-ступенном 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 показаны на рис. 8.

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 разработанная сотрудником РКК «Энергия» И.Е. Чернышевым программа визуализации, генерирующая динамическую мнемосхему – интегрированное многооконное представление процесса причаливания (см. рис. 9). 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.



а)

б)

Рис. 8. а) Изображение с прицельной телекамеры при гибридном моделировании причаливания модуля МИМ-1;
б) изображения с обзорных телекамер

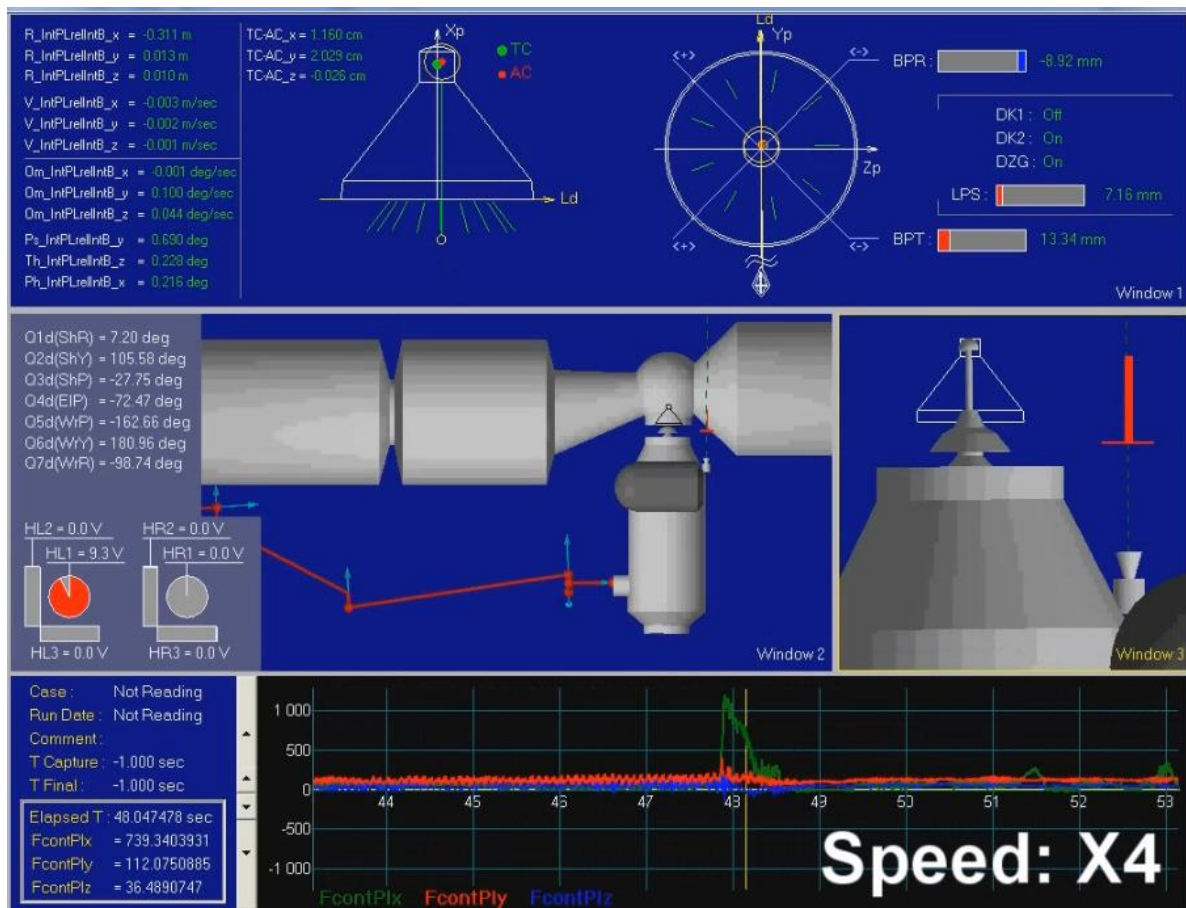


Рис. 9. Динамическая мнемосхема, визуализирующая процесс причаливания модуля МИМ-1 (вариант NRT-74 – управление без выравнивания)

Анимация мнемосхемы доступна отдельно по ссылке

https://keldysh.ru/e-biblio/golubev/MRM1_berthing_NRT-74_X4.mp4

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. 9 и в анимационном файле, доступном по ссылке, указанной в подписи, отображаются 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 секунде, осевая контактная сила, незначительно превышающая 1000 Н, создается в основном при ударе головки штанги в дно гнезда приемного конуса из-за того, при чем таком управлении манипулятор не останавливается при сцепке. Для уменьшения объема указанного анимационного файла скорость отображения этого процесса увеличена в четыре раза. Однако не во всех вариантах «грубого» управления достигается сцепка. При больших 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 математическом моделирующем стенде 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. 10 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 требует большего времени по сравнению с NRT-вариантами и в данной работе с помощью анимации не иллюстрируется из-за больших размеров видео файлов.

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

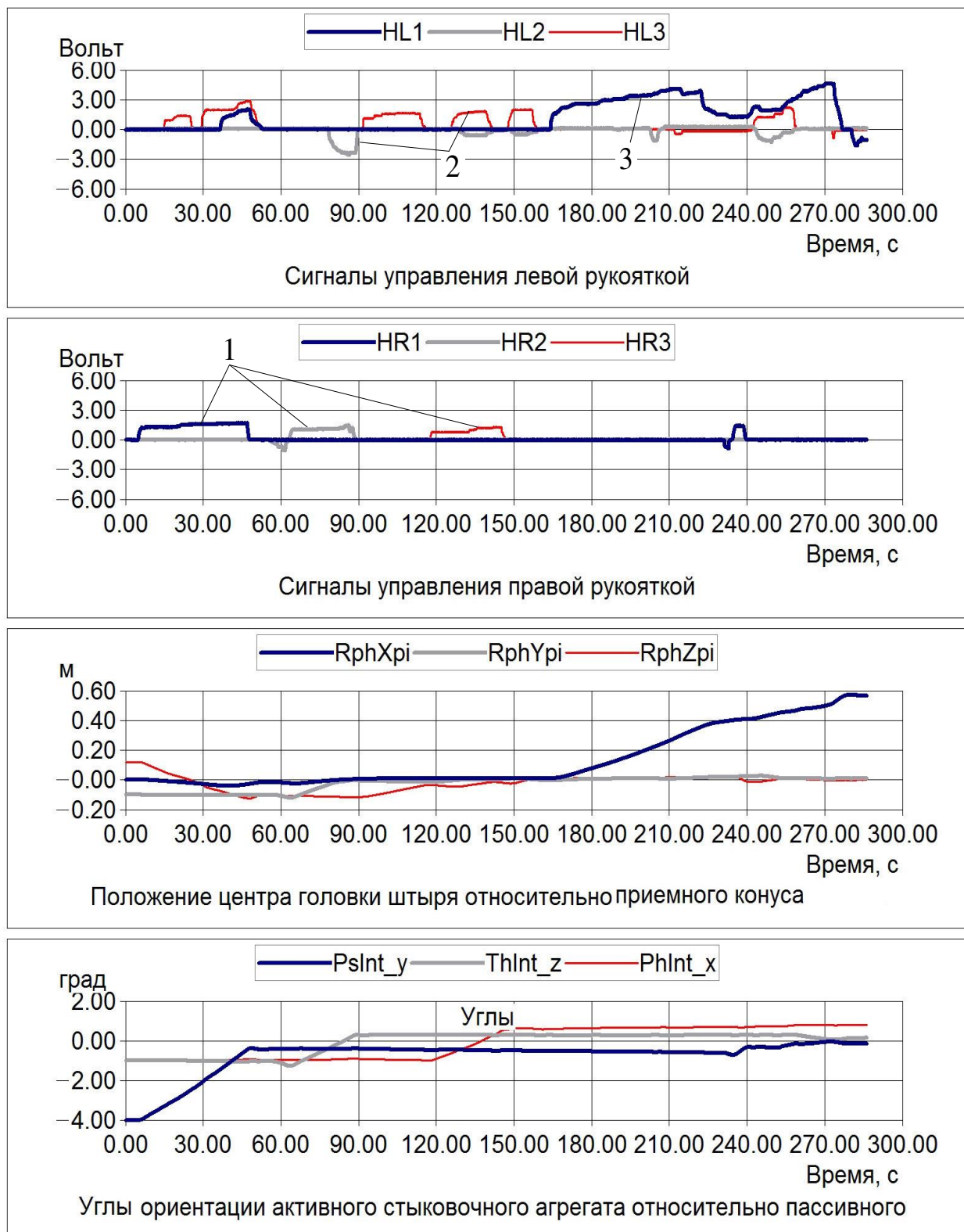


Рис. 10. Управление манипулятором и перемещаемым модулем в процессе причаливания (вариант RT-3 – управление с выравниванием)

На завершающем этапе он задавал в основном скорость сближения 3 и осуществлял незначительную коррекцию боковых промахов и угловых рассогласований. На рис.11 для этого варианта приведены графики показаний упо-

мянутых 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).

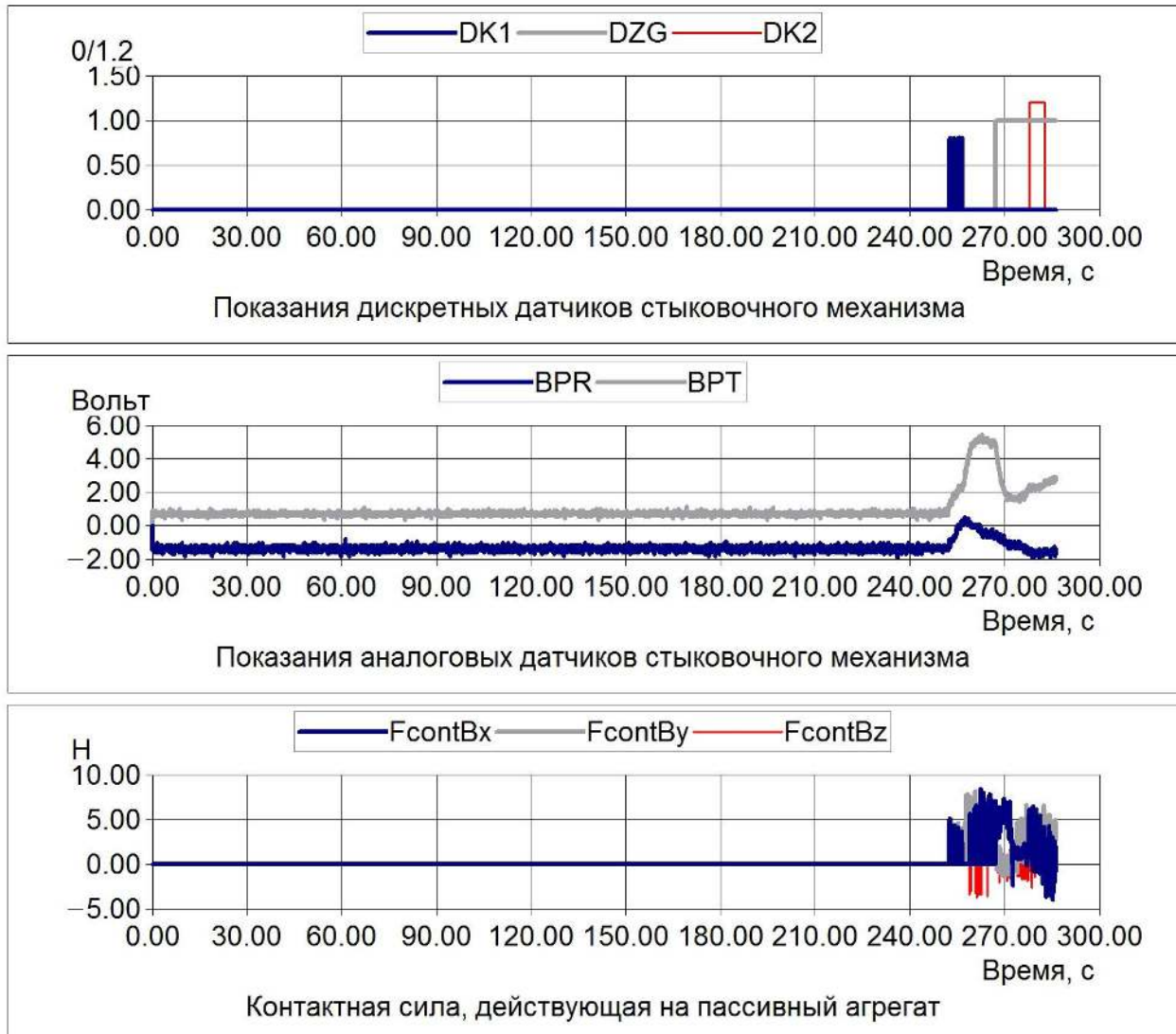


Рис. 11. Показания дискретных и аналоговых датчиков стыковочного механизма и контактные силы при движении головки штыря стыковочного механизма по приемному конусу и в его гнезде (вариант RT-3 – управление с выравниванием)

В ходе полунатурной отработки причаливания модуля МИМ-1 на 6-ступенном 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 использованием прицельной телекамеры.

Заключение

Впервые предложен и реализован способ экспериментальной отработки причаливания космических аппаратов 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 специалистов NASA, Канадского космического агентства и РКК «Энергия» на 6-степенном стенде была подтверждена возможность выполнения причаливания к международной космической станции модуля МИМ-1 стационарным манипулятором SSRMS при условии точного наведения (выравнивания) в процессе сближения. Данная операция впоследствии была успешно реализована на орбите. Опыт, полученный в процессе такой экспериментальной отработки, может быть использован при наращивании международной космической станции и при построении космических станций следующего поколения.

Библиографический список

1. Sadchev S.S., Fuller B.R. The Shuttle Remote Manipulator System and its use in orbital operations. // The Space congress Proceedings, 1983 (20th) Space: The Next Twenty Years. URL: <http://commons.erau.edu/space-congress-proceedings>
2. Canadaarm2's data sheet. URL: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/canadarm2/data-sheet.asp>
3. Mobile servicing system. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_Servicing_System
4. Japanese Experiment Module Remote Manipulator System. URL: <http://iss.jaxa.jp/en/kibo/about/kibo/rms/>
5. Сыромятников В.С. Стыковочные устройства космических аппаратов. - М.: Машиностроение. 1984. – 216 с.
6. 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
7. Ma O., Buhariwala K., Roger N., MacLean J., Carr R. MDSF – A generic development and simulation facility for flexible, complex robotic systems // *Robotica*. - 1997. – Vol. 15. - pp. 49-62.

8. Gough V. E., Whitehall S.G. Universal tyre test machine. Proceedings of the 9th International Technical Congress. FISITA, May, 1962, pp. 117-137.
9. Stewart D. A Platform with six degrees of freedom. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers. (London), Vol. 180, pt. 1, no. 15, 1965, pp. 371-386.
10. Яскевич А.В. Уравнения движения манипулятора и полезного груза для полунатурной экспериментальной отработки операции стыковки // Труды центра научно-технической информации “Поиск”, сер. XXII, “Ракетно-космическая техника”, 1993, N 4, с. 3-20.
11. Яскевич А.В. Разработка методов автоматизированного формирования процедур расчета движения механических систем космических манипуляторов для полунатурного моделирования процессов управления. Дисс. на соискание учетной степени канд. техн. наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999 г.
12. Яскевич А.В. Математическая модель космического манипулятора для полунатурной отработки операций причаливания полезного груза // Изв. РАН. Теория и системы управления, 2004, №4, с. 157-176.
13. Черный И. Сентябрьская космическая демонстрация НТВ. – Новости космонавтики, 2009, № 11, с. 17-19.
14. Nguyen P.K. Teleoperation: From the Space Shuttle to the Space Station. – Progress in astronautics and aeronautics, vol. 161, Teleoperation and robotic in space. Edited by S.B. Scaar, C.F. Ruoff, - 1994, pp. 353-410.
15. Payload Deployment and Retrieval System Simulation Database. SPAR-RMS-TM.2163. – Bramton: SPAR Aerospace Ltd., 1996.
16. Space Shuttle Orbiter. Operational Level C. Functional Subsystem software Requirements. Remote Manipulator System (RMS). STS87-0017-26. – Houston: NASA/JSC, 1996.