

Математический стенд для отработки управления манипулятором ERA на контактной фазе причаливания

© А.Г. Лесков¹, А.В. Яскевич², В.В. Илларионов¹,
С.Д. Морошкин¹, И.Е. Чернышев²

¹ Дмитровский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Дмитров Московской обл., 141801, Россия

² ОАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва», г. Королёв, Московская обл., 141070, Россия

Для осуществления причаливания — соединения различных объектов с использованием специализированных механических интерфейсов и обеспечения низкого уровня контактных нагрузок — необходимо высокоточное наведение, которое включает в контур управления космическим манипулятором человека-оператора, формирующего команды на основе информации, получаемой от телекамер. Система математического моделирования МРТЕ (Mission Preparation and Training Equipment) позволяет воспроизводить управление манипулятором ERA и все особенности его движения вместе с перемещаемым полезным грузом кроме контактного взаимодействия стыковочных интерфейсов. Разработан математический стенд для отработки управления манипулятором ERA на контактной фазе операций причаливания, а также для тренировки операторов.

Ключевые слова: математический моделирующий стенд, манипулятор ERA, контактная фаза причаливания.

Введение. Причаливание — соединение различных объектов с использованием специализированных механических интерфейсов и обеспечением низкого уровня контактных нагрузок — одна из основных сборочных операций, выполняемых космическими манипуляторами. Упругость исполнительного механизма манипулятора, инерция и удаленность центра масс полезного груза (ПГ) от такелажного элемента обуславливают возможность неуправляемых колебаний всей механической системы, вызывающих большие боковые и угловые рассогласования стыковочных интерфейсов и рост контактных сил. Высокоточное наведение в процессе причаливания обычно обеспечивается включением в контур управления манипулятором человека-оператора, который формирует команды на основе визуальной информации, получаемой от телекамер. Время выполнения операции и уровень контактных нагрузок зависят от выбора адекватных приемов управления и уровня подготовки оператора.

Отработка управления манипулятором SSRMS международной космической станции (МКС), в том числе и в операциях причалива-

ния, выполнялась на полунатурных [1] или математических [2–4] стендах реального времени. Последние обеспечивают наиболее корректное воспроизведение динамических свойств механической системы в декартовом пространстве, максимальную гибкость и минимальные затраты в процессе обработки. Средства математического моделирования [5] манипулятора ERA, доставляемого на МКС в составе многоцелевого лабораторного модуля (МЛМ), в настоящее время не позволяют воспроизводить контактное взаимодействие стыковочных интерфейсов.

Целью данной работы является создание математического стенда для обработки управления манипулятором ERA на контактной фазе операций причаливания, а также для тренировки операторов.

Структура математического стенда для обработки управления манипулятором ERA. Оператор манипулятора ERA использует стандартный бортовой Laptop МКС, программное обеспечение которого реализует графический интерфейс внутреннего пульта управления (IMMI). При причаливании относительное положение соединяемых объектов и стыковочных устройств отображается на трех видеомониторах, сигналы на которые подаются с прицельной и обзорной телекамер.

Силы контактного взаимодействия стыковочных устройств (СтУ) оказывают влияние на движение всей механической системы. Поэтому математический стенд для обработки управления манипулятором ERA на контактной фазе операций причаливания (рис. 1) состоит из трех взаимосвязанных программных подсистем: модели манипулятора ERA и перемещаемого ПГ, модели телекамер и модели контактного взаимодействия СтУ. В первой подсистеме компьютер 1 реализует модель движения исполнительного механизма и алгоритм решения обратной кинематической задачи манипулятора, а компьютер 2 — модель IMMI. Программное обеспечение компьютера 3 подсистемы моделирования телекамер генерирует для трех мониторов 3D-изображения, аналогичные формируемым прицельной и обзорными телекамерами. Исходной информацией для этого являются 3D-модели объектов и их относительное положение, вычисляемое в модели манипулятора. Программное обеспечение для расчета сил контактного взаимодействия СтУ функционирует на компьютере 4. Относительное положение стыковочных устройств вычисляется в модели манипулятора и ПГ. Контактные силы передаются в модель манипулятора. Вследствие относительно малых размеров СтУ прицельная и обзорные телекамеры не обеспечивают их видимость, необходимую для комфортного управления манипулятором. Поэтому для целей обработки и обучения используется еще одна каркасная графическая модель, отсутствующая в реальном процессе управления. Со-

ответствующая программа, отображающая относительное положение элементов СтУ и их точки контакта, функционирует на компьютере 5.

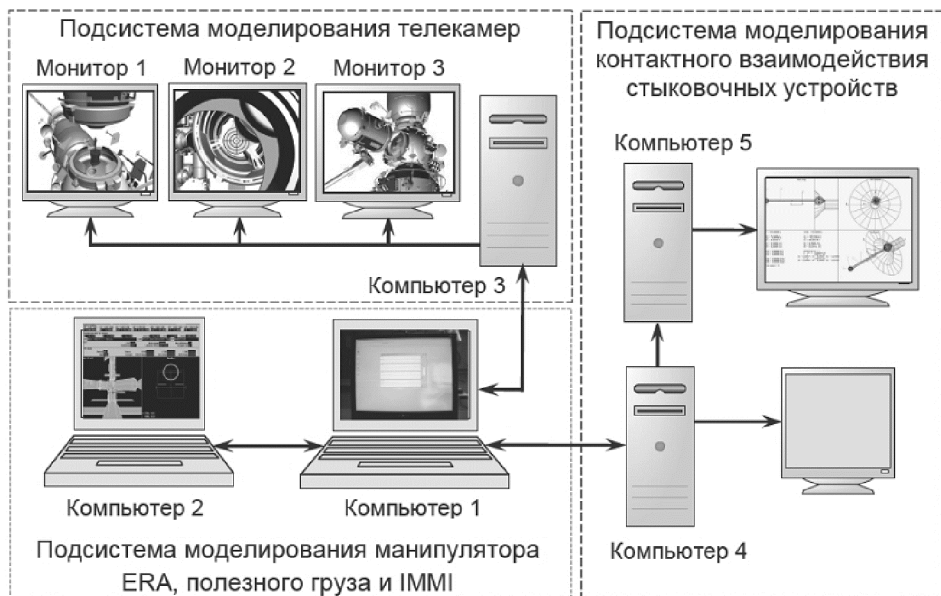


Рис. 1. Структурная схема математического стенда для отработки управления манипулятором ERA на контактной фазе операций причаливания

Математическая модель манипулятора ERA. В состав математической модели манипулятора входят три основные подсистемы:

- динамика исполнительного механизма манипулятора с объектом и приводами;
- планировщик траекторий;
- имитатор пульта внутреннего интерфейса.

Ниже приведено описание алгоритмов работы подсистем математической модели.

Динамика исполнительного механизма. Исполнительный механизм (ИМ) манипулятора ERA состоит из восьми звеньев (рис. 2). ИМ представляет собой симметричную по длине конструкцию. Концевые звенья ИМ — захватные устройства (ЗУМ). С помощью ЗУМ манипулятор прикрепляется к базовой точке на поверхности МКС. Второй ЗУМ служит для захвата и удержания объектов манипулирования — шлюзовой камеры (ШК) и теплоотводящего дополнительного радиатора (ТДР). ШК удерживается манипулятором с помощью механического адаптера.

Звенья нумеруют, начиная от основания. С каждым из звеньев связана правая ортогональная система координат так, что ее ось z направлена вдоль оси вращения соответствующего шарнира. В моде-

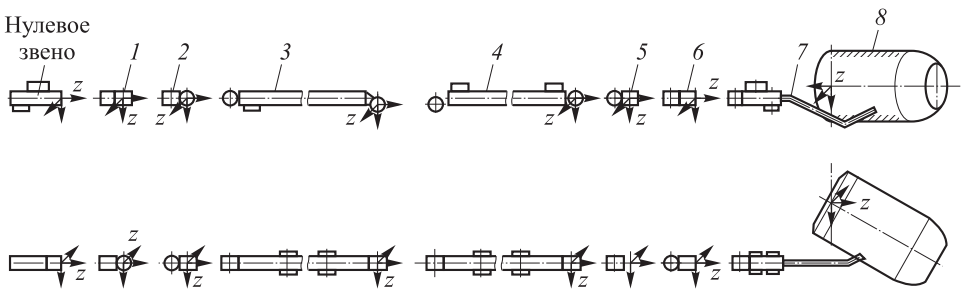


Рис. 2. Схема исполнительного механизма манипулятора

ли звенья 0, 1, 2, 5 и 6 — абсолютно жесткие тела, звенья 3, 4 и 7 — упругие. Звенья 1–6 — это элементы конструкции манипулятора. Составное звено включает в себя адаптер 7, ЗУМ и шлюзовую камеру 8. При моделировании процессов перемещения и стыковки ТДР в составное звено входят ЗУМ и ТДР. Нулевое (базовое) звено считается неподвижным основанием.

Уравнения движения составляются в форме Лагранжа 2-го рода. В общем виде эти уравнения получены в работах [6, 7]. Для описания динамики упругих колебаний применяется модальный метод. При этом рассматриваются только 1-е моды колебаний каждого из упругих звеньев. Упругие деформации полагают малыми и исключают векторы центробежных и кориолисовых сил «упругой» составляющей движения.

В результате уравнения принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} A_{qq}\ddot{\mathbf{q}} + A_{q\psi}\ddot{\boldsymbol{\psi}} + \mathbf{b} &= \boldsymbol{\mu}_{vq} + \boldsymbol{\mu}_d; \\ A_{\psi q}\ddot{\mathbf{q}} + A_{\psi\psi}\ddot{\boldsymbol{\psi}} &= \boldsymbol{\mu}_{v\psi} - K_{\psi}\boldsymbol{\psi}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь \mathbf{q} — вектор координат сочленений размером 7×1 ; $\boldsymbol{\psi}$ — вектор модальных координат размером 9×1 ; A_{qq} , $A_{\psi q}$, $A_{\psi\psi}$ — компоненты симметрической матрицы инерции системы; \mathbf{b} — вектор центробежных и кориолисовых сил; $\boldsymbol{\mu}_{vq}$ — приведенный к шарнирам вектор внешних сил и моментов; $\boldsymbol{\mu}_{v\psi}$ — вектор внешних сил и моментов, приведенный к модальным координатам; $\boldsymbol{\mu}_d$ — вектор моментов, развиваемых приводами; K_{ψ} — матрица статических модельных коэффициентов размером 9×9 .

Вычислительный алгоритм моделирования ИМ с упругими звеньями аналогичен алгоритму ИМ с жесткими звеньями и включает две фазы:

- расчет коэффициентов матриц и векторов уравнений (1);
- решение методом численного интегрирования дифференциальных уравнений ИМ совместно с уравнениями приводов.

Расчет коэффициентов уравнений выполняется по алгоритму, основанному на представлении блочных матриц в виде «косых суммы» (алгоритм «Косынка» [8]).

Векторы \mathbf{q} и Ψ используются в расчетах линейных и угловых координат звеньев ИМ относительно базовой системы координат, связанной с базовым звеном (см. рис. 2). Уравнения для расчета линейных координат звеньев так же, как и динамические уравнения, записываются с использованием математического аппарата блочных матриц.

Следящие приводы по каналам главных обратных связей замкнуты по положению. В состав моделей приводов входят контроллеры, двигатели, редукторы-измерители углов поворота выходных валов и скоростей вращения валов двигателей. Контроллеры реализуют алгоритмы ПИД-регуляторов. В них введены ограничения управляющих сигналов в функции скорости вращения двигателей, что необходимо для выполнения условия невыдавливания смазки. Модель двигателя является нелинейной. В ней учитываются силы трения и пульсации управляющих напряжений. Модель редуктора также нелинейна и учитывает люфт в зацеплении шестерен. Интерполятор обеспечивает расчет управляющих сигналов приводов с частотой 300 Гц по сигналам планировщика траекторий, формируемым с частотой 20 Гц.

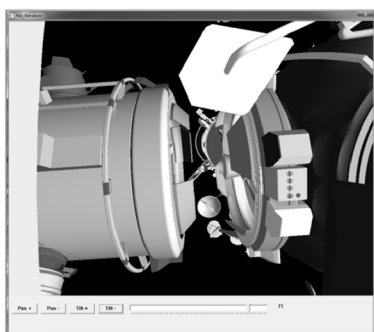
Планировщик траекторий. Эта подсистема осуществляет моделирование процессов формирования управляющих сигналов на приводы для двух команд управления. Команда Jog обеспечивает движение манипулятора в направлении, заданном в декартовой системе координат с заданной скоростью, а команда Step — перемещение манипулятора в заданном направлении на заданное расстояние.

В ходе планирования решаются две основные задачи: расчет с частотой управляющих сигналов 20 Гц последовательности точек траектории движения в декартовом пространстве и решение в каждой из этих точек обратной кинематической задачи (ОКЗ). Неоднозначности решения ОКЗ исключаются за счет ввода так называемых индексов кинематической конфигурации (КЦИ). Всего используется три КЦИ: плеча, локтя и кисти.

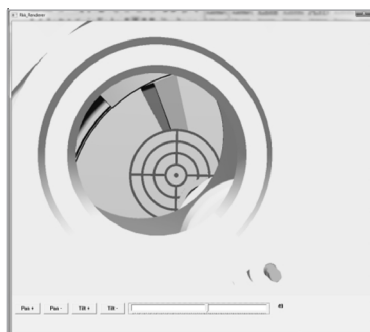
Имитатор пульта внутреннего интерфейса. Программное обеспечение имитатора позволяет оператору подавать моделирующей системе команды управления моделируемым космическим манипуляционным роботом (КМР) и устанавливать параметры этих команд. Компьютер 2 подсистемы моделирования (см. рис. 1) имитирует графический интерфейс оператора внутрикорабельного пульта управления КМР ERA (IMMI) и реализует функции человекомашинного интерфейса оператора ERA.

Математическая модель телекамер. Подсистема моделирования телекамер состоит из одного персонального компьютера, осна-

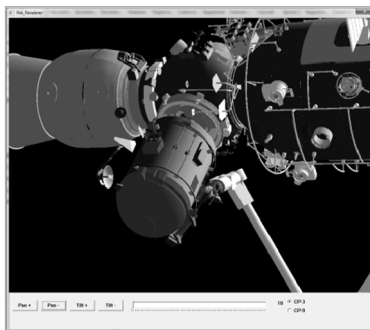
щенного тремя мониторами, и предназначена для выполнения расчетов модели телевизионных изображений на основе относительного положения ERA, стыкуемых объектов (ШК или ТДР) и МЛМ. Эти данные передаются от компьютера, моделирующего манипулятор ERA, на компьютер, осуществляющий расчет моделей изображений телекамер и передающий эти изображения на три монитора (рис. 3). На двух мониторах, имитирующих блок отображения информации регионального поста МЛМ, отображают объекты, наблюдаемые репортажной (рис. 3, а) и прицельной (рис. 3, б) телекамерами. На третьем мониторе воспроизводятся объекты, наблюдаемые обзорными телекамерами (рис. 3, в) агрегата стыковки МКС.



а



б



в

Рис. 3. Графическая модель изображений телекамер

Подсистему моделирования телекамер структурно можно разделить на три блока, осуществляющих управление интерфейсом, графическим движком и сетевой частью.

Блок управления интерфейсом предназначен для реализации графического интерфейса подсистемы моделирования телекамер. Он обеспечивает работу элементов управления.

Блок управления сетевой частью осуществляет взаимодействие подсистемы моделирования телекамер и моделирующей системы реального времени по сети. В этом блоке реализован поток для работы сетевой части подсистемы. Блок выполняет следующие функции:

- подключение к моделирующей системе по указанному IP-адресу;
- обмен данными с моделирующей системой и их расшифровку;
- закрытие соединения при выходе из подсистемы;
- повторное подключение к моделирующей системе в случае потери соединения.

Блок управления графическим движком обеспечивает расчет и формирование графических изображений на мониторах телекамер. При этом осуществляются следующие функции:

- инициализация графического движка OGRE3D;
- загрузка 3D-моделей имитируемых объектов (МЛМ, ШК, ТДР, ERA);
- расчет координат имитируемых объектов;
- расчет координат и ориентации телекамер;
- установка параметров телекамер (угол обзора, минимальные расстояния отображения объектов и др.);
- формирование изображений виртуальных телекамер.

Математические модели контактного взаимодействия стыковочных устройств. За счет сложных форм контактных поверхностей СтУ обеспечивается выполнение принципа сборки: число степеней свободы и объем относительного движения должны уменьшаться при сближении соединяемых интерфейсов. Математическое моделирование их контактного взаимодействия основано на следующих основных допущениях:

- каждая область контакта заменяется одной точкой, число точек контакта может быть произвольным, но конечным;
- каждая направляющая поверхность состоит из набора контактирующих элементов, каждый контактный элемент может быть представлен конечным набором геометрических примитивов, геометрия которых описывается алгебраическими уравнениями;
- если геометрия двух контактирующих элементов описывается уравнениями второго порядка и выше и оба они не являются сферами, то один из них представляется набором образующих — геометрических примитивов более низкого порядка. Число образующих может быть произвольным, но конечным, их описание формируется автоматически при инициализации модели;
- условия контакта и геометрические параметры для всех пар контактирующих примитивов определяются аналитическими выражениями. Каждое аналитическое решение получено для проектного диапазона боковых и угловых рассогласований.

Таким образом, многократное использование простых аналитических выражений для примитивов упрощает решение сложной задачи определения точки контакта для элементов с геометрией высокого порядка.

Основными геометрическими примитивами являются точка, отрезок прямой, плоскость, шар, усеченный конус и цилиндр. Контактующий элемент в виде тора представляется конечным набором сфер, а усеченный конус (в случае если второй контактирующий элемент является окружностью или тором) — конечным набором отрезков прямых.

Математические модели контактного взаимодействия разделяются на два класса в зависимости от числа степеней свободы относительного движения контактирующих элементов.

В моделях первого класса контактирующие элементы принадлежат телам с несколькими степенями свободы. В этом случае контактное взаимодействие рассматривается как динамический процесс с односторонними ограничениями. Физически эти ограничения реализуются через силы контактных реакций. В математической модели вычисляется контактная деформация, т. е. взаимное внедрение контактирующих примитивов. Если деформация отрицательна, то контакт отсутствует, и алгоритм, соответствующий паре геометрических примитивов, завершает свою работу. В противном случае вычисляются геометрические и кинематические параметры точки контакта, нормальные и тангенциальные силы контактного взаимодействия на основе заданных коэффициентов жесткости, демпфирования и трения. Значения вычисленных сил подставляются в правую часть уравнений динамики стыковочных агрегатов или перемещаемого ПГ. Метод, в котором не используются кинематические уравнения связей и дифференциально-алгебраические уравнения движения, обеспечивает высокую вычислительную эффективность моделирования.

В моделях второго класса один из контактирующих элементов имеет незначительную инерцию и только одну степень свободы, движению вдоль которой противодействует пружина. В этом случае сила контактной реакции определяется деформацией пружины. Так моделируется функционирование защелок, обеспечивающих сцепку.

В модели применены три приема, позволяющие исключить избыточные вычисления и тем самым обеспечить моделирование контактного взаимодействия в реальном времени:

- прекращение вычислений при невыполнении хотя бы одного условия контакта;
- определение и учет несовместимых точек контакта;
- использование алгоритма дихотомии для поиска точки контакта элементов, представленных наборами образующих в моделях первого класса, а также для поиска контактирующего положения элемента с одной степенью свободы в моделях второго класса.

В программный код модели контактного взаимодействия встраиваются процедуры самотестирования, позволяющие выделять контактные ситуации, требующие коррекции геометрических размеров контактирующих элементов или начальных условий моделирования. Алгоритмы выявления точек контакта и расчета их параметров для основных пар геометрических примитивов, а также применение алгоритма дихотомии рассмотрены в работах [9–11].

Взаимодействие математических моделей в реальном времени. Модель математического стенда построена на взаимодействии нескольких прикладных вычислительных процессов. Процессы, обеспечивающие человекомашинный интерфейс, являются некритичными по быстродействию. Их связь реализуется в соответствии с традиционной архитектурой клиент—сервер. Только два процесса, выполняющие расчет модели манипулятора и контактного взаимодействия СтУ, должны быть синхронизированы. Разделение их по времени, т. е. выполнение собственно моделирования и обмена данными в строго определенной последовательности на основе прерываний в пределах постоянного такта времени, не может быть реализовано вследствие не полностью контролируемых временных задержек, которые могут возникать при работе ОС Windows компьютеров 1 и 4. Поэтому каждый из этих процессов выполняется без взаимного ожидания, а взаимодействие между ними осуществляется через кольцевые буферы, которые предотвращают потерю информации вследствие возможного одновременного чтения и записи в одну и ту же область памяти. Так как модель манипулятора и модель контактов СтУ функционируют на разных компьютерах, то соответствующие вычислительные процессы поддерживают свои собственные кольцевые буферы, через которые передаются данные об относительном положении СтУ, контактных силах и моментах, координатах точек контакта. Сетевое взаимодействие процессов поддерживают расширенные версии программ сервера и клиента — «Сервер-Р» и «Клиент-Р» (рис. 4). Программа «Клиент-Р» осуществляет также передачу данных для каркасной графической модели СтУ.

Моделирование манипулятора ERA в режиме «мягкого» реального времени. Процесс моделирования КМР в моделирующей системе обеспечивается двумя параллельно работающими потоками: вычислительным (В) и коммуникационным (К).

Поток В выполняет на каждом шаге своего цикла:

- вычисление правых частей уравнений динамики ИМ;
- вычисление правых частей дифференциальных уравнений приводов;

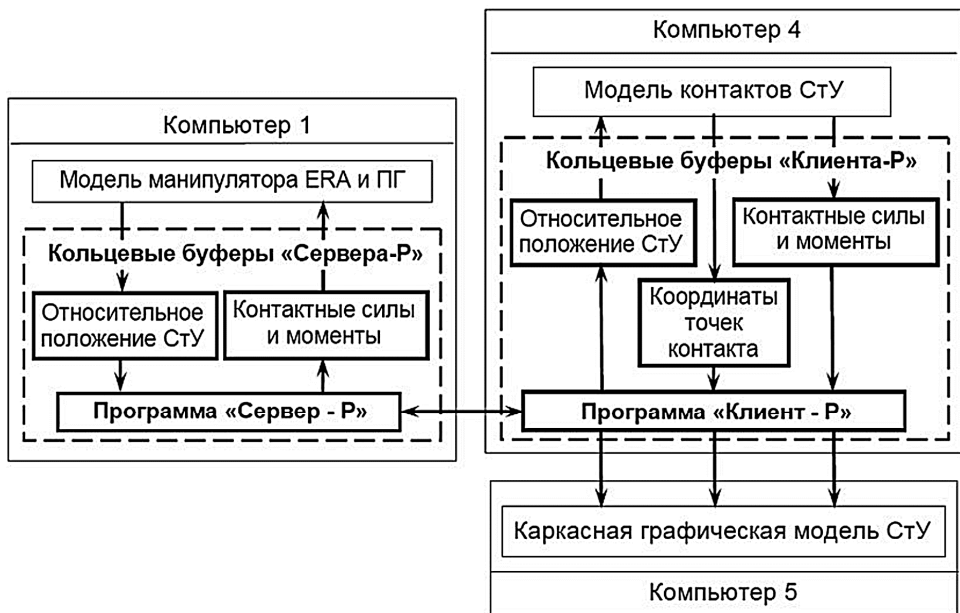


Рис. 4. Схема взаимодействия математических моделей в реальном времени при использовании кольцевых буферов

- планирование заданной траектории движения ЗУМ в автоматическом режиме и расчет заданной траектории при управлении в ручном режиме;
- решение ОКЗ и проверка индексов сингулярности;
- совместное интегрирование уравнений ИМ, приводов и дифференциальных уравнений ручных режимов;
- регистрация в память системы с последующим копированием в файл заданного объема информации с заданным интервалом;
- синхронизация по реальному времени.

Поток К обеспечивает на каждом шаге своего цикла сетевой обмен данными с клиентами (пульт управления, подсистема моделирования телекамер).

Значение кванта времени, выделяемого каждый раз каждому из потоков, определяется ОС Windows и зависит от мощности и числа задействованных процессоров, наличия других процессов, их приоритетов и т. д. При этом потоки могут прерываться и затем вновь возобновляться. Значение выделяемых им квантов времени может колебаться в широких пределах, и в некоторые моменты времени шаг интегрирования может стать недопустимо большим (с точки зрения устойчивости процесса).

Для предотвращения такой ситуации разработан следующий алгоритм синхронизации. Численное интегрирование выполняется методом Эйлера. Предварительно экспериментально определены значе-

ния двух величин (зависящих от динамики моделируемого КМР и уровня редуцированности модели):

- \lim — предельно допустимое значение шага численного интегрирования (приблизительно 0,3 мс), обеспечивающее устойчивость вычислений;

- N — число шагов в схеме сглаживания (примерно 20–30).

Введем переменную T_b — локальное (виртуальное) время процесса интегрирования (вычисляется на каждом цикле интегрирования как $T_b += h$) в отличие от реального времени T_p . Шаг интегрирования h для первых N шагов назначается достаточно небольшим (например, 1 мкс) для того, чтобы заведомо обеспечить сходимость начального этапа.

Далее каждый раз на входе в поток В определяется T_p и интервал реального времени D , прошедшего от предыдущего назначения h . Если бы интервалы D были достаточно малы и примерно одинаковы, можно было бы назначить на каждом шаге цикла потока В $h = D$. Но это условие не выполняется, и поэтому вводится алгоритм сглаживания. Допустим, за N шагов прошло время dT_p . Тогда шаг интегрирования для следующих N шагов цикла потока В определится как $h = dT_p/N$. Это усреднение по N циклам потока проводится для того, чтобы сгладить возможные большие колебания и запредельные выбросы значений h . Тогда можно реализовать два варианта.

1. Если $h \leq \lim$, то дальнейшие вычисления проводить не нужно, на каждом цикле $T_b += h$.

2. Если $h > \lim$, назначаем $h = \lim$. Получившееся в течение следующих N циклов отставание от реального времени на $N \lim - dT_p$ постепенно выравниваем на следующих шагах, пока T_i вновь не совпадет с T_p . Аналогичные действия выполняем после первых N шагов.

На современных компьютерах при правильной расстановке приоритетов для процесса и его потоков число таких ситуаций минимально, что обеспечивает выполнение вычислительного потока в режиме «мягкого» реального времени.

Сетевое взаимодействие моделирующей системы с сетевыми клиентами моделирующего комплекса реализуется с помощью сокетного соединения по протоколу TCP. Коммуникационный модуль моделирующей системы выступает для других программ комплекса в качестве сервера.

В сокетном соединении отключен алгоритм Нагла (выполняющий объединение маленьких пакетов в большие), что позволило вести обмен данными со средней частотой не менее 1 000 Гц.

Поток K имеет максимальный (TIME_CRITICAL) приоритет, но большую часть времени находится в состоянии «сна». Серверный поток функционирует только от события к событию в сокете (в боль-

шинстве случаев событие — это запрос на прием от одного из клиентов), обрабатывает цикл «прием-передача» (расшифровывает принятые от клиента данные и передает данные клиенту в ответ).

Компьютер, на котором размещена моделирующая система, затрачивает на цикл обмена коммуникационного потока машинного времени на два порядка меньше, чем средний шаг интегрирования, равный примерно 10 мкс. Частота запросов от клиента не превышает 1 000 Гц, следовательно, интервалы между циклами обмена на два порядка больше среднего шага интегрирования. Таким образом, моделирующая система на каждую 1 мс затрачивает 0,1 мкс на обмен, т. е. тратит на циклы обмена с одним клиентом приблизительно 0,01 % машинного времени. Таким образом, обеспечивается достаточное время для интегрирования без потери устойчивости.

Заключение. Выбранная структура математического стенда и принципы разработки математических моделей оборудования, взаимодействующего на контактной фазе причаливания, позволили разработать программное обеспечение для моделирования в реальном времени на основе ОС Windows. В настоящее время завершается его тестирование перед плановой отработкой управления манипулятором ERA при установке ТДР и ШК на модуль МЛМ российского сегмента МКС. В дальнейшем предполагается усовершенствование стенда для обеспечения тренировки операторов манипулятора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Woods D., Kearny M., Crosse D., Massimino M. Space Station Robotics Task Validation and Training. Progress in Astronautics and Aeronautics. *Teleoperation and Robotics in Space*. Washington, AIAA Inc., 1997, vol. 161, pp. 475–489.
- [2] 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.
- [3] Piedboeuf J.-C., Doyon M., Langlois P., R.L'Archeveque. SYMOFROS: A flexible dynamics modeling software. *Proc. Fifth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotic and Automation in Space*, 1–3 June 1999 (ESA-SP-440).
- [4] Final test report for pilot-in-the-loop study and berthing loads analysis for ULF4 SSRMS berthing MRM1 to FGB Nadir. JSC-61807. NASA JSC Engineering directorate. Software, robotics and simulation division. August 2010.
- [5] European Robotic Arm (ERA). Mission Preparation and Training Equipment (MPTE). *User Manual*. HS-MU-ER81-001-NLR, 2001.
- [6] Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. *Системы управления манипуляционных роботов*. Москва, Наука, 1978, 416 с.
- [7] Лесков А.Г., Илларионов В.В., Лескова С.М. Методы и алгоритмы моделирования динамики манипуляционных роботов. *Оборонная техника. Научно-технический журнал*, 2001, № 8–9, с. 50–57.
- [8] Лесков А.Г., Ющенко А.С. *Моделирование и анализ робототехнических систем*. Москва, Машиностроение, 1992, 80 с.

- [9] Яскевич А.В. Математическое моделирование контактного взаимодействия при стыковке космических аппаратов. Шестые Поляховские чтения. *Избранные труды Междунар. научн. конф. по механике*, Санкт-Петербург, 31 января — 3 февраля 2012 г. М.: Издатель И.В. Балабанов, 2012, 356 с.
- [10] Яскевич А.В. Два подхода к моделированию контактного взаимодействия при стыковке космических аппаратов. Механика и процессы управления. Т. 2. *Материалы XXXVII Всероссийского симпозиума*, Москва, РАН, 2012, 188 с.
- [11] Yaskevich A., Papadrakakis M., Papadopoulos V., Plevris V., eds. Math simulation of contact interaction during spacecraft docking and robotic assembly operations. COMPDYN 2013. 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island, Greece, 12–14 June 2013.

Статья поступила в редакцию 22.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лесков А.Г., Яскевич А.В., Илларионов В.В., Морошкин С.Д., Чернышев И.Е. Математический стенд для отработки управления манипулятором ERA на контактной фазе причаливания. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/953.html>

Лесков Алексей Григорьевич — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, директор Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: agleskov@rambler.ru

Яскевич Андрей Владимирович — канд. техн. наук, начальник отдела ОАО «РКК “Энергия” имени С.П. Королёва». e-mail: Andrey.Yaskevich@rsce.ru

Илларионов Владимир Владимирович — заведующий лабораторией Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: groulu@rambler.ru

Морошкин Святослав Дмитриевич — инженер Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: svyatoslavdm@gmail.com

Чернышев Иван Евгеньевич — инженер-программист ОАО «РКК “Энергия” имени С.П. Королёва». e-mail: chernyshev.ivan@yandex.ru