

А. Г. Лесков, В. В. Илларионов,
С. М. Лескова

ПОЛУНАТУРНЫЙ ФУНКЦИОНАЛЬНО- МОДЕЛИРУЮЩИЙ СТЕНД В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ КОСМИЧЕСКИХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ

Разработан полунатурный функционально-моделирующий стенд, обеспечивающий проведение широкого спектра исследований космических манипуляционных роботов в наземных условиях.

E-mail: agleskov@rambler.ru

Ключевые слова: космические манипуляционные роботы; функционально-моделирующий стенд; моделирующая система реального времени.

Применение космических манипуляционных роботов (КМР) позволяет реализовать новые технологии на борту и вне космического аппарата (КА), сократить затраты на ремонт и обслуживание КА, уменьшить риск, повысить эффективность и безопасность работ в открытом космосе.

Высокая стоимость КМР и риски, связанные с их эксплуатацией в космосе, требуют тщательной предполетной верификации всех заданий на Земле. Вследствие сложности КМР и их неспособности функционировать в условиях земной гравитации единственным средством для исследования движения и верификации заданий является моделирование. Особенно тщательно необходимо тестировать операции, при которых возникает механический контакт между КМР и внешней средой, — контактные операции.

Наиболее эффективным методом решения проблемы обеспечения точности моделирования операций КМР (в особенности контактных операций) является применение полунатурной схемы моделирования, т.е. одновременное использование математической модели и реальных физических устройств в общем контуре. При этом известные и хорошо формализуемые компоненты реализуются в математической форме, а сложные физические процессы (например, механический контакт между КМР и объектами внешней среды) — с использованием физических макетов реальных объектов.

Полунатурные схемы моделирования реализуются в виде функционально-моделирующих стендов (ФМС), представляющих собой функциональную и динамическую модели КМР.

Создание ФМС, проведение на его основе исследований — это одно из основных направлений научной и учебной деятельности лабо-

ратории “Специальная робототехника и мехатроника” Дмитровского филиала (ДФ) МГТУ им. Н.Э. Баумана [1–4].

Особую актуальность ФМС приобрел в связи решением задач подготовки операторов КМР. Первый ФМС КМР был создан в ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана и установлен в РГНИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина в 1993 г. [5]. Он был предназначен для подготовки космонавтов к управлению КМР МКК “Буран” (рис. 1, см. 3-ю полосу обложки). Основу ФМС составляла аналого-цифровая модель КМР (комплекс АВК32–IBM PC). В качестве макета КМР применялся промышленный робот (ПР) РМ-01.

Стенд КМР постоянно модернизировался в течение нескольких лет [6, 7]. Одним из направлений использования модернизированного ФМС явилась общекосмическая подготовка экипажей КА к управлению КМР на МКС.

В настоящее время разработана более совершенная версия стенда ФМС, оснащенная современной аппаратурой очувствления и современным ПР [7–9]. Современный ФМС представляет собой многофункциональный комплекс аппаратно-программных средств и используется для проведения исследований по широкому кругу проблем космической робототехники (подготовка операторов, человеко-машинный интерфейс, применение СТЗ, роботизированные технологии сборки и обслуживания, дистанционное управление), а также в учебном процессе. В качестве робота-макета КМР используется современный шестистепенной промышленный манипулятор Kawasaki FS020N. Структура последней версии ФМС приведена на рис. 2 (см. 3-ю полосу обложки). На рис. 3 представлена фотография ФМС (в зале робототехники ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Программные средства ФМС инвариантны по отношению к структуре и параметрам моделируемого КМР и обеспечивают возможность оперативного ввода данных о параметрах исполнительных механизмов (ИМ), приводов, режимов управления и заданий/миссий КМР. В настоящее время ФМС настроен на параметры КМР ERA [10], используемого на МКС.

Структура ФМС. Стенд имеет модульную структуру и состоит из следующих частей: моделирующая система реального времени (МСРВ) — программный комплекс, установленный на отдельном компьютере; имитатор пульта управления ERA, установленный на портативном компьютере; ЭВМ для управления оборудованием; ПР и его управляющий компьютер; сервер удаленного доступа, установленный на отдельном компьютере.

Рабочий орган — захватное устройство и средства очувствления: СТЗ, силомоментный датчик (СМД). Сетевое взаимодействие распределенного ПО ФМС осуществляется посредством транспортного протокола TCP и сетевого протокола IP.

Иллюстрации к статье
А.Г. Лескова, В.В. Илларионова С.М. Лесковой
«ПОЛУНАТУРНЫЙ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-МОДЕЛИРУЮЩИЙ СТЕНД
В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОДГОТОВКИ
ОПЕРАТОРОВ КОСМИЧЕСКИХ
МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ»

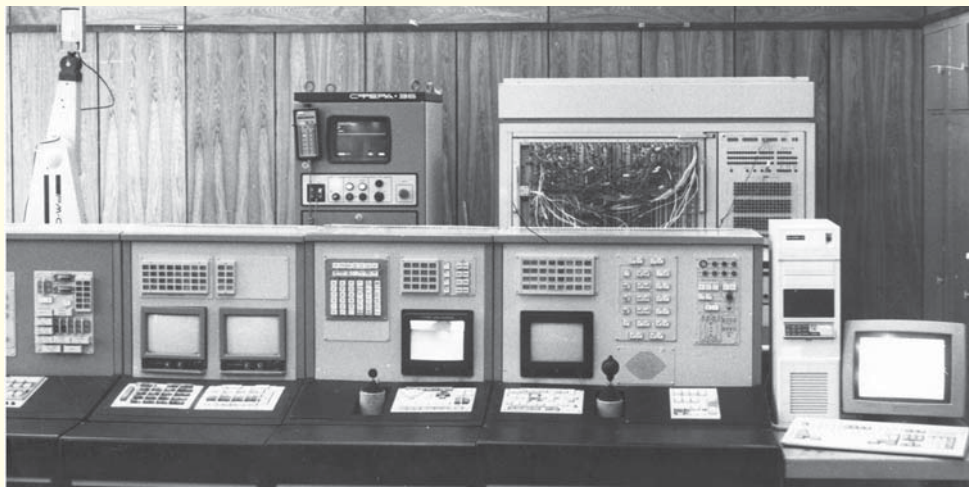


Рис. 1. ФМС манипулятора МКК «Буран»

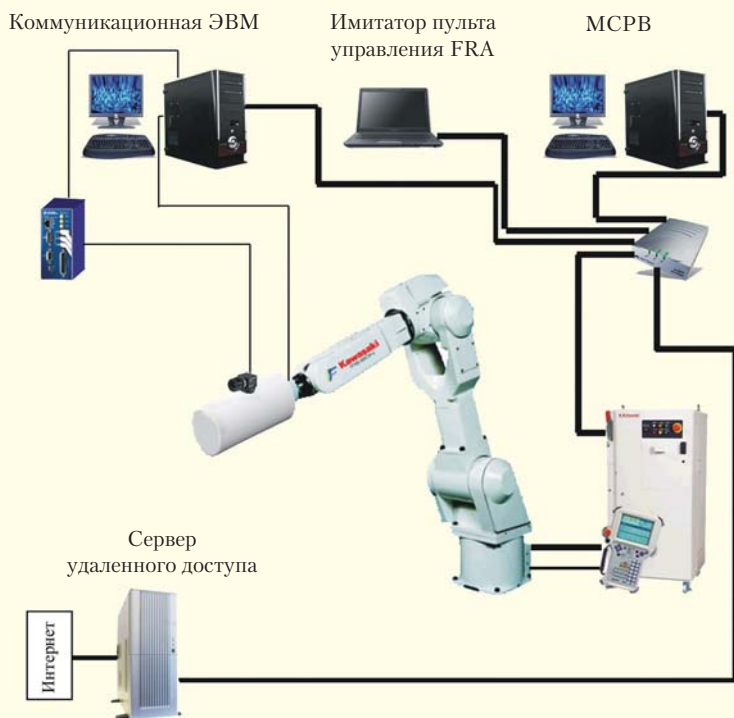


Рис. 2. Структура ФМС



Рис. 3. Мониторы ЭВМ и манипулятор ПР современного ФМС

Основным программным модулем станда является МСРВ на базе отдельной IBM PC. Аппаратные модули при необходимости могут исключаться или заменяться. В работе [11] приведены основные алгоритмы и ПО отдельных модулей ФМС.



Рис. 4. Рабочий орган ПР в составе ФМС:
видеокамера СТЗ, СМД, захватное устройство

Промышленный робот в составе полунатурного станда предназначен для точного воспроизведения динамики механического контакта КМР с объектами и внешней среды и перемещения полезных грузов (ПС) и аппаратных средств систем оучувствления. В качестве ПР в ФМС применяется манипулятор Kawasaki FS 020N. Рабочий орган ПР оснащен комплектом специального оборудования (рис. 4): камерой СТЗ, СМД системы измерения сил и моментов, захватным устройством.

Силомоментный датчик SCHUNK FTD-DELTA, устано-

вленный на ПР, измеряет реальные силы контакта, при этом используются габаритные физические макеты реальных ПГ, с которыми будет работать КМР на борту. Реально измеренные силы вводятся в компьютерную модель КМР.

Для обеспечения функционирования оборудования рабочего органа в составе ФМС разработано специальное ПО, обеспечивающее управление каждым компонентом рабочего органа, их взаимодействие и получение информации пользователями. В составе ПО ФМС имеется ПО управления оборудованием.

Дистанционное управление в ФМС. В состав ФМС последней версии входит сервер удаленного доступа, благодаря которому предоставляется возможность удаленного доступа к процессам управления и моделирования КМР по сети Интернет [11].

В согласованное время удаленный пользователь подключается через сеть Интернет к ПО web-сервера лаборатории, осуществляющего авторизацию пользователя и последовательную трансляцию серверу МСРВ ФМС команд управления в составе сформированной пользователем миссии/задания. Сервер МСРВ отрабатывает на математической модели и реальном роботе заданные пользователем команды и возвращает параметры состояния с частотой около трех раз в секунду. Полученные web-сервером данные транслируются в клиентский пользовательский интерфейс через сеть Интернет. После завершения отработки текущей команды ПО осуществляет (в зависимости от состояния МСРВ) либо запуск следующей в миссии команды, либо завершение сеанса удаленного доступа.

Параметры состояния математической модели робота непрерывно передаются от МСРВ к управляющему компьютеру робота, ПО которого обеспечивает перемещение ПР с полученными от модели координатами и скоростями перемещений звеньев робота при соблюдении условия их выполнимости.

Для автоматизированных систем удаленного управления одним из важных требований является защита от запуска миссий, при которых возможен выход из строя электронных и механических систем робота. Поэтому в ФМС предусмотрена многоступенчатая система контроля выполнимости команд на всех этапах работы комплекса удаленного доступа, обеспечивающая автоматическую блокировку таких команд удаленного пользователя, которые могут привести к поломке оборудования.

Математическое обеспечение ФМС. Космический манипуляционный робот представляется в виде системы, включающей в себя: n -звенный ИМ, звенья которого — упругие тела; комплекс из n следящих приводов сочленений; системы управления движением и действиями (миссии КМР); систему безопасности.

Модель ИМ. Основу модели динамики ИМ составляют уравнения в форме блочных матриц [12], имеющие вид

$$A\ddot{q} + b = \mu_d + c^T M_B + D^T F_B, \quad (1)$$

где q — n -мерный вектор координат сочленений ИМ; b — n -мерный вектор центробежных и кориолисовых сил; M_B — $3n$ -мерный блочный вектор внешних моментов, действующих на звенья; F_B — $3n$ -мерный блочный вектор приложенных к звеньям внешних сил; c, D — блочные матрицы размера $3n \times n$ -мерные, связывающие блочные векторы угловых и линейных скоростей звеньев в декартовом пространстве и вектор производных координат сочленений; A — матрица размера $n \times n$ инерционных коэффициентов, определяемая выражением

$$A = c^T J c + D^T M D; \quad (2)$$

J — блочная матрица размера $3n \times 3n$, составленная из тензоров инерции звеньев; M — блочная матрица размера $3n \times 3n$, составленная из масс звеньев.

Достоинство метода блочных матриц состоит в компактности получаемых соотношений. Благодаря этому удается избежать проблем, связанных с чрезвычайной громоздкостью записи уравнений кинематики и динамики многозвенных ИМ в развернутой форме. Кроме того, уравнения ИМ в форме блочных матриц могут быть представлены в удобной для программирования рекуррентной форме — в виде так называемых прямых и обратных соотношений [13] и в виде разложения блочных матриц в косые суммы (алгоритм “косынка”) [14].

Уравнения (1) впервые были получены в 1974 г. применительно к ИМ с вращательными кинематическими парами [15, 16]. Впоследствии эти уравнения и вычислительные алгоритмы были применены к ИМ, имеющим наряду с вращательными и поступательные пары, а также упругие звенья (модальный метод) [17].

Следящие приводы (СП) КМР — сложные нелинейные системы. Отличительная особенность математических моделей приводов для ФМС — укрупненное описание исследуемого СП в виде функциональных блоков. В ФМС в качестве функциональных блоков рассматриваются типовые мехатронные модули: двигатели, редукторы, контроллеры приводов, усилительно-преобразующие устройства. Один из блоков — ИМ манипуляционного робота (МР). Каждый из модулей задается как отдельно взятая система. При моделировании в памяти ЭВМ создается база данных, в которой представлены уравнения всех модулей в нормальной форме Коши. Отдельно указываются связи между входными и выходными координатами модулей. Сборка уравнений приводов из уравнений, входящих в их состав модулей, проводится автоматически. Процедура сборки алгоритмически совмещена с процедурой численного интегрирования.

В общем виде этот метод был реализован в программных комплексах [18, 19], разработанных в лаборатории “Робототехника” ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1990-х гг.

Управление движением. Движение КМР происходит под управлением системы планирования траекторий в декартовом пространстве или в пространстве координат сочленений.

Решение задачи планирования включает два этапа.

1. Расчет точек вдоль отрезков прямых линий между точкой исходного положения и целевой точкой. Расчет точек проводится с привязкой к реальному времени частотой, соответствующей частоте квантования сигналов управляющей ЭВМ моделируемого КМР. При этом принимаются во внимание участки разгона, движения с заданной постоянной скоростью и участки торможения.

2. Решение обратной кинематической задачи о положении КМР в каждой из запланированных точек. Эта проблема преодолевается путем введения дополнительных переменных, так называемых индексов кинематической конфигурации.

В качестве декартовых систем координат рассматриваются системы, связанные с КМР (внутренние системы координат) и с внешними объектами (внешние системы координат).

Моделирование миссий предусматривает подготовку и реализацию программ — автосеквенций, состоящих из элементарных фрагментов типовых манипуляционных операций. Эти элементарные операции получили название “акции” или “действия” КМР.

В ФМС на этапе подготовки пользователь разрабатывает свою программу действий КМР и кодирует ее на специальном языке — языке подготовки действий (ЯПД) [20].

Программа действий, написанная на ЯПД, подвергается трансляции во внутренний (рабочий) код. Транслятор языка управления программами действий включает две части: компилятор языка, проверяющий корректность лексики и синтаксиса программы и дающий на выходе легко интерпретируемый набор команд (внутреннее представление кода); интерпретатор кода.

В основу ЯПД положены общие принципы управления КМР с помощью программ действий. Вызов действия является нижним уровнем детализации в ЯПД. Набор типовых действий ЯПД зависит от принципов управления КМР и учитывает применение для целей управления различных средств человеко-машинного интерфейса; поддерживает ввод и вывод информации с/на различных полях вывода информации применяемого пульта управления (световых клавишей и индикаторов, полей графической информации — при компьютерной имитации облика КМР и объектов внешней среды), позволяет использовать возможное наличие ручных контроллеров, физических имитаторов КМР и др.

Система безопасности. Составной частью современных КМР является подсистема избежания столкновений (Collision Avoidance, в дальнейшем — СА). Подсистема СА — средство предотвращения столкновений КМР с окружающими предметами и пересечения звеньев друг с другом или с ПГ.

Программа СА, входящая в состав ФМС, в режиме on-line постоянно проверяет текущее положение КМР в целях выявления возможного столкновения КМР и ПГ с окружающими предметами. Для этого используются геометрические модели КМР, груза и объектов окружающей среды.

В ПО ФМС рассматриваются модели в виде трехмерных аппроксимаций действительных объектов. Модель КМР состоит из четырех-пяти соединенных звеньев. Геометрическая модель звена определяется как сферическое расширение сегмента, т.е. как объем, содержащий все точки, отстоящие от сегмента на расстояние, меньшее или равное выбранному радиусу R .

Модели внешних объектов представляются в виде сферических расширений следующих геометрических фигур: отрезки прямых линий; прямоугольные фрагменты плоскостей; цилиндры с закругленными торцами и плоскими основаниями; конусы.

Для представленных фигур получены математические соотношения для расчета кратчайших расстояний между их поверхностями, а также для расчета кратчайших расстояний между фрагментами, включающими в себя несколько геометрических объектов каждый.

Программа СА использует следующее правило проверки наличия столкновений: столкновение между объектами наличествует тогда и только тогда, если относительное расстояние между ними меньше некоторого заданного предельного значения.

Программное обеспечение. *Моделирующая система реального времени* — основной модуль стенда. Главными задачами МСРВ при работе ФМС являются автоматическое формирование уравнений КМР, решение этих уравнений численными методами и обмен данными с другими программными частями ФМС.

В МСРВ применена многопоточная (параллельная) технология вычислений на однопроцессорных системах: один из потоков вычислительного процесса выполняет построение модели КМР (алгоритмическая часть), второй выполняет интегрирование полученных уравнений. Третий поток (коммуникационный) осуществляет взаимодействие с внешними объектами, функционируя параллельно с интегрирующим и алгоритмическим потоками. Для корректной организации многопоточных вычислений ПО использует стандартные средства Borland Builder C++.

Программное обеспечение МСРВ может состоять из следующих частей:

- 1) модели динамики ИМ;
- 2) кинематики ИМ, внешних объектов и навесного оборудования;
- 3) модели приводов;
- 4) алгоритмов управления;
- 5) поддержки интерфейса ввода исходных данных;
- 6) интерфейса выбора закона и параметров управления движением КМР;

7) поддержки интерфейса связи с внешними устройствами (имитатор пульта ИММІ ERA, ПР, СТЗ, СМД);

8) поддержки интерфейса предъявления оперативных данных;

9) поддержки интерфейса выбора уровня сложности модели ИМ;

10) обеспечения связи с дистанционно удаленным пользователем;

11) системы информационного обеспечения (СИО).

Программное обеспечение МСРВ обладает следующими свойствами.

ПО модели динамики ИМ МСРВ:

— обеспечивает автоматическое формирование и решение уравнений динамики многосвязных пространственных ИМ КМР. Звенья ИМ могут быть упругими;

— обеспечивает автоматическое формирование и решение уравнений прямой кинематики. Модель кинематики ИМ в МСРВ обеспечивает вычисление относительных векторов координат объектов, размещенных на звеньях ИМ или на неподвижном основании КМР. В качестве объектов рассматриваются телекамеры (например, телекамера на End Effector, обзорная телекамера на основании), мишени и базовые точки. МСРВ обеспечивает также решение обратной позиционной кинематической задачи;

— обеспечивает автоматическое формирование структурной схемы и уравнений приводов шарниров и получение решений этих уравнений в масштабе реального времени. Имеется база данных МСРВ для элементов приводов (двигатели, редукторы и т.д.) и пользовательский интерфейс для их выбора и настройки параметров;

— обеспечивает формирование и решение уравнений, описывающих различные алгоритмы управления КМР: движение в свободном пространстве, вблизи внешних объектов, выполнение контактных операций;

— имеет пользовательский интерфейс, позволяющий задать кинематические и массогабаритные параметры ИМ приводов: массогабаритные параметры ИМ; параметры упругих звеньев; параметры ПГ; параметры упругих деформаций; фиксацию положений сочленений; структуру и параметры приводов сочленений.

ПО интерфейса выбора закона и параметров управления движением КМР. Переключая закладки интерфейса, можно выбрать различные режимы управления (командный, ручной, тестовый, движение по

траектории и др.) и задать их параметры (скорость, ускорение, направление движения и т.д.), а также установить командную систему координат и выбрать ее тип (внешняя, внутренняя).

Интерфейс “Внешние устройства” позволяет составить списки параметров модели для передачи/приема (через локальную сеть или порты) данных к подключенным устройствам (пульт управления, ручные контроллеры, ПР, устройства регистрации, СМД, СТЗ и т.д.).

ПО поддержки интерфейса предъявления оперативных данных. Результаты интегрирования – это временные процессы, они могут быть выведены в виде графиков на экран в режиме on-line, либо записаны в файл для последующего предъявления и просмотра.

ПО обеспечения связи с дистанционно удаленным пользователем. Организация сетевого взаимодействия МСРВ с остальным ПО ФМС осуществляется посредством TCP и IP. Сетевая связь между всеми программами компьютерной сети ФМС осуществляется посредством сокетных соединений типа клиент–сервер.

Составной частью МСРВ является СИО. *ПО СИО* позволяет рассматривать зарегистрированные ранее временные процессы в моделируемом КМР.

ПО имитатор пульта управления обеспечивает доступ к большому числу элементов управления движением и действиями, доступными в реальном ИММИ современных КМР. Для обеспечения большей наглядности графический облик пульта управления ФМС максимально приближен к облику ИММИ моделируемого КМР. В настоящее время пульту управления КМР в ФМС придан облик ИММИ ERA МКС.

ПО системы безопасности (СБ). Особенность ФМС – воспроизведение перемещений моделируемого КМР на физическом уровне. При этом не исключены столкновения ЗУМ ПР с элементами собственной конструкции, окружающими его предметами, операторами. В этой связи ФМС оснащен специальными программными средствами предотвращения столкновений ПР и КМР с препятствиями и самостолкновений отдельных звеньев моделируемого КМР.

В ПО СБ входят программы расчета кратчайшего расстояния между разными геометрическими объектами, расчета предельно возможных (с точки зрения исключения столкновений) расстояний между манипулятором и элементами внешней среды, моделирования логики функционирования системы безопасности, обеспечения отображения необходимой информации на имитаторе пульта управления, а также база данных геометрических объектов, имитирующих препятствия внешней среды.

Структурно программы СБ в ФМС являются частью ПО имитатора пульта управления.

ПО рабочего органа ПР реализовано в виде многопоточного приложения и предназначено для управления аппаратурой рабочего органа при выполнении операций движения в близкой зоне и контактных операций.

В настоящей версии ПО рабочего органа решаются следующие задачи: расчет координат камеры СТЗ относительно мишени станда; определение сил реакции, возникающих при воздействии на рабочий орган манипулятора; видеофиксация изображений при моделировании операций визуализации (например, осмотра внешней поверхности станции); формирование сигналов управления КМР (модель КМР реализована в МСРВ) при выполнении команд управления по данным от СТЗ (в КМР ERA — юстировка, приближение и отход); формирование сигналов управления КМР по данным от СМД (в КМР ERA — вставка, извлечение, расслабление).

По отношению к программам ФМС, обеспечивающим человеко-машинный интерфейс между оператором и стандом через пульт локального и глобального управления, ПО рабочего органа является сервером.

По отношению к МСРВ программный комплекс выполняет функции клиента. Для управления режимами движения, моделируемыми в МСРВ, ПО рабочего органа в качестве клиента подключается по адресу, который должен указать оператор станда ФМС, к серверной части МСРВ, отвечающей за прием команд от программ управления движением.

Программное обеспечение рабочего органа обладает графическим интерфейсом пользователя. Оператор станда ФМС имеет возможность задать IP-адрес компьютера, на котором установлена МСРВ, и подключить ПО к МСРВ. Оператор может устанавливать необходимость приема команд от программ управления отдельными устройствами и имеет возможность контроля событий во время работы ПО.

Одновременно с подключением к серверной части МСРВ ПО рабочего органа создает параллельный поток для контроля сетевых команд от управляющих клиентов (к серверу ПО рабочего органа может подключаться несколько клиентов). В случае успешного присоединения клиента ПО создает параллельный поток для работы с каждым клиентом и управляется командами, поступающими от клиентов. Серверная часть программы возвращает результат выполнения полученной команды (положительный или отрицательный) клиенту.

Применение ФМС. *Научно-исследовательские работы.* Стенд предоставляет возможности проведения исследований динамики и процессов управления МР с различной структурой и параметрами, при выполнении ими операций как в свободном пространстве, так и разнообразных контактных операций.

В лаборатории ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана выполнен ряд научно-исследовательских работ (НИР), в ходе которых разработаны и исследованы: алгоритмы управления при перемещении КМР в свободной зоне, приближении и отходе (с использованием СТЗ [21]); контактные операции установки и снятия объектов (с использованием СМД).

На рис. 5–7 приведены примеры записи процессов выполнения на ФМС операции, включающей в себя фазы ручного управления перемещением КМР в свободном пространстве, и автоматических операций юстировки и приближения к базовой точке. Ручные операции выполняются по командам, подаваемым оператором с пульта ИММТ, автоматические операции – с использованием информации телекамеры СТЗ рабочего органа.

На рис. 8 приведены примеры записи процессов выполнения на ФМС контактной операции, заключающейся в перемещении схвата КМР по наклонной плоскости. Операция выполняется в автоматическом режиме с использованием информации СМД, установленного на схвате ПР. На рис. 8 вверху – координаты Z и Y ЗУМ КМР при выполнении контактной операции, внизу – фрагмент записи зарегистрированных СМД сил контактного взаимодействия.

На базе ФМС развернуты комплексные НИР, в которых принимают участие преподаватели и студенты нескольких кафедр университета. Так, совместно с лабораторией удаленного доступа (руководитель – профессор В.Н. Зимин) ведутся исследования в области систем супервизорного удаленного управления полуавтономными КМР. Со-

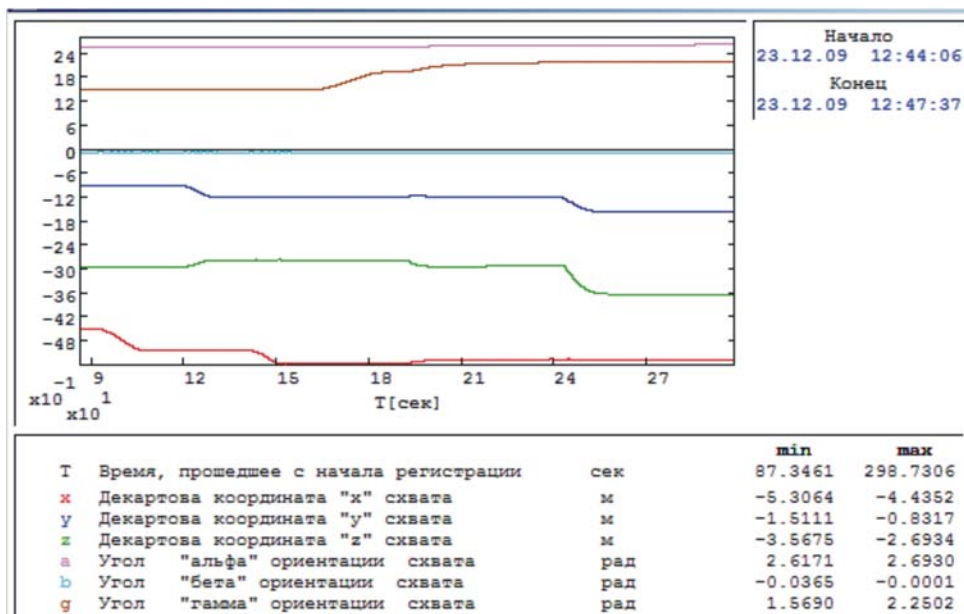


Рис. 5. Линейные и угловые координаты рабочего органа относительно базовой системы координат

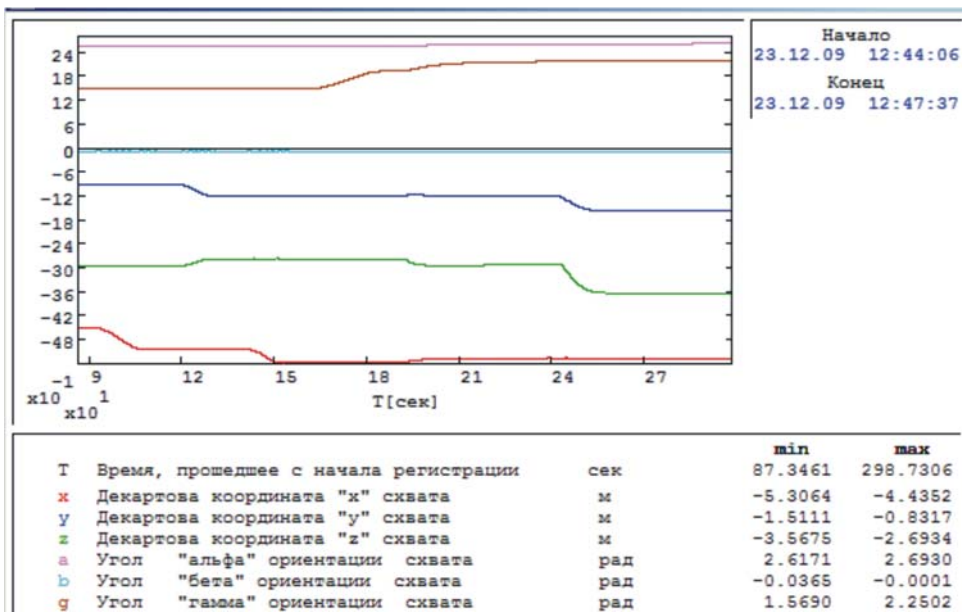


Рис. 6. Линейные координаты рабочего органа относительно базовой системы координат и системы координат базовой точки

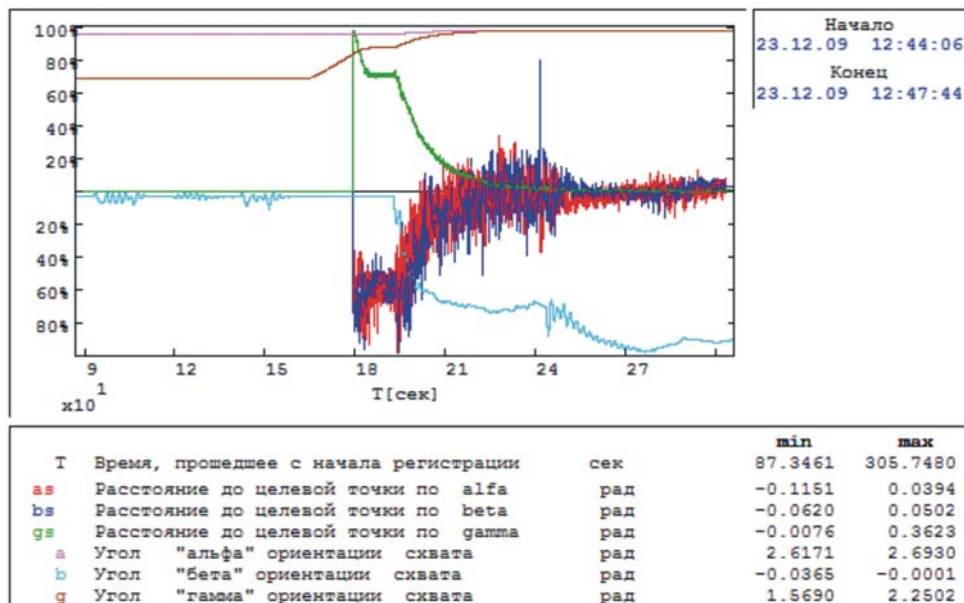


Рис. 7. Угловые координаты рабочего органа относительно базовой системы координат и системы координат базовой точки

вместно с кафедрой РК-10 (зав. кафедрой д-р техн. наук, профессор А.С. Ющенко) проводятся работы по созданию систем удаленного доступа при проведении лабораторного практикума. Совместно с кафедрой МТ1 (зав. кафедрой д-р. техн. наук, профессор В.М. Утенков)

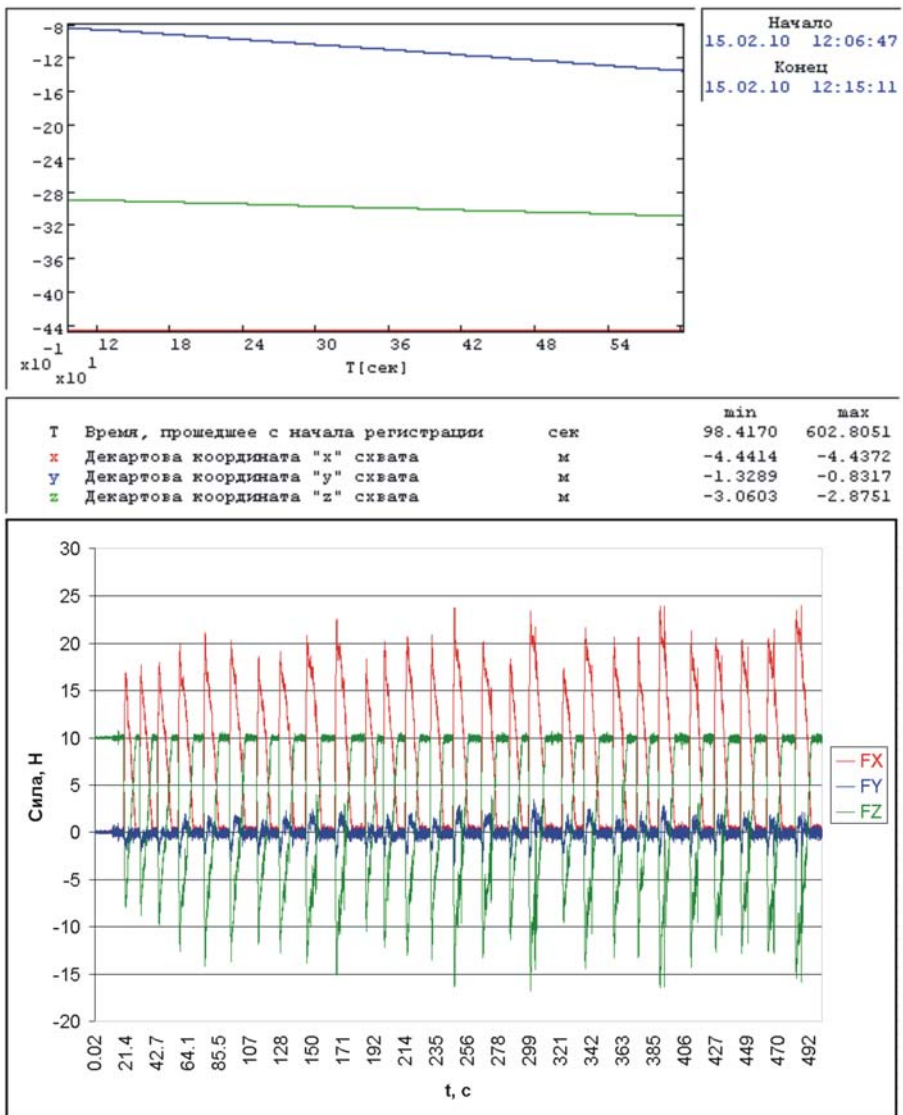


Рис. 8. Динамические процессы при выполнении контактной операции

ведется разработка роботизированных систем бесконтактных измерений форм поверхностей.

Подготовка операторов КМР. Программное обеспечение ФМС дополнено программно-математическими средствами оценки управляющей деятельности операторов КМР [22]:

1. Разработаны и обоснованы критерии оценки непрерывной управляющей деятельности на основе выполнения оператором серии тестовых операций (упражнений).
2. Разработаны сюжеты для составления тестовых операций.
3. Разработаны программно-методические средства (ПМС) оценки управляющей деятельности:

- для тестовых операций — составление различных тестовых операций с учетом ограничений, присущих конкретным КМР; формирование и сопровождение архива упражнений; инициирование и исполнение ПО МСРВ и других подсистем ФМС;

- для регистрации параметров процессов управления, необходимых для расчета полного комплекта оценок;

- для расчета первичных оценок — просмотр файлов с зарегистрированными параметрами и, если данные корректны, вычисление первичных оценок по специально разработанным алгоритмам. Результат вычислений записывается в специальном образом организованную базу данных;

- для статистической обработки оценок — выполнение статистической обработки совокупности первичных оценок для серии подходов каждого из зарегистрированных операторов;

- для ведения базы данных, хранения и предъявления результатов — пополнение базы оценок, просмотр имеющихся первичных и статистически обработанных оценок в наиболее информативной форме, корректное удаление ненужных записей.

Применение ПМС позволяет оперативно и обоснованно оценить степень подготовленности операторов, корректировать ход подготовки, что актуально при исследовании свойств человеко-машинного интерфейса.

На рис. 9 приведены примеры оценок управляющей деятельности двух операторов при выполнении ими транспортной операции (критерий оценки — время выполнения операции); вверху приведены первичные данные, внизу — после регрессионного анализа (тренды). Кривые имеют характерный вид — в них различаются фаза обучения, плато постоянства качества и фаза усталости оператора.

На рис. 10 приведены результаты регрессионного анализа показателей двух видов для пяти разных операторов. Показатели характеризуют точность выдерживания оператором заданного направления движения. Кривые показывают специфику разных операторов.

На рис. 11 приведены результирующие оценки для четырех операторов по серии выполнения операции “юстировка” с помощью 6-степенных рукояток. Операция заключается в обеспечении точной установки ЗУМ КМР относительно базовой точки. Критерий оценки — полнота использования возможностей средств управления.

Для целей начальной подготовки космонавтов — операторов КМР разработан программно-методический комплекс “Манипуляторы международной космической станции”. Комплекс включает в себя общие данные о КМР МКС и в динамическом режиме иллюстрирует выполнение типовых манипуляционных операций КМР [23].

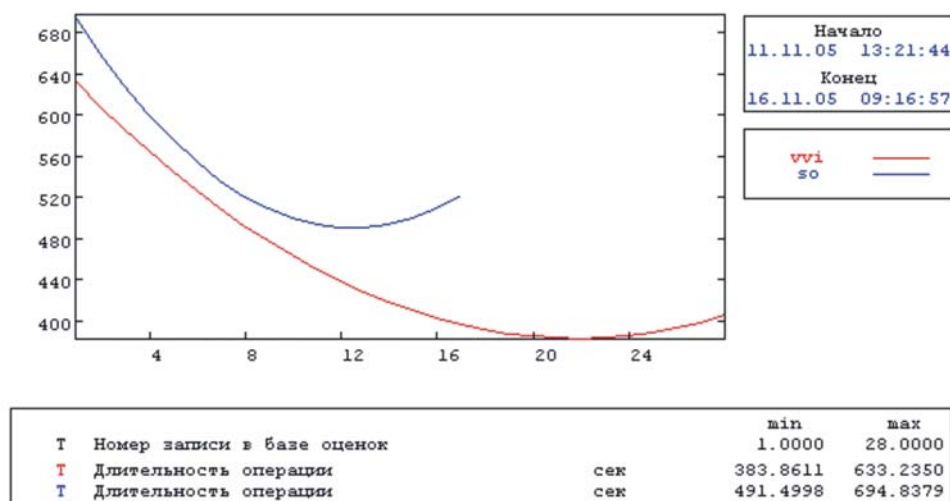
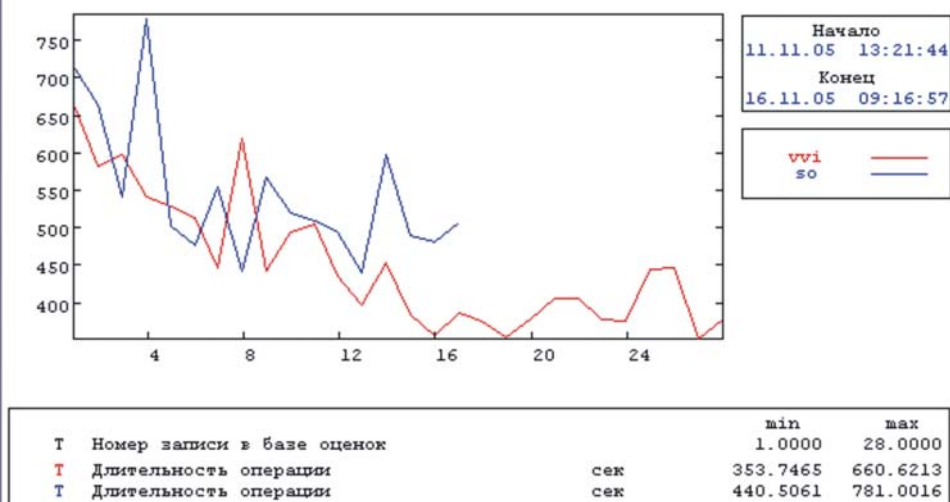


Рис. 9. График изменения первичной оценки “время наведения” и тренды для этой оценки

Основные заказчики НИОКР — предприятия и учреждения космической отрасли России: ФГБУ ЦПК им. Ю.А. Гагарина (для подготовки российских экипажей МКС), РКК “Энергия” (при отработке сборочных операций КМР), ЦНИИмаш (создание систем управления перспективных КМР).

Учебный процесс. В ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся два цикла лабораторных работ по управлению манипуляционными роботами с использованием ФМС:

- 4-часовой общеознакомительный цикл для студентов 2-го курса. Дается общее представление о назначении, составе и принципах действия МР;

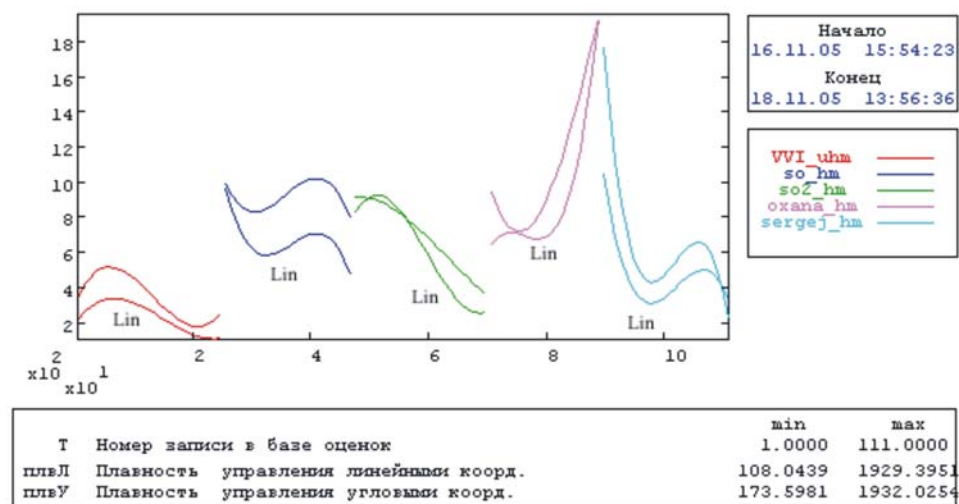
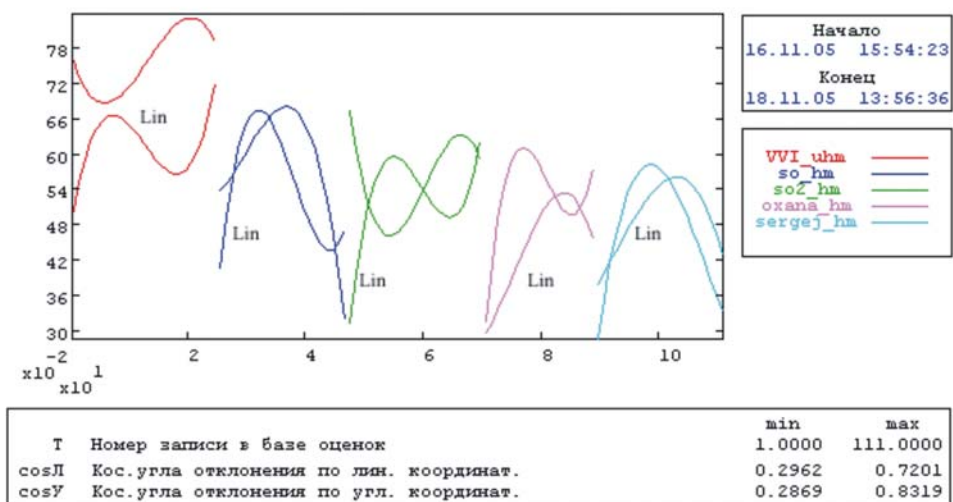


Рис. 10. Тренды показателей “точность” (вверху) и “ плавность” (внизу)

• 20-часовой исследовательский цикл для студентов 5-го курса. Студенты детально исследуют динамические свойства КМР, а также выполняют операции, управляя роботом с помощью имитатора пульта внутреннего интерфейса.

Циклы являются составной частью курсов “Введение в робототехнику” и “Проектирование робототехнических систем” профилирующей кафедры СМ-7.

Функционально-моделирующие стенды используются также в учебном процессе кафедр РК-10, ИУ-1 и СМ-13 МГТУ им. Н.Э. Баумана.

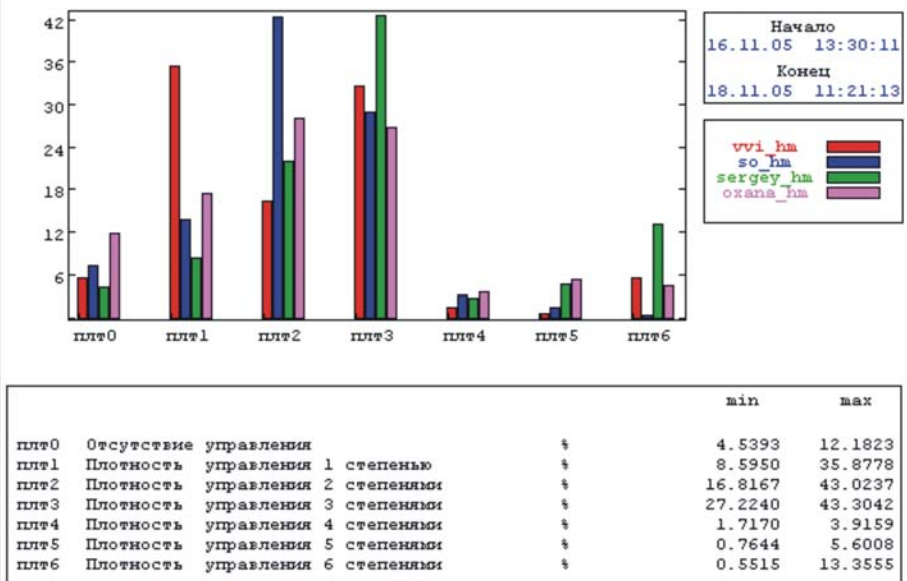


Рис. 11. Статистические оценки показателя “плотность управления”

Кроме того, ФМС используется при проведении ознакомительных экскурсий по упрощенной программе для школьников базовых школ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Работы по удаленному доступу и управлению ФМС выполнены под руководством профессора кафедры Э-8 В.Н. Зимина; ответственный исполнитель — канд. техн. наук А.В. Шумов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лесков А. Г., Шигорин Л. П., Шишов В. П. Автоматизированное проектирование систем управления манипуляционными роботами при помощи аналого-цифрового вычислительного комплекса. // Управление робототехническими системами и их очувствление: Сб. статей. – М., 1983. – С. 59–69.
2. Программно-аппаратурный комплекс для моделирования и расчета систем управления манипуляционных роботов / В.Н. Казаков, А.Г. Лесков, В.Е. Метлин, А.К. Сидоров // Управление в робототехнических комплексах и гибких автоматизированных производствах: Межвуз. сб. науч. трудов. – М.: МИРЭА, 1987. – С. 34–40.
3. Лесков А. Г., Игнатов В. И., Лескова С. М. Полунатурное моделирование технологических операций, выполняемых робототехническими комплексами // Изв. вузов. Машиностроение. – 1993. – № 2. – С. 136–139.
4. Лесков А. Г., Илларионов В. В. Математическое и полунатурное моделирование операций космических манипуляционных роботов // Тез. докл. 8-й МНТК “Пилотируемые полеты в космос”. – Звездный городок, 2009. – С. 70–71.
5. Лесков А. Г., Илларионов В. В., Лескова С. М., Полухин В. И. Разработка функционально-моделирующих стендов для подготовки операторов космических манипуляционных роботов // Тез. докл. 6-й МНТК “Пилотируемые полеты в космос”. – Звездный городок, 2005. – С. 179–180.

6. У н и в е р с а л ь н ы й ф у н к ц и о н а л ь н о - м о д е л и р у ю щ и й с т е н д к о с м и ч е с к и х м а н и п у л я ц и о н н ы х р о б о т в в с и с т е м е п o д г o т o в к и к o c м o н a в т o в / В.И. Полухин, В.П. Вересов, И.В. Воронеж, А.Г. Лесков // Авиакосмическая техника и технология. НТЖ. – 2000. – № 3. – С. 53–61.
7. Л е с к о в А. Г., М е т л и н В. Е., И г н а т о в В. И. Полунаатурное моделирование операций, выполняемых с использованием космических манипуляторов // Профессиональная деятельность космонавтов и пути повышения ее эффективности: Тез. докл. Междунар. науч.-практич. конф. – Звездный городок, 1993. – С. 115–116.
8. I n t e g r a t e d l a b o r a t o r y i n s t r u c t i o n i n r o b o t i c s / V.V. Illarionov, A.G. Leskov, S.M. Leskova, A.V. Shumov and A.M. Zimin // Engineering Education: Proc. of International Conference ICEE-2008. – Pecs-Budapest, Hungary, 2008. – Paper No. 83.
9. R e m o t e a c c e s s c o m p u t e r - a i d e d l a b o r a t o r i e s a n d p r a c t i c a l t r a i n i n g o f X X I c e n t u r y e n g i n e e r s / I.B. Fedorov, A.M. Zimin, S.V. Korshunov, A.G. Leskov, G.N. Solovyev, B.V. Buketkin and A.V. Shumov // Innovations 2008: World Innovations in Engineering Education and Research / Ed. W. Aung. – INEER, USA, Arlington, VA, 2008. – Chap. 37, pp. 415–423.
10. E R A . F l i g h t o p e r a t i o n s m a n u a l a n d p r o c e d u r e s . – F o k k e r S p a c e B . V . , N o v . 2005.
11. С и с т е м а у д а л е н н о г о д о s т у п а к у ч е б н о - н а у ч н о м у э к с п е р и м e n т а л ь н о м у р o б o т o т e х н и ч e с к о м у к o м п л e к с у / А.М. Зимин, В.В. Илларионов, А.Г. Лесков, С.М. Лескова, А.В. Шумов // Научный сервис в сети Интернет: решение больших задач: Труды Всеросс. науч. конф. – М., 2008. – С. 437–439.
12. М е д в е д е в В. С., Л е с к о в А. Г., Ю щ е н к о А. С. Системы управления манипуляционных роботов. – М.: Наука, 1978. – 416 с.
13. Ф у К., Г о н с а л е с Р., Л и К. Робототехника. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
14. Л е с к о в А. Г., Ю щ е н к о А. С. Моделирование и анализ робототехнических систем. – М.: Машиностроение, 1992. – 80 с.
15. Л е с к о в А. Г., М е д в е д е в В. С. Анализ динамики и синтез управления движением исполнительных органов роботов-манипуляторов // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. –1974. – № 6. – С. 80–88.
16. П о с т р о е н и е с и с т е м у п r a в л e н и я р o б o т a м и с и с п o л ь з o в a н и e м м a т e м a т и ч e с к и х м o d e л e й м a н и п у л я ц и o n н ы х у c t p o y c t в / Е.П. Попов, А.Ф. Верещагин, А.Г. Лесков, В.С. Медведев // Управление в пространстве: Труды VI Междунар. симп. ИФАК. – М., 1974. – Т. 2. – С. 255–266.
17. Л е с к о в А. Г., И л л a p и o н o в В. В., Л е с к o в a С. М. Методы и алгоритмы моделирования динамики манипуляционных роботов // Оборонная техника. НТЖ. – 2001. – № 8–9. – С. 50–57.
18. К о м п л e к с п p o г p a м м a в т o м a т и з a ц и и м o d e л и p o в a н и я c л e д я щ и х п p и в o d o в / А.Г. Лесков, Ю.Х. Аминев., С.М. Лескова, Л.П. Шигорин // Алгоритмы и программы: Сб. ГосФАП СССР. – М., 1985. – № 2. – С. 70.
19. К о м п л e к с п p o г p a м м a в т o м a т и з a ц и и п p o e к т и p o в a н и я c л e д я щ и х п p и в o d o в / А.Г. Лесков, Ю.Х. Аминев, С.М. Лескова, Л.П. Шигорин // Алгоритмы и программы: Сб. ГосФАП СССР. – М., 1985. – № 2. – С. 58.
20. Л е с к о в А. Г., И л л a p и o н o в В. В. Моделирование программ действий космических манипуляционных роботов // Тез. докл. 5-й МНТК “Пилотируемые полеты в космос”, – Звездный городок, 2003. – С. 40–41.
21. В у д с Р., Г о н с а л е с Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

22. Лесков А. Г., Игнатов В. И., Лескова С. М. Информационно-методическое обеспечение задач подготовки операторов бортовых манипуляторов // Тез. докл. 3-й Междунар. науч.-практич. конф. “Пилотируемые полеты в космос”. – Звездный городок, 1997. – С. 103–104.
23. Лесков А. Г., Игнатов В. И., Илларионов В. В. Интерактивный компьютерный курс “Манипуляторы МКС” // Тез. докл. 4-й Междунар. науч.-практич. конф. “Пилотируемые полеты в космос”. – Звездный городок, 2000. – С. 100–101.

Статья поступила в редакцию 15.04.2011

**ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”
ИЗДАТЕЛЬСТВО МГТУ имени Н.Э. БАУМАНА**

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ имени Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях.

В соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включен в Перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” с периодичностью 12 номеров в год.

Подписку на журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” можно оформить через агентство “Роспечать”.

Подписывайтесь и публикуйтесь!

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	250	500
72783	“Приборостроение”	2	250	500
79982	“Естественные науки”	2	250	500

Адрес редакции журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана”: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Тел.: (499) 263-62-60; (499) 263-67-98.

Факс: (495) 261-45-97. E-mail: press@bmstu.ru
