

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ КОСМИЧЕСКИХ МАНИПУЛЯТОРОВ С УПРУГИМИ КОНСТРУКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Проанализировано современное состояние и тенденции развития космической робототехники, в первую очередь — транспортных манипуляционных систем, применительно к которым накоплен значительный опыт орбитальной эксплуатации. Рассмотрены особенности монтажно-сервисных операций, потребностью в автоматизации которых в значительной мере будет определяться дальнейшее развитие средств космической робототехники. Отмечена возможная конструктивная целесообразность упругой податливости звеньев и сочленений манипулятора как пассивного средства уменьшения напряжений при выполнении контактных операций, связанных с силовым взаимодействием схвата и основания. Выделены требующие проведения дополнительных исследований задачи, порождаемые особенностями моделирования динамики управляемого движения манипулятора с учетом упругости элементов конструкции при синтезе исполнительной системы управления.

Проаналізовано сучасний стан та тенденції розвитку космічної робототехніки, в першу чергу – транспортних маніпуляційних систем, щодо яких накопичений значний досвід орбітальної експлуатації. Розглянуто особливості монтажно-сервісних операцій, потребами в автоматизації яких значною мірою визначатиметься подальший розвиток засобів космічної робототехніки. Зазначена можливість конструктивної доцільності пружної податливості ланок та зчленувань, як пасивного засобу зменшення напруженостей при здійсненні контактних операцій, що пов'язані з силовою взаємодією схвата і основи. Визначені завдання, обумовлені особливостями моделювання динаміки керованого руху маніпулятора з урахуванням пружності елементів конструкції при синтезі виконавчої системи керування, що потребують проведення додаткових досліджень.

Present state of the art and trends of development of space robotics, in particular, transportation manipulation systems wide-used in orbital operations are analyzed. Special features of automatic installation and services are considered for the future development of space robotics facilities. A possible design advisability of elastic compliance of manipulator links and joints as a passive means for decreasing stresses of contact operations associated with force interactions between the gripping device and the base is reported. Additional research problems associated with the special features of simulation of the manipulator controllable motion dynamics considering the elasticity of structural elements in synthesis of the final- control system are determined.

Потребность в автоматизации исследований, начиная с ранних этапов освоения околоземного пространства и небесных тел, очевидным образом стимулирует развитие роботизированных устройств космического базирования [1 – 19]. При этом манипуляторы являются ключевым функциональным элементом целого ряда как беспилотных, так и пилотируемых аппаратов. Перечислим некоторые наиболее важные классы космических манипуляторов в последовательности, отражающей основные этапы развития космической робототехники:

– манипуляторы аппаратов исследования Луны и планет (sampling arms) [1, 4 – 5, 12] с малыми функциональными возможностями (low dexterity), предназначенные для отбора образцов грунта вблизи от спускаемого аппарата. Функционируют в гравитационном поле в режиме силового взаимодействия с исследуемой поверхностью;

– транспортные (позиционирующие) манипуляторы космических аппаратов [1 – 5, 8 – 14, 19 – 26], например манипуляторы «Canadarm» и «Canadarm-2». Предназначены для перемещения полезного груза относительно движущегося по околоземной орбите основания (космического аппарата, орбитальной станции);

– манипуляторы перспективных «ловких», «сноровистых» («dexterous»)

роботизированных устройств с развитыми функциональными возможностями, например манипулятор «Dextre», используемый совместно с «Canadarm-2» в составе мобильной системы обслуживания Международной космической станции (МКС, International Space Station — ISS). Способны к использованию ряда инструментов и обеспечению более точного управления. Предназначены для выполнения сервисных и других связанных с различными ограничениями задач [1, 4 – 7, 13, 19].

Особо следует выделить относящиеся к классу «dexterous» свободнолетающие космические роботизированные модули [1, 6 – 7, 23], конструктивно выполненные в виде платформы с устройствами управления ее поступательным и вращательным движениями, несущей один или несколько манипуляторов, например испытанные в ходе экспериментов «ETS-VII», «Orbital Express». Развитием характерного для космических манипуляторов антропоморфного подхода может служить находящаяся в стадии экспериментальной отработки на МКС программа «Robonaut» по разработке «искусственного астронавта», способного к выполнению в открытом космосе определенных монтажно-сервисных операций с использованием тех же интерфейсов и инструментов, что и астронавт в скафандре [1, 12].

Уровень развития космических манипуляционных систем вообще и транспортных в частности в 1980-х – 1990-х годах в значительной степени олицетворяет манипулятор «Canadarm» (Remote Manipulator System, RMS или Shuttle Remote Manipulator System, SRMS), считающийся одним из наиболее эффективных и надежных устройств из эксплуатировавшихся в составе транспортных кораблей многоразового использования «Space Shuttle» [1 – 5, 8, 12 – 15]. Предназначен для перемещения полезного груза из грузового отсека в некоторую точку рабочей зоны с требуемой ориентацией, например при выведении спутника на орбиту. Способен также захватить свободнолетающий объект, разместить и зафиксировать его в грузовом отсеке. При помощи манипулятора «Canadarm» осуществляется поддержка работающих в открытом космическом пространстве астронавтов, в том числе их перемещение. Достаточно часто используется совместная работа астронавтов, один из которых закреплен на манипуляторе, а второй имеет возможность свободно перемещаться в зоне проведения работ. После разрушения шаттла «Columbia» (миссия STS-107), в ходе каждой из последующих миссий «Canadarm» совместно с системой Orbiter Boom Sensor System (OBSS), содержащей размещаемые на удлинителе манипулятора инструменты, использовался для тщательного обследования внешней поверхности челнока с целью обнаружения возможных повреждений теплозащитного покрытия.

Впервые «Canadarm» был успешно испытан в космосе в ходе второй миссии «Space Shuttle» (STS-2) в ноябре 1981 года. Последний полет состоялся в июле 2011 года (миссия STS-135). Таким образом, манипулятор успешно эксплуатировался в течение 30 лет. В [8] приведено краткое описание всех миссий манипулятора «Canadarm».

Могут быть выделены плечевая (shoulder), локтевая (elbow) и кистевая, или запястная (wrist) части антропоморфной кинематической схемы. Плечевая часть манипулятора в рабочем положении крепится к лонжерону транспортного отсека и включает шарниры рыскания плеча (shoulder yaw) и тангажа плеча (shoulder pitch). «Нижняя» и «верхняя» части манипулятора связаны в локтевом сочленении при помощи шарнира тангажа локтя (elbow pitch). В кистевой части расположены шарниры тангажа кисти (wrist pitch), рыскания

кисти (wrist yaw) и крена кисти (wrist roll). Шарниры манипулятора представляют собой кинематические пары пятого класса с вращательной степенью подвижности. Приводы шарниров имеют датчики измерения угла поворота и угловой скорости вращения. Каждый привод управляется независимо от остальных. Предусмотрена возможность фиксации степени подвижности при помощи тормозного устройства соответствующего шарнира. Крепление плечевой части к лонжерону космического корабля оборудовано механизмом аварийного отстрела в случае неисправности, не позволяющей в штатном режиме свернуть манипулятор и закрыть люк транспортного отсека. В области крепления расположены информационные разъемы и разъемы питания. Кистевая часть оканчивается концевым захватом-эффектором, срабатывающим в момент контакта штанги узла захвата груза с натянутыми тросами эффектора. Таким образом обеспечивается фиксация груза относительно манипулятора, позволяющая осуществлять операции по его перемещению в пределах рабочей зоны. Манипулятор защищается многослойным покрытием, обеспечивающим пассивную теплоизоляцию. Кроме того, существует активная система подогрева функционально важных узлов конструкции (механических и электронных).

Возможны режимы автоматического выполнения операций и управление вручную. Рабочее место оператора манипулятора в кормовой части орбитального корабля оснащено ручными органами управления вращением и поступательным перемещением груза. Операторы манипулятора наблюдают за производимыми ими действиями как непосредственно через иллюминаторы, так и при помощи экранов системы наблюдения, расположенных рядом с органами управления, при этом один из членов команды может ассистировать в качестве оператора видеокамеры. Видеокамеры закреплены также на самом манипуляторе (в локтевой и кистевой части). Длина манипулятора «Canadarm» составляет около 15 м, диаметр звеньев немногим более 30 см. Масса манипулятора чуть больше 400 кг. В изначальной конфигурации «Canadarm» был способен манипулировать грузами массой около 30 т. В середине 1990-х годов за счет доработки системы управления манипулятором его грузоподъемность была существенно увеличена для решения задач по сборке МКС. Всего было изготовлено пять манипуляторов «Canadarm».

Характерным примером использования RMS может служить успешно осуществленная в мае 2009 года миссия шаттла «Atlantis» STS-125 по обслуживанию телескопа «Hubble». Движущийся по орбите телескоп был захвачен манипулятором и размещен в грузовом отсеке на специальной вращающейся платформе, обеспечивающей удобство доступа к нему астронавтов при проведении сервисных работ. По их окончании телескоп был извлечен при помощи манипулятора из транспортного отсека и снова выведен на орбиту.

Конструкция разработанного в ЦНИИ РТК манипулятора космического корабля многоразового использования «Буран» [9, 22] аналогична конструкции манипулятора «Canadarm».

Эволюционным развитием манипулятора «Canadarm» является манипулятор «Canadarm-2» (SSRMS – Space Station Remote Manipulator System), также разработанный и изготовленный в Канаде [1, 4 – 5, 8, 12 – 15, 19]. Отметим наиболее важные усовершенствования SSRMS по сравнению с RMS.

«Canadarm-2», в отличие от «Canadarm», возвращаемого на Землю по окончании каждой из миссий шаттла, предназначен для постоянного функционирования в космосе и допускает возможность ремонта на орбите посред-

ством замены отдельных узлов (ORUs – Orbital Replacement Units). Для повышения надежности реализована также конструктивная избыточность SSRMS. Кинематическая схема «Canadarm-2» отличается от кинематической схемы «Canadarm» наличием еще одной (7-й) вращательной степени подвижности. Таким образом, у манипулятора «Canadarm-2» семь шарниров: крена плеча (shoulder roll), рыскания плеча (shoulder yaw), тангажа плеча (shoulder pitch), тангажа локтя (elbow pitch), тангажа кисти (wrist pitch), рыскания кисти (wrist yaw) и крена кисти (wrist roll). Изменение геометрии шарниров SSRMS по сравнению с RMS заключается в относительном смещении смежных звеньев вдоль оси вращения шарнира, за счет чего в любом шарнире возможен относительный поворот примыкающих звеньев на 270^0 в каждом направлении вращения. Плечевая и кистевая части SSRMS конструктивно подобны и оснащены одинаковыми концевыми эффекторами (Latching End Effectors – LEE), при помощи любого из которых может быть захвачен один из расположенных в различных точках станции узлов PDFG (Power Data Grapple Fixture), конструктивно аналогичных узлам захвата грузов, но обеспечивающих дополнительно интерфейсы электропитания, управления и передачи видеoinформации. Соответствующая часть манипулятора при этом становится его основанием, а противоположная – схватом. Таким образом, SSRMS может перемещаться в пределах станции, последовательно фиксируясь на различных узлах PDFG, в отличие от RMS, положение основания которого относительно шаттла неизменно. Длина манипулятора «Canadarm-2» около 17,6 м, масса – более тонны. Предназначен для манипулирования грузами массой более 100 т. Скорость выполнения операций манипулятором «Canadarm-2» зависит от типа и массы переносимого груза, а также от характера операции. Без груза схват манипулятора может передвигаться со скоростью до 38 см/с (у шаттла – около 60 см/с). Если же перемещаются грузы массой более 100 т, то скорость будет составлять менее 1,2 см/с. На шаттле скорость перемещения манипулятором груза массой 30 т – 5 см/с. Дистанция, требуемая для полной остановки манипулятора при его движении – 0,6 м. Важным отличием SSRMS от RMS является наличие датчиков сил и моментов.

Манипулятор «Canadarm-2» рассчитан на постоянное пребывание в космосе в течение не менее 15 лет и уже более 10 лет (с 2001 года) успешно эксплуатируется на МКС, являясь основным элементом мобильной системы обслуживания MSS (Mobile Servicing System), состоящей из пяти основных частей [13]:

1. Манипулятор SSRMS.
2. Манипулятор для специальных целей SPDM (Special Purpose Dexterous Manipulator) или «Dextre».
3. Мобильный транспортер МТ (Mobile Transporter), который перемещается по рельсам, расположенным вдоль основной фермы МКС.
4. Мобильная базовая система МБС (Mobile Base System), устанавливаемая на мобильный транспортер МТ для передвижения манипуляторов SSRMS и SPDM. На МБС расположены четыре узла PDGF.
5. Автоматизированное рабочее место РВС (Robotic Workstation).

SPDM, в 2008 году введенный в эксплуатацию на МКС, предназначен для выполнения сверхточных операций, включая монтаж и удаление малых полезных нагрузок типа буферных батарей, источников питания и компьютеров. Этот робот может также манипулировать инструментами типа специализированных гаечных ключей и отверток. SPDM оборудован светильниками,

видеокамерами, платформой и держателями для инструмента. Важной особенностью SPDM является наличие силовых и моментных датчиков, благодаря которым на органы управления могут передаваться ответные реакции и оператор манипулятора имеет возможность чувствовать прикосновение SPDM к объектам.

Автоматизированное рабочее место RWS, предназначенное для управления мобильной системой обслуживания MSS, оборудовано компьютером, мониторами, органами управления и интерфейсами, обеспечивающими управление всеми элементами MSS одним оператором. В состав летного экземпляра RWS входят:

- электронный блок управления;
- панель индикации и управления;
- ручка управления вращением;
- ручка управления поступательным движением;
- три видеомонитора;
- силовая конструкция для крепления элементов рабочей станции;
- кабельная сеть;
- программируемое оборудование, основное программное обеспечение для работы робототехнических систем и телевизионной системы.

Одно из летных рабочих мест RWS установлено в Куполе — специальном модуле МКС, который позволяет экипажу станции улучшить обзор места работы, для чего используются не только видеомониторы, но и большие иллюминаторы.

Состав доработок SSRMS по сравнению с RMS определялся в первую очередь потребностями автоматизации операций орбитального монтажа МКС. Можно выделить следующие этапы монтажа МКС, характерные с точки зрения особенностей проведения сборочных операций [12, 15]:

1. Выведение на орбиту и объединение посредством стыковки первых герметичных модулей станции, послуживших основой наращиваемой и видоизменяемой структуры взаимосвязанных модулей.

2. Формирование и последовательное наращивание негерметичной ферменной структуры – Integrated Truss Structure (ITS).

Процесс создания ITS с точки зрения перспектив крупногабаритных космических объектов можно рассматривать как первый масштабный опыт орбитального монтажа протяженных негерметичных ферменных структур, а саму ITS — как прообраз космических конструкций будущего.

ITS представляет собой [15] протяженную (длиной более 100 м) ферменную основу, предназначенную для размещения на ней различного оборудования, в первую очередь — крупногабаритных панелей солнечных батарей. На сегодняшний день энергообеспечение МКС осуществляется преимущественно за счет солнечных батарей, расположенных на ITS. Кроме солнечных батарей, на ITS размещены антенны и аппаратура связи, различное электронное оборудование, гироскопы, оборудование активной системы температурного контроля, панели радиаторов для отвода тепла от электронного оборудования. Внутри ITS размещены силовые и коммуникационные кабели, трубопроводы системы терморегулирования. Кроме того, вдоль ITS проложен рельсовый путь для перемещения мобильного транспортера. По этому же рельсовому пути вдоль ITS могут передвигаться мобильные тележки для перемещения грузов и астронавтов.

Кроме MSS, для эксплуатации в составе МКС разработаны японский манипулятор JEMRMS и европейский ERA [10 – 12]. Манипуляционная система Японского экспериментального модуля МКС Japanese Experiment Module Remote Manipulator System (JEMRMS) состоит из «главной руки» (Main Arm) длиной немногим менее 10 м и «малой точной руки» (Small Fine Arm). ERA (European Robotic Arm), предназначенный для перемещения полезной нагрузки и выполнения сервисных задач, представляет собой манипулятор длиной чуть более 11 м с 7-ю степенями свободы с перемещаемой базой.

Некоторые операции по перемещению грузов удобнее выполнять более ограниченными средствами. Так, американский ORU Transfer Device и российская система «Strela» на станции «Мир» являются позиционными устройствами-кранами для манипулирования большими массами при работе за бортом [4]. Управление осуществляют космонавты, вручную вращая рычаг у основания.

Стратегия и технологические особенности сборки ITS определялись стремлением к оптимальному сочетанию возможностей манипуляторов шаттлов и МКС с возможностями по проведению монтажных операций астронавтами во время выходов в открытый космос. При этом следует отметить, что несмотря на то, что основная часть операций по сборке сегментов ITS и монтажу размещенного на ITS оборудования выполнялась на Земле, а перемещение крупногабаритных грузов значительной массы (например, сегментов ITS из транспортного отсека пристыкованного к МКС шаттла) – при помощи манипуляторов RMS и SSRMS, значительный объем монтажных работ был выполнен астронавтами вручную.

Из выполняемых вручную астронавтами во время выходов в открытый космос наиболее характерны следующие монтажные и сервисные операции:

- демонтаж защитных покрытий, транспортных креплений;
- скрепление соединяемых фрагментов конструкции при помощи болтов;
- монтаж внешних элементов ферменной конструкции, например антенн связи, узлов крепления манипулятора;
- монтаж элементов коммуникационной инфраструктуры — состыковка разъемов кабельных сетей энергоснабжения и информационных, монтаж трубопроводов;
- замена оборудования, отработавшего ресурс или вышедшего из строя – аккумуляторных батарей, гироскопов, научных инструментов;
- перенос вручную (астронавтами, закрепленными на манипуляторе) грузов – транспортных контейнеров, мобильных тележек;
- техническое обслуживание наружных элементов инфраструктуры, например смазывание сочленений манипулятора;
- обследование повреждений внешних поверхностей шаттла, модулей станции, устранение текущих неполадок – освобождение запутавшихся кабелей, не работавших в штатном режиме автоматических узлов.

С ростом сложности и масштабности проектов — как исследовательских, так и прикладных — возрастает необходимость перехода от одиночных краткосрочных миссий к комплексным долговременным систематическим программам [1, 4 – 5, 16 – 18]. Эффективная продолжительность функционирования наиболее совершенных на сегодняшний день систем конкретного назначения все в большей степени зависит от наличия взаимосвязанной инфраструктуры, при помощи которой обеспечивается ремонт, сервисное обслуживание, устранение последствий возникновения нештатных ситуаций и т.д.

Например, принципиальная возможность функционирования телескопа «Hubble» всецело зависела от эффективности сервисных и ремонтных работ, выполнявшихся в экстремальных орбитальных условиях и требовавших сложного взаимодействия самых современных технических средств. Как отмечается в [16], к 2009 году за 19 лет орбитальной эксплуатации телескопа «Hubble» астронавты устранили 22 отказа, выполнив для обслуживания телескопа 17 выходов в открытый космос, на которые было затрачено около 160 часов.

Увеличение размеров космических объектов является обусловленной функциональным назначением потребностью (например, антенны спутниковой связи, космические радиотелескопы). При этом фиксированные транспортные ограничения на массу и габариты выводимого на орбиту груза определяют необходимость поиска новых конструктивных решений. С точки зрения принципов построения конструкции, способов перевода ее из транспортного положения в рабочее и особенностей орбитального обслуживания, в том числе с использованием роботизированных систем, космические объекты целесообразно разделить на три класса:

- монолитные, рабочая пространственная конфигурация которых незначительно отличается от транспортной;
- трансформируемые, выводимые на орбиту в сложенном состоянии и принимающие требуемую форму после выведения в автономном или частично автономном режиме, являющиеся, по преимуществу, сложными механизмами, не имеющими наземных аналогов;
- сборные, составные части которых выводятся на орбиту независимо, монтируемые непосредственно в космосе.

Переход от монолитных конструкций к трансформируемым, вообще говоря, не решает проблему достаточно жестких ограничений на рабочие габариты. Стремление к увеличению размеров конструкции в развернутом состоянии приводит к необходимости создания сложных механизмов трансформации, и увеличивает риск повреждения отдельных элементов в результате действия транспортных перегрузок [4]. Так, например [12], концепция находящегося в завершающей стадии реализации проекта космического телескопа JWST (James Webb Space Telescope) – «преемника» телескопа «Hubble» – наглядно иллюстрирует трудности, связанные с переходом от монолитной конструкции к трансформируемой.

Таким образом, возможности монолитных и трансформируемых конструкций, в основном используемых на сегодняшний день, в смысле перспектив увеличения размеров космических объектов, очевидно, ограничены. Вместе с тем, практическое применение конструкций, собираемых на орбите, на сегодняшний день в значительной степени сдерживается наличием большого количества технических трудностей, связанных с их монтажом и обслуживанием [4 – 5, 12 – 18]. Примером может служить описанный в [16 – 17] проект многоцелевой платформы на геостационарной орбите (ГСО). Питаемая мощной солнечной электростанцией платформа будет способна заменить десятки спутников связи. Возможность размещения на такой платформе сотен ретрансляторов различных диапазонов позволит предоставлять услуги связи потребителям на значительных территориях, в том числе и на коммерческой основе. Фрагменты платформы массой до 20 т предлагается выводить на низкую (300 – 500 км) околоземную орбиту. Смонтированную в орбитальных

условиях конструкцию массой около 50 т предлагается затем доставить на ГСО при помощи ядерно-энергетической установки.

Таким образом, учитывая тенденцию к развитию крупногабаритных космических объектов и опыт сборки МКС, весьма перспективным представляется развитие средств космической робототехники в направлении повышения степени автоматизации монтажных и сервисных операций на орбите, и в обозримой перспективе можно предположить потребность в новых классах манипуляционных робототехнических систем, обладающих следующими особенностями:

- способностью к выполнению как транспортных, так и монтажно-сервисных операций, использованию разнообразных инструментов;
- способностью к автономному решению как можно большего числа задач в режиме программного или дистанционного управления вне пилотируемых миссий.

Подтверждением отмеченной тенденции, кроме потребностей описанного выше и других подобных масштабных проектов, может служить функциональное назначение разрабатываемых систем и состав проводимых в последнее время экспериментов [1, 3 – 7, 12, 16 – 19]. Например, в ходе эксперимента «ETS-VII» в автономном режиме были осуществлены:

- обзор поверхности обслуживаемого спутника с помощью видеокамер, установленных на манипуляторе;
- замена модуля обслуживаемого спутника;
- оценка точности манипулирования при силовом управлении процессом следования схвата с деталью по неровной поверхности;
- отработка принципов телеуправления с учетом задержки прохождения сигнала по каналу между спутником и наземной станцией управления;
- отработка монтажных операций (развертывание гибких проводов, стыковка-расстыковка разъемов и др.);
- согласованное управление движением основания и процессом манипулирования;
- захват манипулятором свободнолетающего груза.

Следует отметить противоречивость требований, предъявляемых к конструкции манипулятора транспортными и монтажно-сервисными режимами функционирования. Основные ограничения при решении транспортных задач формулируются применительно к кинематическим параметрам движения системы подвижное основание – манипулятор – переносимый груз и обусловлены требованиями к точности позиционирования груза, наличием препятствий в рабочей зоне, допустимыми скоростями перемещения груза относительно основания, взаимного перемещения звеньев кинематических пар. Усилия в элементах конструкции манипулятора для данного режима движения определяются преимущественно инерционными свойствами основания, манипулятора и груза. При выполнении сервисных и монтажных операций особо следует выделить режим силового взаимодействия манипулятора с основанием, когда усилия в конструкции определяются реакциями основания и могут ощутимо превышать усилия, возникающие в транспортном режиме. Стремлением к преодолению указанных трудностей обусловлено развитие «dexterous» систем в направлении силомоментного «очувствления». Манипуляционные системы, предназначенные для выполнения монтажно-сервисных работ, оснащаются датчиками сил и моментов, информация от которых используется, например, как уже отмечалось, в системе «очувствления» мани-

пуляторов MSS, позволяющей оператору ощущать в некотором масштабе усилия в конструкции. Возможна также [4] «активная система контроля податливости», обеспечивающая автоматическое поддержание в требуемых пределах усилий в конструкции манипулятора.

Альтернативой подобным системам может быть уменьшение жесткости элементов конструкции манипулятора – звеньев и сочленений. В [19] отмечается, что упругие манипуляторы обладают рядом преимуществ при решении определенных задач, и на их исследование направлены усилия специалистов ряда лабораторий. Вопросы влияния упругих свойств конструкции манипулятора на динамику соударения при осуществлении стыковочных операций рассматривались в [20]. В работе [21] проведен анализ влияния изменения жесткостных характеристик системы вида твердого тела и упругого пространственного шестизвенника с податливыми шарнирами на относительные силы в точке касания в процессе захватывания груза. Для случая, когда захватывающее устройство идеализировано в виде плоской поверхности, скользящей относительно неподвижного такелажного элемента, показано, что относительная сила в точке касания возрастает с увеличением жесткости конструкции, приведены результаты вычислений.

Рассматриваемая механическая расчетная схема может быть интерпретирована как транспортный манипулятор, адаптированный для выполнения монтажно-сервисных операций. При этом упругость звеньев и сочленений может рассматриваться в качестве пассивного средства уменьшения напряжений в конструкции при выполнении контактных операций. Целесообразность подобного конструктивного решения может быть обусловлена стремлением к снижению стоимости и повышению надежности автономного функционирования космических манипуляционных систем при решении, например, упомянутых выше задач по созданию крупногабаритных космических конструкций. Однако разработка подобных систем сопряжена с необходимостью тщательного всестороннего исследования влияния упругих свойств конструкции, в первую очередь – на динамику манипулирования в режиме перемещения полезного груза. При этом, очевидно, возрастает роль математического (имитационного) моделирования, как в связи с невозможностью полномасштабной наземной экспериментальной отработки, так и в связи с обусловленными спецификой космического применения особенностями конструкции, из которых, помимо упругости элементов конструкции манипулятора, необходимо отметить:

- пренебрежимо малое влияние на движение перемещаемого манипулятором груза относительно основания гравитационных сил и моментов;
- подвижность основания в инерциальном пространстве;
- малую массу манипулятора по сравнению с массами основания и груза;
- малую мощность двигателей приводов степеней подвижности.

Следует отметить, что, несмотря на накопленный опыт моделирования подобных систем и возможности современных компьютерных средств, необходима разработка специальных подходов к преодолению известных противоречий между стремлением к использованию предпочтительной с точки зрения синтеза регулятора наиболее простой модели динамики манипуляционного механизма и необходимой для обеспечения требуемой точности имитационного моделирования динамики управляемого движения полнотой учета механических свойств, в первую очередь конечной жесткости конструктивных элементов. Важным является также сочетание степени детализации

механической расчетной схемы и скорости вычислений, учитывающее ограниченные возможности бортовых вычислительных средств и пропускную способность каналов связи. При этом, как показал опыт исследования конкретных технических систем, эффективным является подход, основанный на использовании иерархической совокупности моделей динамики [22 – 26]. На формировании совокупности моделей динамики основывалась, в частности, методика синтеза исполнительной системы управления, разработанная в процессе исследования влияния конечной жесткости элементов конструкции манипулятора транспортного корабля многоразового использования на динамику манипулирования. Вопросы сопоставительного анализа математических моделей различной степени полноты подробно рассмотрены также в [27].

Таким образом, опыт разработки иерархии моделей динамики космического манипулятора на подвижном основании [22 – 26] может быть эффективно использован при решении задач, возникающих в ходе создания новых перспективных космических манипуляционных систем. При этом возможен как поэтапный подход к анализу обоснованности последовательно вводимых упрощающих предположений относительно учитываемых в математической модели свойств объекта, так и строгие математические приемы построения приближенных математических моделей [27].

Выводы

1. Успешный опыт эксплуатации космических транспортных манипуляционных систем (в первую очередь RMS и MSS) подтверждает их эффективность и целесообразность дальнейшего их развития.

2. Перспективы космической робототехники, в том числе манипуляционных систем, будут определяться расширением спектра решаемых с их помощью задач, в первую очередь в направлении автоматизации монтажно-сервисных операций. Данное предположение основывается на анализе направлений технического совершенствования существующих систем (например, сопоставлении RMS и MSS), состава проведенных и планируемых экспериментов (например, ETS-VII, Orbital Express), содержания перспективных проектов и исследовательских программ.

3. Ввиду потенциального многообразия возлагаемых на разрабатываемые робототехнические системы задач, а также в связи с необходимостью обеспечения универсальности, автономности, возможности использования разных режимов управления, возникающая противоречивость требований к манипуляционным системам определяет целесообразность воплощения в перспективе различных конструктивных решений.

4. Для обеспечения компромисса между потребностью в точности позиционирования (отслеживания программной траектории) при выполнении транспортных операций, с одной стороны, и необходимостью снижения до приемлемого уровня напряжений в элементах конструкции манипулятора при выполнении контактно-силовых монтажно-сервисных операций, с другой стороны, возможной альтернативой сложным дорогостоящим системам с избыточным с точки зрения транспортных задач числом степеней подвижности, оснащенных датчиками сил и моментов, могут быть конструктивно аналогичные транспортным системам транспортно-сборочные манипуляторы со специально вводимой в качестве пассивного средства снижения напряжений упругой податливостью звеньев и сочленений. При их разработке особую актуальность приобретают вопросы моделирования динамики управляемого движения, синтеза исполнительной системы управления, особенно для режи-

мов предварительного построения и автономной отработки программной траектории.

1. Тенденции развития космических манипуляционных систем / *А. П. Аллатов, П. А. Белоножко, П. П. Белоножко, А. А. Витушкин, С. В. Тарасов, А. А. Фоков* // Сборник докладов научной конференции «Информационные технологии в управлении сложными системами». – Днепропетровск, 2011 – С. 176 – 180.
2. Дистанционно управляемые роботы-манипуляторы / под ред. *Е. П. Попова*. — М. : Мир, 1976. — 462 с.
3. *Макарычев В. П.* Супервизорное управление космическими манипуляторами / *В. П. Макарычев, Е. И. Юревич*. — СПб. : Астерион, 2005. — 108 с.
4. *David L. Akin.* An Overview of Space Robotics. – 2007. Dave Akin's Web Site. Online. Internet. 01 июня 2011. Доступно: <http://spacecraft.ssl.umd.edu/academics/692F07/RoboticsOverview.pdf>
5. *Kazuya Yoshida* Achievements in Space Robotics. Expanding the Horizons of Service and Exploration / *Kazuya Yoshida* // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2009. – December. – P. 21 – 28.
6. *Kazuya Yoshida* Engineering Test Satellite VII Flight Experiments for Space Robot Dynamics and Control: Theories on Laboratory Test Beds Ten Years Ago, Now in Orbit / *Kazuya Yoshida* // The International Journal of Robotics Research. – 2003. – V. 22, №5. – P. 321 – 335.
7. *Земляков С. Д.* Некоторые проблемы управления при роботизированной сборке больших космических конструкций на орбите / *С. Д. Земляков, В. Ю. Рутковский, В. М. Суханов* // Автоматика и телемеханика. – 2006. – № 8. – С. 36 – 50.
8. Сайт Канадского космического агентства. Режим доступа к сайту: <http://www.asc-csa.gc.ca/>.
9. Электронный ресурс «Энциклопедия крылатого космоса». Режим доступа к ресурсу: <http://www.buran.ru/>.
10. Электронный ресурс, посвященный Японскому экспериментальному модулю Международной космической станции. Режим доступа к ресурсу: <http://kibo.jaxa.jp/en/>.
11. Раздел сайта Европейского космического агентства, посвященный манипулятору ERA. Режим доступа к разделу сайта: http://www.esa.int/esaHS/ESAQEI0VMOC_iss_0.html/.
12. <http://ru.wikipedia.org>.
13. *Журавин Ю.* Грузы STS-100 / *Ю. Журавин* // Новости космонавтики. – 2001. – № 6 (221). – С. 26 – 29.
14. *Лисов И.* STS-100 : полет тяжелый, но успешный / *И. Лисов* // Новости космонавтики. – 2001. – № 6 (221). – С. 18 – 24.
15. *Лантратов К.* Грузы «Атлантика» / *К. Лантратов* // Новости космонавтики. – 2002. – № 6 (223). – С. 12 – 15.
16. Космонавтика XXI века / под ред. *Б. Е. Чертока*. – М. : «РТСофт», 2010. – 864 с.
17. *Черток Б. Е.* Какой будет космонавтика в 2101 году / *Б. Е. Черток* // Российский космос. – 2009. – № 1(37). – С. 12 – 19.
18. Перспективы освоения Луны / *А. Н. Перминов, Н. Ф. Моисеев, Н. Н. Севастьянов, Н. А. Брюханов, Г. А. Сизенцев, В. В. Синявский, Б. И. Сотников, С. Ф. Стойко* // Известия академии наук. Энергетика. – 2006. – № 1. – С. 3 – 14.
19. Flexible robot manipulators : modelling, simulation and control. – (IET control series) — ISBN 978-0-86341-448-0
20. *Белоножко П. А.* Математическое моделирование динамики стыковки с учетом трения в стыковочном узле / *П. А. Белоножко* // Техническая механика. – 1993. – № 1. – С.91 – 97.
21. *Муковина М. В.* Собственные колебания упругого манипулятора в процессе захватывания груза / *М. В. Муковина, С. В. Чернявская* // Техническая механика. – 1993. – № 1. – С.82 – 85.
22. Особенности синтеза системы управления космическим манипулятором / *А. П. Аллатов, П. А. Белоножко, П. П. Белоножко, С. В. Тарасов, А. А. Фоков* // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. – 2010. – Т. 15, № 2(31). – С. 38 – 57.
23. Особенности формирования моделей динамики перспективных космических манипуляторов в задачах синтеза управления / *А. П. Аллатов, П. А. Белоножко, П. П. Белоножко, А. А. Витушкин, С. В. Тарасов, А. А. Фоков* // Сборник докладов научной конференции «Информационные технологии в управлении сложными системами». – Днепропетровск, 2011 – С. 181 – 184.
24. Динамика пространственно развитых механических систем изменяемой конфигурации / *А. П. Аллатов, П. А. Белоножко, В. В. Горбунцов, О. Г. Ивлев, С. С. Чернявская, В. Н. Шичанин*. – К. : Наукова думка, 1990. – 256 с.
25. *Белоножко П. А.* К математическому моделированию динамики системы двух тел, связанных упругим многосвязником / *П. А. Белоножко, М. М. Жечев, С. В. Тарасов* // Прикладная механика. – 1986. – Т. 22 № 7. – С. 96 – 103.
26. *Белоножко П. А.* Синтез управления движением многосвязного упругого манипуляционного механизма КА / *П. А. Белоножко, А. А. Фоков, В. Н. Шичанин* // Техническая механика. – 1995. – № 4. – С. 16 – 21.
27. *Кузьмина Л. К.* Методы А. М. Ляпунова в динамике систем гиросtabilизации и ориентации / *Л. К. Кузьмина* // Третья Международная конференция «Космические технологии : настоящее и будущее», апрель, 2011 г., Днепропетровск, Украина. – Днепропетровск, 2011. – С. 39.

Институт технической механики
НАН Украины и НАКА Украины,

Получено 28.10.11,
в окончательном варианте.03.02.12

