

УДК 007.52:629.78

Космическая робототехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. Аналитический обзор

Белоножко П. П.^{1,*}

^{*}byelonozhko@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены тенденции развития космической робототехники, являющиеся следствием естественной логики ее развития и определяемые потребностью перспективных объектов космической техники в робототехническом обслуживании. Выделены наиболее важные элементы конструктивного облика и особенности создания и эксплуатации многофункциональных наращиваемых космических систем, в том числе не имеющих аналогов и прототипов, объединенных потребностью в автоматизации связанных с их созданием, эксплуатацией и утилизацией задач. Рассмотрена концепция монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей. В рамках процедуры орбитального монтажа выделены характерные динамические режимы, актуальные с точки зрения практической реализации управляемого движения.

Ключевые слова: космическая робототехника, потребность в робототехническом обслуживании, перспективная космическая инфраструктура, монтажно-сервисные автономные роботизированные космические модули, режимы управляемого движения

Введение

Перспективы космической робототехники связаны как с развитием отработанных прототипов в направлении расширения функциональных возможностей, так и с созданием новых классов систем, не имеющих на сегодняшний день эксплуатируемых аналогов. При этом уникальность объектов космической робототехники, экстремальные условия функционирования, затрудненность полномасштабной наземной отработки определяют многообразие конструктивных решений и широкий спектр вопросов, требующих дополнительных теоретических и экспериментальных исследований [1–45].

Могут быть выделены три группы задач:

1. Задачи, успешно решенные на сегодняшний день с использованием отработанных в орбитальных условиях средств космической робототехники.
2. Задачи, решаемые сегодня с использованием обрабатываемых, в том числе, в орбитальных условиях средств робототехники.

3. Перспективные задачи, следующие из логики развития космической техники, определяющие пути ее дальнейшего развития и требующие разработки и создания новых средств космической робототехники.

Таким образом, направления развития космической робототехники в значительной мере определяются историей ее развития с одной стороны, и нарастающей потребностью в робототехническом обслуживании применительно к перспективным объектам космической техники с другой.

1. История развития и современное состояние

1.1 Манипулятор «Canadarm»

В качестве примера успешного решения орбитальных задач с применением отработанных средств космической робототехники следует в первую очередь назвать использование манипулятора «Canadarm» (Remote Manipulator System, RMS или Shuttle Remote Manipulator System, SRMS), рис. 1.

«Canadarm» в значительной степени олицетворяет уровень развития космической робототехники в 1980-х – 1990-х годах и считается одним из наиболее эффективных и надежных устройств из эксплуатировавшихся в составе транспортных кораблей многоразового использования «Space Shuttle» [10 – 13, 21, 22, 24].

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 [11] приведено краткое описание всех миссий манипулятора «Canadarm». Манипулятор «Canadarm» предназначен для перемещения полезного груза из грузового отсека в некоторую точку рабочей зоны с требуемой ориентацией, например, при выведении спутника на орбиту (рис. 2).

На рисунке 1 в составе электрооборудования кабины (Cabin Electronics) выделены органы управления манипулятором (Hand Controller), панель отображения информации об управляемом движении манипулятора (Displays and Controls Panel), мониторы (Closed-circuit Television Monitors) для отображения изображения с видеокамер неподвижных относительно транспортного отсека (Closed-circuit Televisions) и оснащенных системой подсветки и расположенных на манипуляторе (Closed-circuit Televisions on Pan and Tilt Unit, Closed-circuit Televisions and Lights). Предусмотрено также непосредственное наблюдение за процессом манипулирования через иллюминаторы (Window View). В составе манипулятора (Shuttle Robotic Arm) выделены теплозащитное покрытие (Thermal Protection Kit) и специальное захватное устройство – концевой эффектор (Standard End Effector), обеспечивающее захват и удержание оборудованного соответствующим интерфейсом захвата полезного груза (Payload).

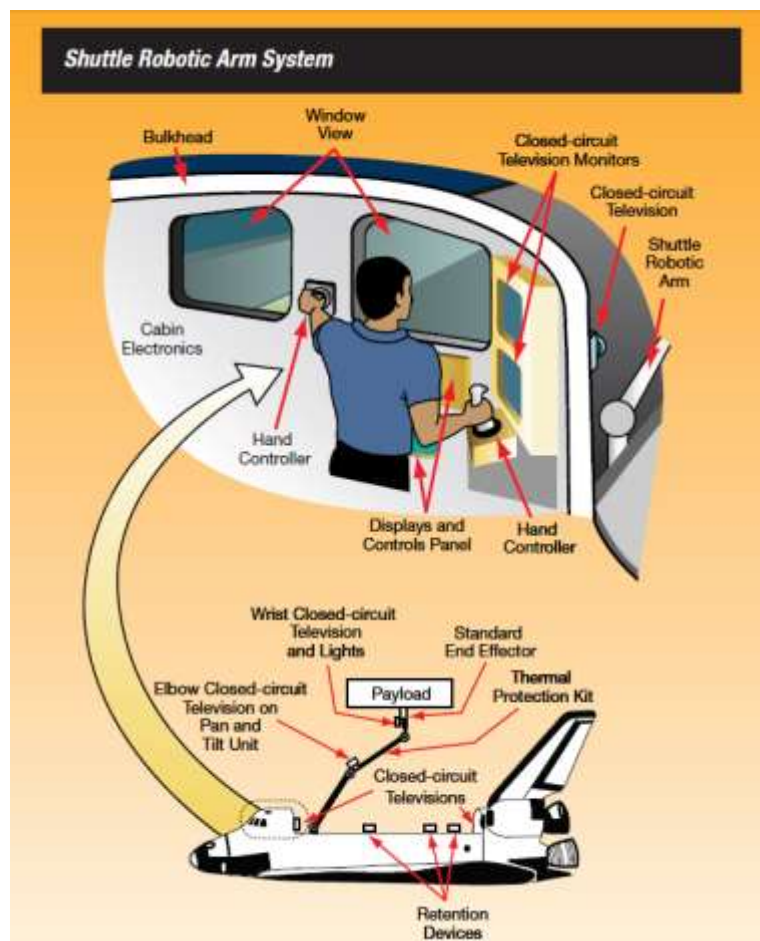


Рисунок 1 – Remote Manipulator System (RMS), [13]



Рисунок 2 – захват расположенного в грузовом отсеке шаттла «Discovery» телескопа Хаббл (Hubble Space Telescope) в процессе выведения его на орбиту в апреле 1990 года, [11], фото NASA

Способен 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 (рис. 3), использовался для тщательного обследования внешней поверхности челнока с целью обнаружения возможных повреждений теплозащитного покрытия.

Могут быть выделены плечевая (shoulder), локтевая (elbow) и кистевая, или запястная (wrist) части антропоморфной кинематической схемы (рис. 4). 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.



Рисунок 3 – Orbiter Boom Sensor System (OBSS), используемая совместно с «Canadarm» в ходе миссии STS-125, май 2009 года, [11], фото NASA

Приводы шарниров имеют датчики измерения угла поворота и угловой скорости вращения. Каждый привод управляется независимо от остальных. Предусмотрена воз-

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 (рис. 5), обеспечивающим захват и фиксацию груза относительно манипулятора, что позволяет 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).

На рис. 4 выделены основные компоненты манипулятора (Components of the Shuttle Robotic Arm): звенья манипулятора (Arm Booms), двигатели приводов степеней подвижности (Joint Motor), тормозные устройства шарниров (Joint Brakes), встроенная электроника (Arm Electronics), теплозащитные покрытия (Thermal Blankets). В составе захватного устройства – концевой эффектора (End Effector) выделены блок электроники (End Effector Electronics Unit) и механизм захвата и удержания полезного груза (End Effector Brakes and Clutches). Из оборудования, расположенного в кабине экипажа (Crew Compartment) отдельно выделены органы управления поступательным (Translational Hand Controller) и вращательным (Rotational Hand Controller) перемещением полезного груза, а также контроллер (Manipulator Controller Interface Unit), обеспечивающий обмен данными с бортовым компьютером (Data From/To Shuttle General Purpose Computer).

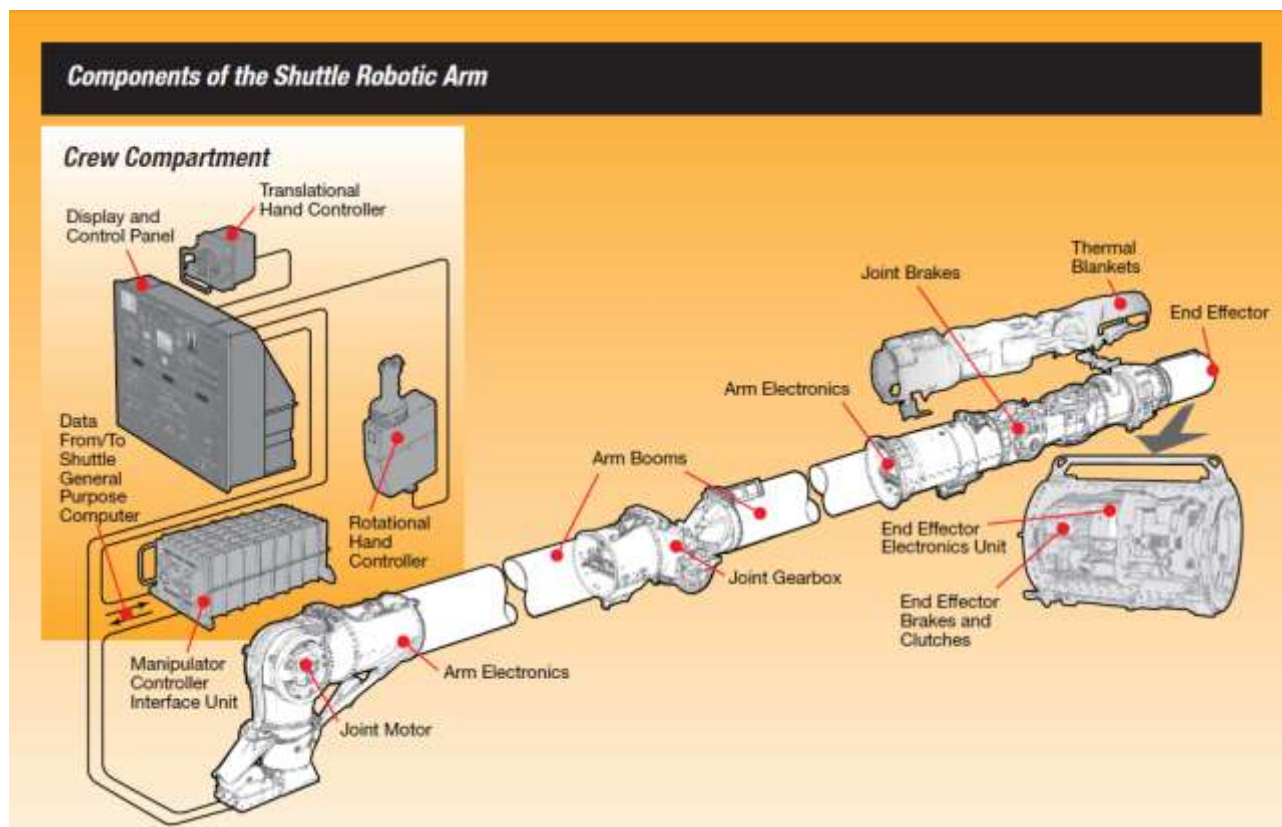


Рисунок 4 – основные функциональные элементы манипулятора «Canadarm», [13]

Общий вид и принцип действия захватного устройства иллюстрируется рис. 5.

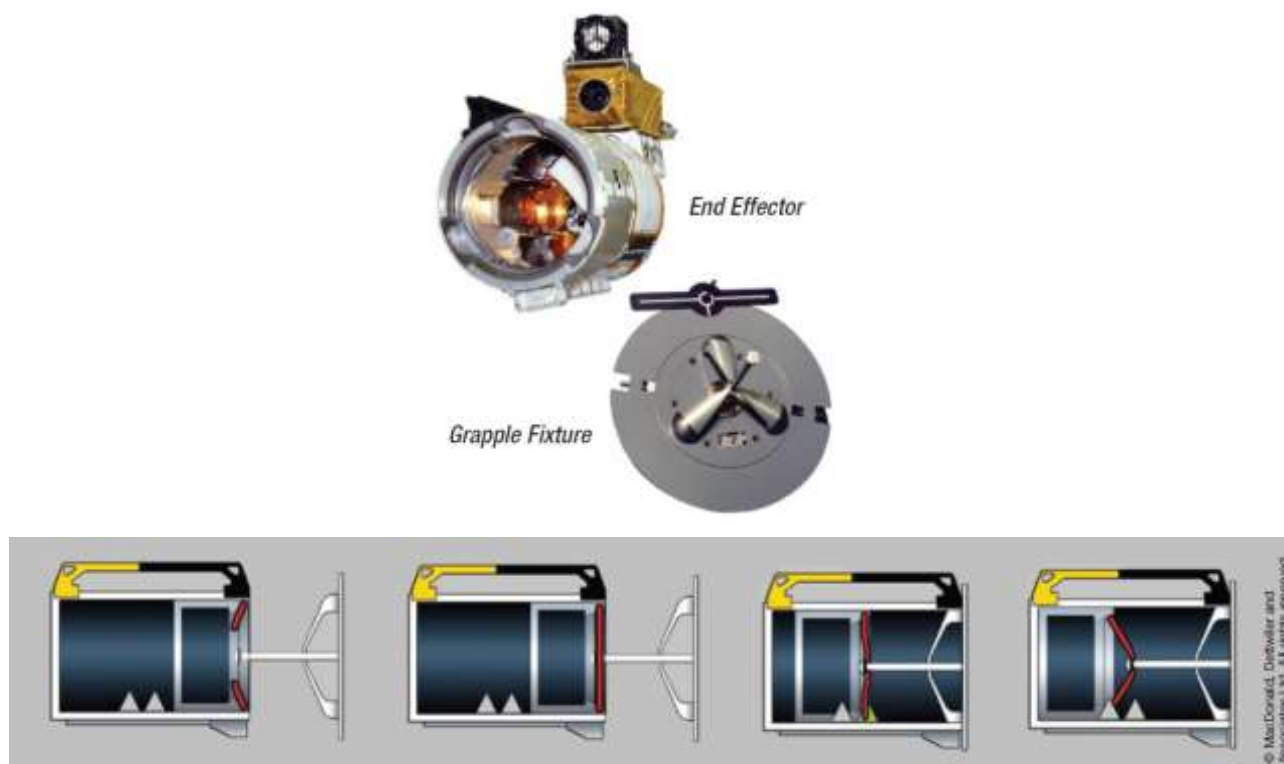


Рисунок 5 – концевой эффектор манипулятора «Canadarm», [13]

Возможны режим автоматического выполнения операций и управление вручную. Рабочее место оператора манипулятора в кормовой части орбитального корабля оснащено ручными органами управления вращением и поступательным перемещением груза (рис. 1, 4, 5). 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 немного более 30 см. Масса манипулятора чуть больше 400 кг. В изначальной конфигурации «Canadarm» был способен манипулировать грузами массой около 30 т. Всего было изготовлено пять манипуляторов «Canadarm».

Манипулятор «Canadarm» активно использовался для осуществления сервисного обслуживания телескопа «Hubble» в ходе следующих миссий: STS-61 (1993), STS-82 (1997), STS-103 (1999), STS-109 (2002), STS-125 (2009).

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.

Для отработки навыков управления манипулятором используется специальный тренажер (рис. 6).



Рисунок 6 – Тренажер для подготовки операторов манипулятора (NASA Johnson Space Center, Houston, Texas), [13]

Также манипулятор «Canadarm» использовался в нештатных ситуациях. Например, в ходе миссии STS-41D (1984) при помощи манипулятора было удалено нежелательное ледяное образование на внешней поверхности шаттла, во избежание возможных проблем при возвращении на Землю.

Еще один пример – оснащение манипулятора специальным гибким устройством для активации спутника Leasat-3.

1.2 Мобильная система обслуживания (Mobile Servicing System) Международной космической станции

Эволюционным развитием манипулятора «Canadarm» является манипулятор «Canadarm-2» (SSRMS – Space Station Remote Manipulator System), также разработанный и изготовленный в Канаде [10 – 17, 19, 21, 22, 24, 42, 44]. «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. 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 с 2001 года успешно эксплуатируется на МКС, являясь основным элементом мобильной системы обслуживания MSS (Mobile Servicing System), состоящей из пяти основных частей (рис. 7):

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



Рисунок 7 – мобильная система обслуживания МКС – MSS (Mobile Servicing System), [14]

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.

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 [10 – 12, 13 – 17, 24, 42, 44]:

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 протяженную (длиной более 100 м) ферменную основу (рис. 8), предназначенную для размещения на ней различного оборудования, в первую очередь — крупногабаритных панелей солнечных батарей. 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.

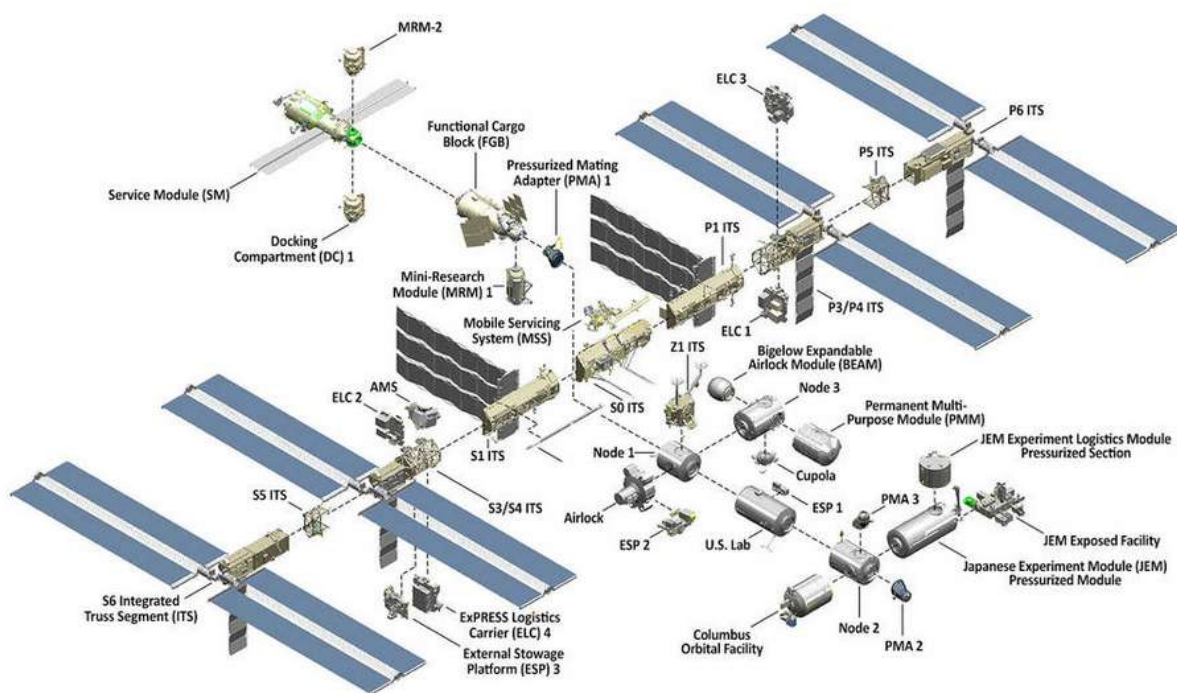


Рисунок 8 – Ферменная структура (ITS) в составе Международной космической станции, [10]

Рис. 9-10 иллюстрируют совместное использование манипуляторов RMS и SSRMS в процессе сборки ферменной структуры МКС на примере монтажа сегментов S3/S4.

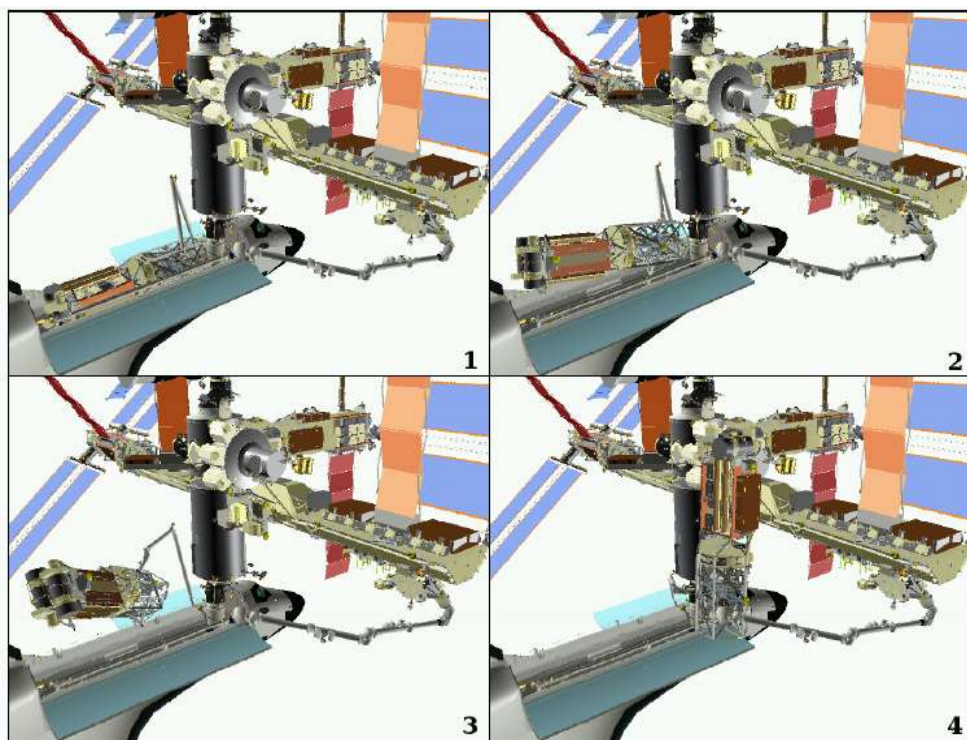


Рисунок 9 – монтаж сегментов S3/S4. Извлечение манипулятором «Canadarm» из транспортного отсека шаттла и захват манипулятором «Canadarm-2», [11]

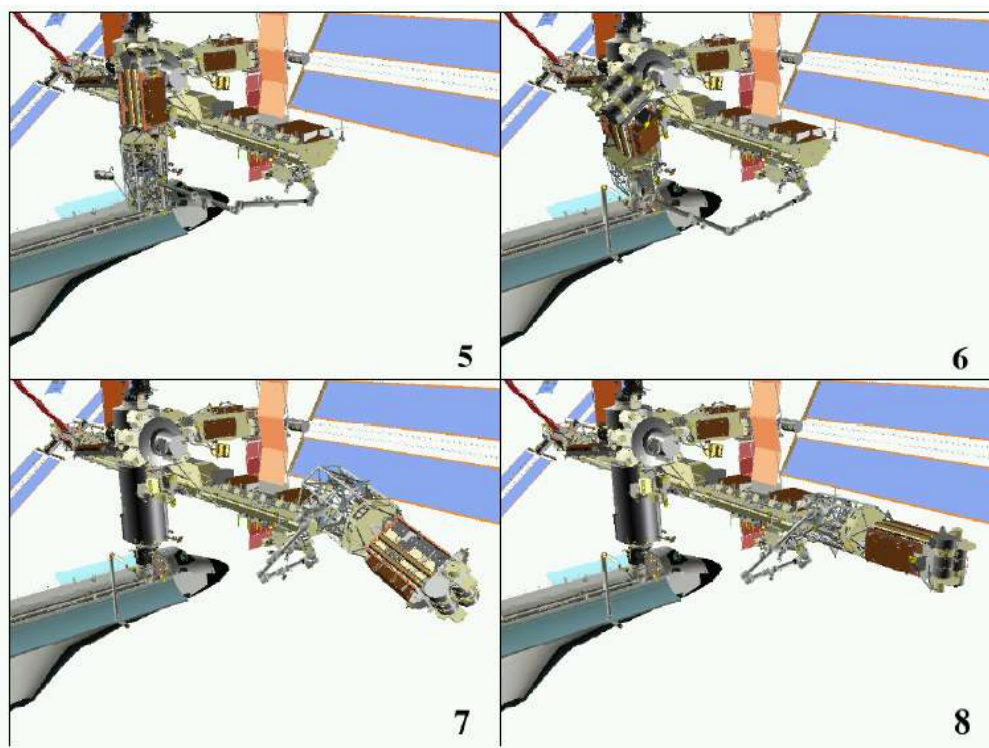


Рисунок 10 – монтаж сегментов S3/S4.
Установка манипулятором «Canadarm-2» на штатное место, [11]

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.

Использование телеуправления с наземной станции операцией замены ORU блока, осуществленной при помощи манипуляторов SSRMS и SPDM (рис. 11), в [15] особо выделяется в качестве достижения, позволившего не привлекать членов экипажа к управлению манипулятором.

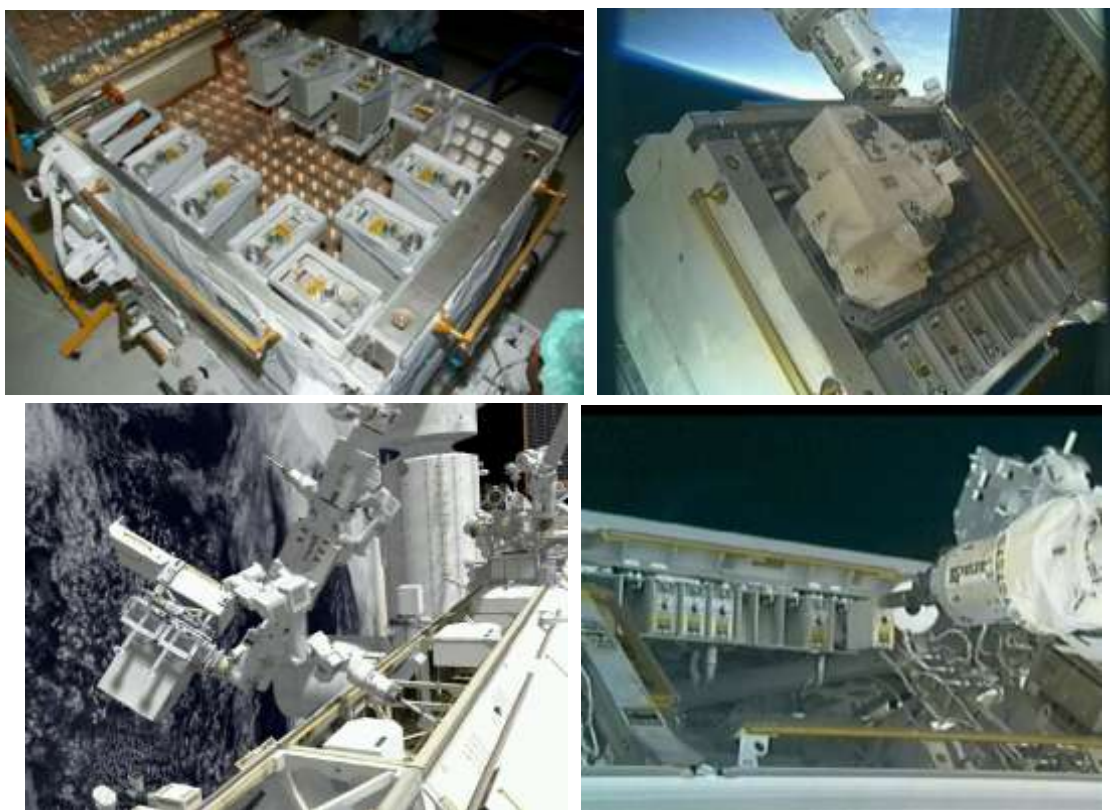


Рисунок 11 – операция по замене расположенного на ITS блока ORU при помощи манипулятора «Dextre», [15]

В августе 2011 года при помощи одного из манипуляторов управляемого с Земли робота «Dextre», закрепленного на манипуляторе «Canadarm-2», вышедший из строя блок RPCM (Remote Power Control Module) был извлечен из разъема на негерметичной ферменной структуре (Integrated Truss Structure – ITS), после чего исправный блок, предварительно извлеченный из специального контейнера и удерживаемый вторым манипулятором, был размещен на место вышедшего из строя и зафиксирован при помощи штатного крепления. Неисправный блок был перемещен в контейнер. Как отмечается в [15], усилия

в конструкции, обусловленные необходимостью преодоления трения в разъеме при извлечении блока, весьма ощутимо превысили расчетные, что потребовало проведения дополнительного моделирования и разработки специальной методики извлечения блока. Кроме того, значительные усилия в конструкции манипулятора «Canadarm–2» послужили, вследствие некоторой ее деформации, причиной возникновения сигналов датчиков углового перемещения шарниров, интерпретируемых системой вычисления положения манипулятора как перемещение схвата, отсутствующее на самом деле – «фантомное движение», что потребовало проведения корректирующих вычислений

1.3 Манипуляторы JEMRMS, ERA, «Аист»

Japanese Experiment Module Remote Manipulator System (JEMRMS), рис. 12, которая состоит из «главной руки» (Main Arm) длиной немногим менее 10 м и «малой точной руки» (Small Fine Arm) [10 – 17].

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 [12, 19, 21, 22].



Рисунок 12 – японский экспериментальный модуль МКС, оснащенный манипуляционной системой Japanese Experiment Module Remote Manipulator System (JEMRMS), [14]

Манипулятор для космического корабля «Буран» (рис. 13) был разработан в Государственном научном центре - Центральном научно-исследовательском и опытно-конструкторском институте робототехники и технической кибернетики (ГНЦ ЦНИИ РТК РФ) (Санкт-Петербург) [55]. Манипулятор имеет кинематическую схему, сходную с манипулятором Space Shuttle (RMS). Кроме шести вращательных степеней подвижности, он имеет одну транспортную степень (для начальной установки в грузовом отсеке корабля при закрытых створках грузового отсека). Предусмотрены режим ручного управления, режим автоматического управления, режим целеуказания и резервный режим пошарнирного управления. Важной особенностью, отличающей манипулятор «Бурана» от RMS, является возможность телеуправления оператором, находящимся на Земле.



Рисунок 13 – бортовой манипулятор ОК «Буран», разработанный в ЦНИИ РТК
(изображение с сайта [55])

2. Перспективные задачи космической робототехники

В ряду перспективных задач, подлежащих автоматизации робототехническими средствами, следует прежде всего выделить проблему орбитального монтажа космических объектов, подразумевающую как транспортировку к месту сборки фрагментов монтируемых конструкций, так и автоматизацию собственно сборочных операций, а также проблему орбитального сервисного обслуживания, объединяющую задачи инспекции технического состояния обслуживаемых космических объектов, роботизированной поддержки деятельности человека в космическом пространстве, замены функциональных блоков КА, дозаправки КА на орбите, перемещения КА в пределах орбиты и между орбитами, уборки космического мусора. Разнородность перечисленных задач подразумевает использование различных конструкций роботизированных устройств [1 – 9, 12 – 25, 42 – 45].

В целом можно считать разработку и использование робототехнических средств наиболее актуальными для обеспечения таких тенденций развития космической техники, как стремление к расширению функциональности, стремление к увеличению срока активной эксплуатации, стремление к повышению степени автономности, стремление к увеличению размеров с сохранением жесткости и прочности конструкции, ее несущей способности.

Важно отметить также, что за счет применения перспективных средств космической робототехники возможны как автоматизация операций, выполнение которых может быть обеспечено и другими средствами, с том числе при непосредственном участии человека, так и освоение качественно новых операций, решение которых в принципе невозможно без робототехнического обеспечения. При этом крупногабаритные многофункциональные наращиваемые космические системы могут быть выделены как класс перспективных кос-

мических объектов, реализуемость которых в ряде случаев может зависеть от возможности использования средств космической робототехники.

В работе [4] в качестве направлений использования робототехнических систем в космической деятельности выделены внутрикорабельная и внекорабельная деятельность на орбитальных комплексах, обслуживание и сборка космических аппаратов и орбитальной инфраструктуры в ближайшем космосе, доставка грузов и работа на поверхности Луны и лунной орбите, разведка, исследования и создание напланетной инфраструктуры, автоматизация полетов и работ при посадке и на поверхности планет Солнечной системы.

При этом выделяются различные виды роботизированных операций: контроль состояния обслуживаемых объектов; перестыковка модулей космических станций и кораблей; монтажно-демонтажные работы; парирование нештатных ситуаций; проведение ремонтно-восстановительных работ; обслуживание целевых и служебных систем космической станции; строительство защитных сооружений обитаемых планетных баз; техническое обслуживание элементов автоматических планетных баз; обеспечение внутрикорабельной и внекорабельной деятельности; забор грунта в поверхности тел Солнечной системы; сборка крупногабаритных космических комплексов.

Перспективную космическую инфраструктуру (ПКИ) в качестве сферы применения средств космической робототехники можно рассматривать как совокупность различающихся функциональным назначением и конструктивным исполнением космических объектов, объединенных потребностью в автоматизации связанных с их созданием, эксплуатацией и утилизацией задач [1 – 9, 12 – 25, 42 – 45]. Наиболее характерными объектами ПКИ являются орбитальные станции, космические аппараты (КА) целевого назначения, крупногабаритные космические конструкции, межорбитальные транспортные системы, средства исследования Луны и планет.

Выделим наиболее важные элементы конструктивного облика и особенности создания и эксплуатации многофункциональных наращиваемых космических систем, в том числе не имеющих аналогов и прототипов:

- значительные масса и габариты конструкции;
- модульный принцип построения, реконфигурируемость;
- ограничение функциональности модулей;
- использование как герметичных, так и негерметичных модулей;
- формирование окончательного облика системы в течение некоторого времени в соответствии с заранее разработанной стратегией;
- широкое использование трансформируемых элементов;
- поддержание работоспособности и изменение (расширение) функциональности за счет регулярного сервисного обслуживания, в частности, путем замены унифицированных блоков.

Данное обобщение, предложенное в [42] естественным образом следует из логики развития орбитальных станций, предполагает варианты конкретного применения и иллюстрирует потребность в новых средствах космической робототехники.

Очевидным примером реализованных систем рассматриваемого класса служат орбитальные станции. Рассматривая сами станции в качестве прообразов космических систем

будущего, естественно полагать использовавшиеся при их создании и эксплуатации средства робототехники в качестве прототипов перспективных космических робототехнических систем. При этом следует отметить важную роль преемственности проектов и актуальность универсальных технологий, в первую очередь – технологии стыковки [20 – 22].

Как отмечается в [27], станции «Салют-6» и «Салют-7» имели первоначально установленный гарантийный срок эксплуатации 1,5 года. С учетом накопленного опыта, ремонтпригодности бортовых систем и возможности проведения ремонтно-восстановительных и профилактических работ на борту станции экипажами основных экспедиций удалось продлить срок активной эксплуатации станции «Салют-6» до 4 лет и 10 месяцев и станции «Салют-7» до 4 лет и 4 месяцев.

Отработанные конструктивно-технологические решения и накопленный опыт позволили существенно увеличить время эксплуатации орбитальной станции «Мир» (рис. 14) – с минимального установленного на стадии проектирования срока эксплуатации 3 года до 15 лет реально обеспеченного.

Международная космическая станция имеет расчетный срок эксплуатации многомодульной конструкции 15 лет.

Модульный принцип построения сложился еще на ранних этапах развития ракетно-космической техники, явившись естественным следствием целесообразности, а в ряде случаев и необходимости, выделения составных частей изделия, разнородных с конструктивной, технологической и функциональной точек зрения. Следует отметить, что идея сборки на орбите, в том числе автоматизированная с применением средств робототехники, также зародилась на заре развития практической космонавтики [21, 22]. Таким образом, концепцию стыковки в космосе можно считать естественным логическим следствием модульного принципа построения космических объектов, а саму технологию стыковки – основой для развития перспективных роботизированных технологий орбитальной сборки.

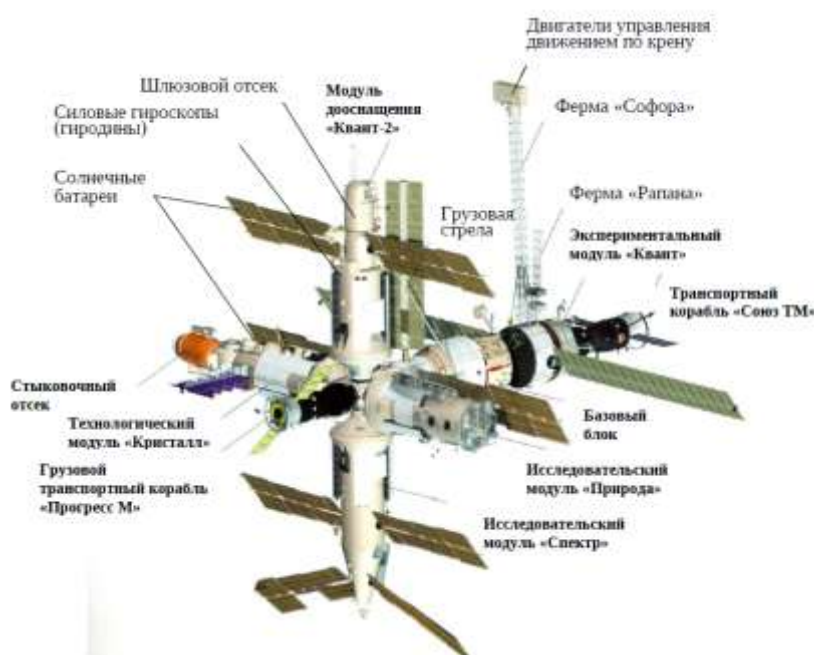
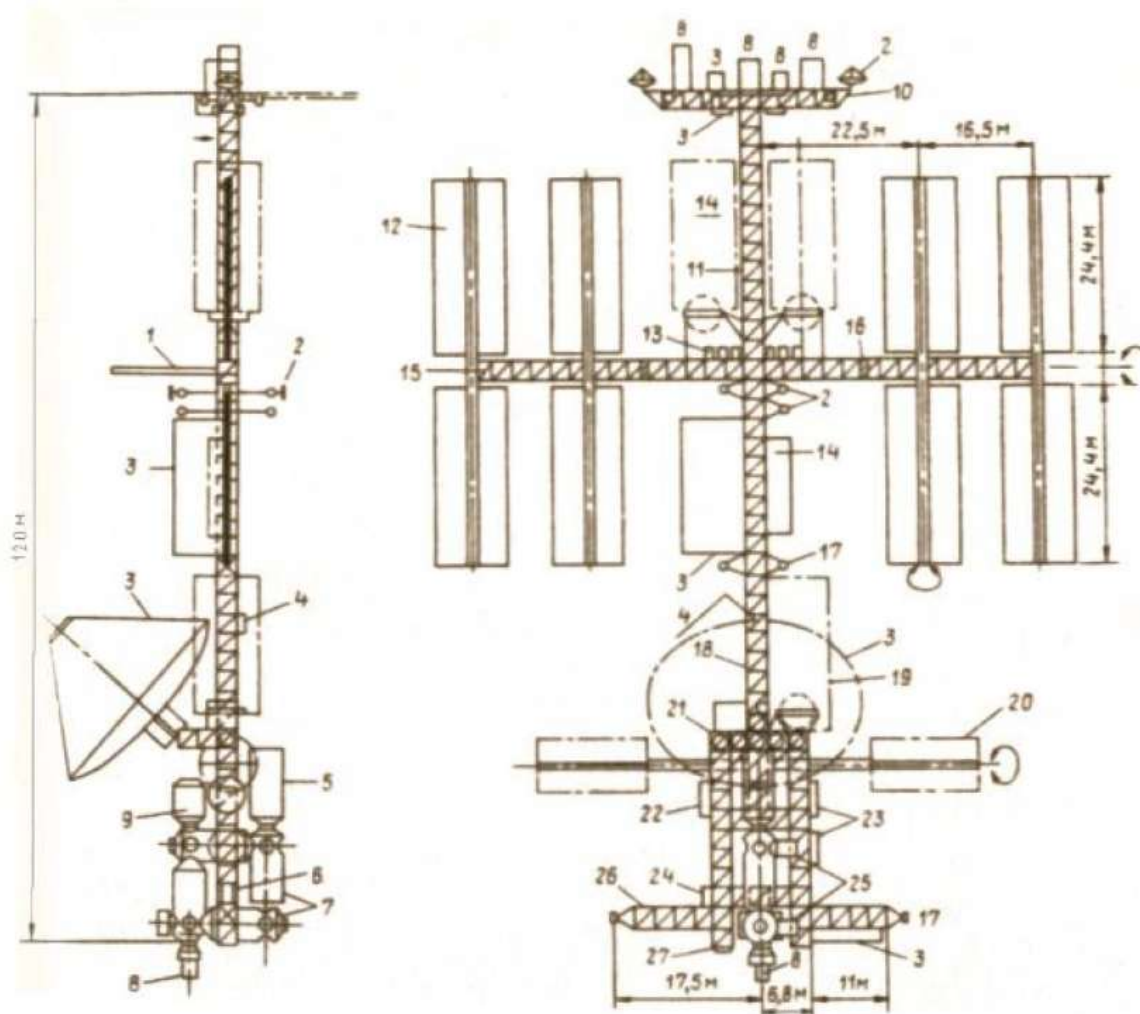


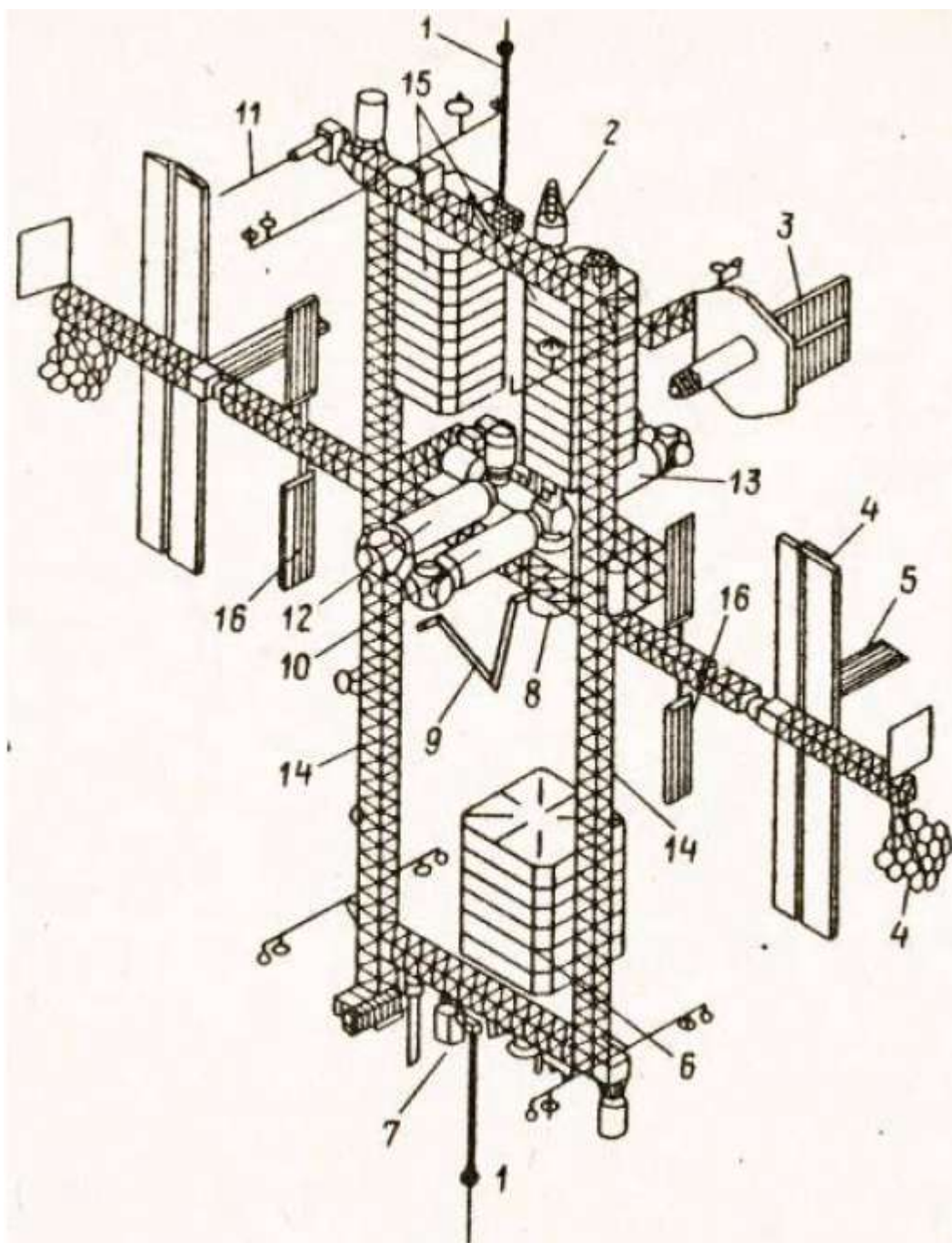
Рисунок 14 – орбитальная станция «Мир»



1-радиаторы СЭП; 2-антенны; 3-лаборатория материаловедения; 4-передвижной дистанционно управляемый манипулятор; 5-модуль снабжения; 6-модуль оборудования коммерческих программ; 7-жилой модуль; 8-научное оборудование; 9-лабораторный модуль; 10-верхняя балка; 11-верхняя балка; 12-солнечные батареи; 13-узлы крепления сменного оборудования и хранения инструмента; 14-отсек хранения обслуживаемых полезных грузов (например, ИСЗ); 15-поперечная балка; 16-узел вращения солнечных батарей; 17-двигатели реактивной системы управления; 18-нижняя балка; 19-хранилище топлива системы дозаправки; 20-радиаторы СОТР; 21-порт для дозаправляемых ИСЗ; 22-межорбитальный транспортный аппарат; 23-топливные баки для межорбитального транспортного аппарата; 24-дополнительные балки; 25-шлюзовые отсеки; 26-нижняя балка; 27-порт для причаливания транспортных кораблей

Рисунок 15 – конструктивно-компоновочная схема «однобалочного» варианта орбитальной станции «Фридом», [44]

Как показано [44] на рис. 15-17, проекты орбитальных станций «Фридом» и «Мир-2» предполагали наличие значительного количества ферменных элементов. Наличие негерметичной ферменной структуры является одним из важных отличий МКС (рис. 18) от станции «Мир».



1-привязные полезные нагрузки на верхней и нижней фермах; 2-системы наблюдения за космическими объектами; 3-экспериментальная солнечная энергосистема; 4-штатные солнечные энергосистемы; 5-радиаторы системы энергоснабжения; 6-отсек для межорбитального транспортного аппарата; 7-комплекс оборудования для исследования Земли; 8-модуль снабжения; 9- передвижной дистанционно управляемый манипулятор; 10-жилой модуль; 11-оборудования наблюдения Солнца; 12-лаборатория материаловедения; 13-европейский и японский исследовательские модули; 14-ферменные балки; 15-отсеки для хранения обслуживаемых полезных грузов (например, ИСЗ); 16-радиатор СОТР.

Рисунок 16 – конструктивно-компоновочная схема
«двухбалочного» варианта орбитальной станции «Фридом», [44]

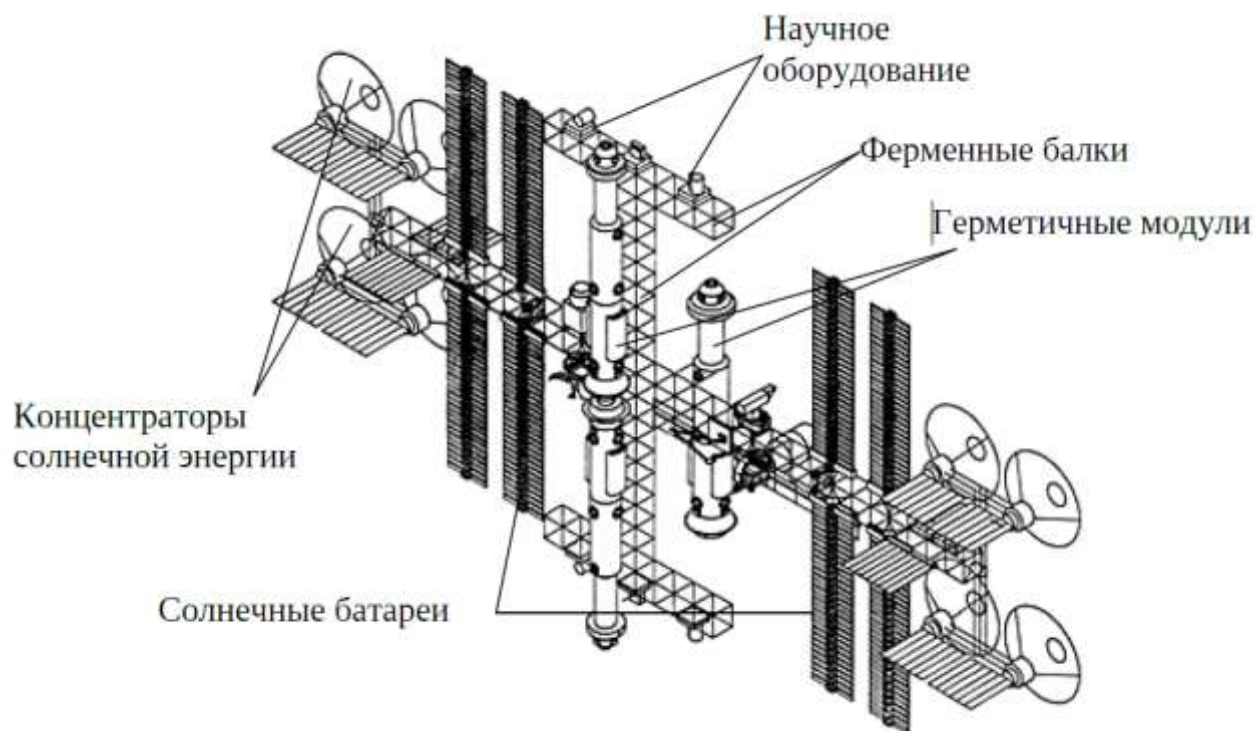


Рисунок 17 – проект орбитальной станции «Мир-2» (СССР), [44]



Рисунок 18 – Международная космическая станция

При непосредственной стыковке с помощью стыковочного устройства средствами систем управления поступательным движением и ориентацией стыкуемых объектов на момент касания должны быть обеспечены требуемые начальные условия стыковки (взаимное положение и относительные линейная и угловая скорости). После касания стыковочное устройство последовательно обеспечивает амортизацию, компенсацию начального

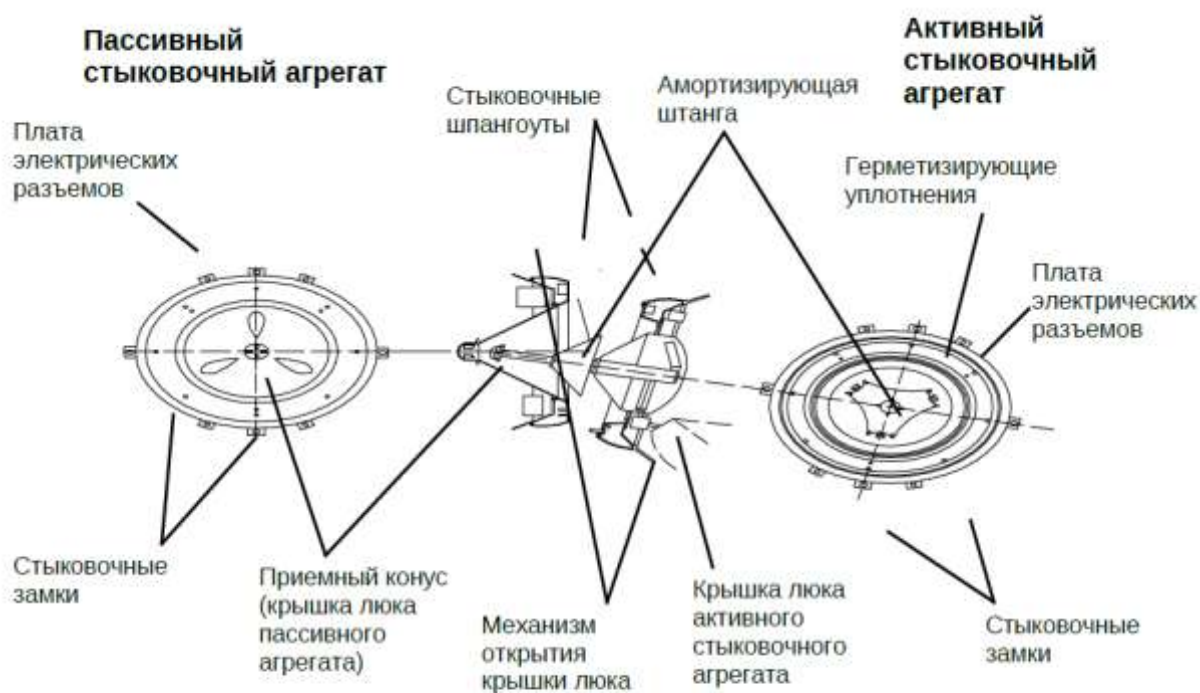
промаха, сцепку (образование первичной связи), выравнивание, стягивание, совмещение стыка с окончательным выравниванием, жесткое соединение. При этом требования к стыку могут предъявляться по точности, жесткости, прочности, герметичности [20].

В отличие от непосредственной стыковки, при стыковке с помощью установленного на одном из объектов манипулятора, захват второго объекта, являющийся аналогом сцепки стыковочным механизмом, может быть осуществлен при взаимной неподвижности стыкуемых объектов.

К достоинствам данного способа стыковки можно отнести:

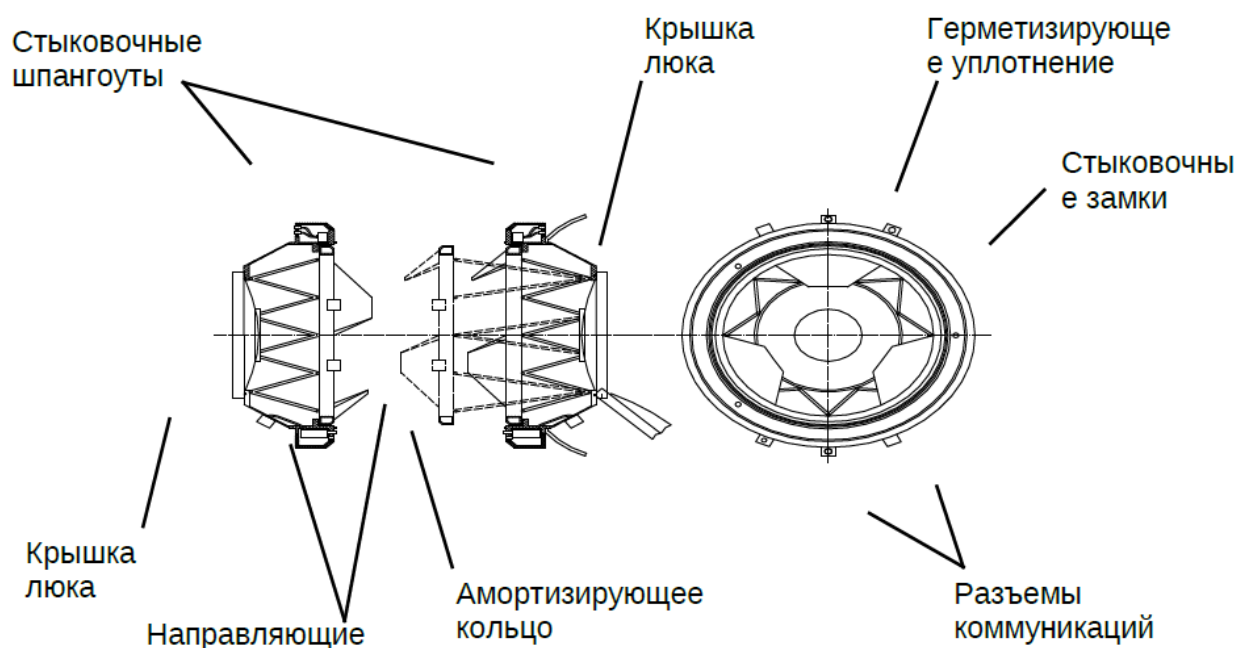
- уменьшение ударных воздействий на стыкуемые объекты;
- снижение требований к управлению движением и ориентацией захватываемого объекта, неподвижность которого кроме режима «автономного зависания» может быть, в частности, обеспечена закреплением на некоторой базовой платформе;
- уменьшение риска повреждения стыкуемых объектов в случае промаха;
- отсутствие ограничений, накладываемых конечным временем взаимного сближения.

На МКС успешно реализованы оба способа стыковки (рис. 19 – 21).



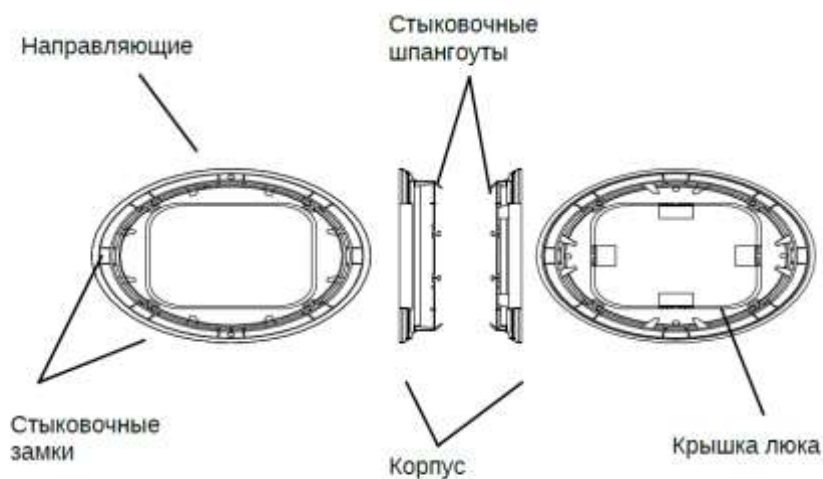
а) Стыковочное устройство типа «штырь-конус» (Россия)

Рисунок 19 – стыковочное устройство МКС «штырь-конус», [44]



б) Андрогинный стыковочный агрегат (Россия)

Рисунок 20 – андрогинный стыковочный агрегат МКС, [44]



в) Стыковочное устройство CBM (Common Berthing Mechanism, США)

Рисунок 21 – стыковочное устройство, предполагающее стыковку при помощи манипулятора МКС, [44]

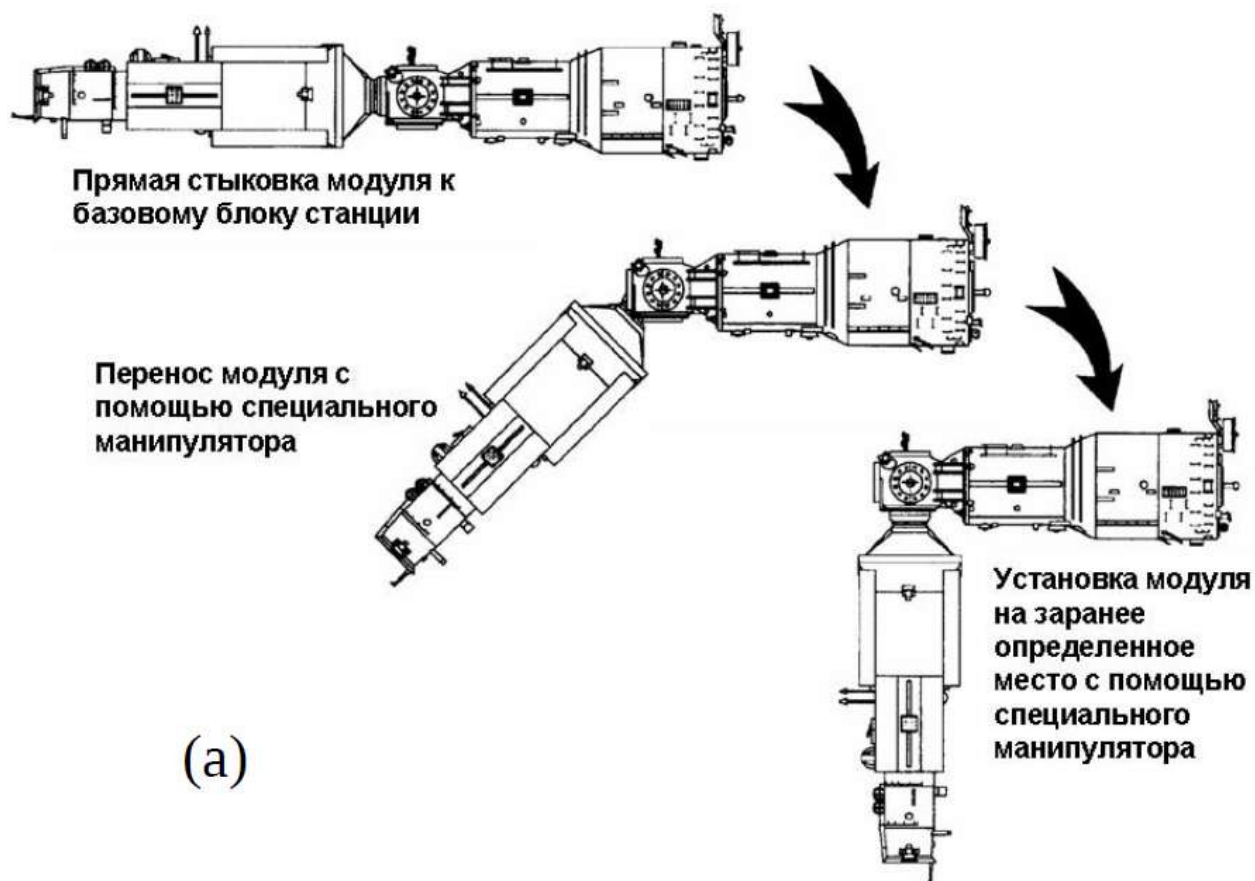


Рисунок 22 – перестыковка модулей станции «Мир»
при помощи специального манипулятора, [44]

Необходимо отметить [21, 22, 43] наличие в составе модулей орбитальной станции «Мир» специального манипулятора для перестыковки (рис. 22 – 23).



Рисунок 23 – манипулятор для перестыковки модулей станции «Мир»

В последнее время следует отметить активный ввод в эксплуатацию транспортных кораблей, пристыковываемых к МКС при помощи манипулятора.

3. Тенденции развития средств космической робототехники

Стремление к расширению возможностей робототехнической космической системы ведет к ее усложнению и удорожанию, а ограничение функциональности, обусловленное требованиями надежности, не всегда желательно с точки зрения космических условий применения. Могут быть названы следующие тенденции развития средств космической робототехники, выделенные в [12, 24, 42]:

1) Совершенствование отработанных прототипов в направлении расширения функциональных возможностей системы без принципиальных изменений конструкции. Примером может служить разработка манипулятора «Canadarm-2» (Space Station Remote Manipulator System – SSRMS) на базе манипулятора «Canadarm» (Shuttle Remote Manipulator System – SRMS).

2) Разработка для решения широкого круга разнородных задач взаимосвязанной совокупности средств космической робототехники, предполагающих модульность и реконфигурируемость. Иллюстрацией данного подхода может служить использование совместно с «Canadarm» специально разработанного удлинителя Inspection Boom and Laser Camera System для инспекции состояния теплозащитного покрытия шаттлов. Необходимо также выделить концепцию построения на МКС мобильной системы обслуживания (Mobile Servicing System – MSS).

3) Согласованное проектирование обслуживаемых космических объектов и обслуживающих робототехнических средств. В качестве одного из примеров можно назвать оснащение космических объектов манипуляторами, имеющими фиксированное расположение и предназначенными для обслуживания некоторой рабочей зоны (оснащение шаттлов манипуляторами «Canadarm», японского модуля МКС Kibo системой манипуляторов JEMRMS). Примерами специально созданной для обеспечения робототехнического обслуживания космических объектов инфраструктуры могут быть упомянутый рельсовый путь для перемещения в пределах МКС мобильного транспортера; расположенные в различных точках станции узлы PDRF (Power Data Grapple Fixture), обеспечивающие интерфейсы электропитания, управления и передачи видеоинформации, которые могут использоваться для крепления основания как манипулятора «Canadarm-2», так и манипулятора «Dextre»; концепция On-orbit Replaceable Unit (ORU), предполагающая оснащение заменяемых функциональных блоков соответствующими специализированными интерфейсами.

4) Дальнейшее развитие «антропоморфного подхода», предполагающего увеличение кинематического подобия робототехнических средств организму человека для обеспечения сходной функциональности и облегчения воспроизведения роботом физиологически естественных для человека движений («Robonaut»).

В случае невозможности согласованного проектирования весьма вероятно потребность в специфических устройствах космической робототехники.

В частности:

- необходима разработка универсальных захватных устройств для не оснащенных захватными интерфейсами объектов;
- необходимо расширение диапазона начальных условий стыковки для объектов, движущихся произвольно.

В [17] приведены примеры проектов, реализующих концепцию системы обслуживания КА, выработавших рабочее тело, но остающихся работоспособными с точки зрения основных функций, в соответствии с которой сервисные КА после сближения и стыковки с обслуживаемым КА либо осуществляют его дозаправку, либо функционируют в дальнейшем совместно с ним в качестве маневрового двигателя для удержания на рабочей орбите.

Отработка операций подобного рода проводилась, например, в ходе экспериментов ETS-VII и Orbital Express.

Успех упомянутых экспериментов, а также эксплуатации робототехнических устройств МКС, послужил основой для разработки дальнейших проектов.

В частности, в [3] описывается концепция системы Front-end Robotics Enabling Near-term Demonstration, находящейся в стадии наземной отработки. Назначение системы – автономное сервисное обслуживание некооперированных спутников.

Там же приводится описание проекта системы Hubble Robotic Servicing and De-Orbit Mission (HRSDM), рис. 24, введение в эксплуатацию которой после гибели «Колумбии» рассматривалось как альтернатива миссии STS-125 (2009).



Рисунок 24 – Hubble Robotic Servicing and De-Orbit Mission (HRSDM)

Система The Ranger Dexterous Servicing System (Ranger) [3], рис. 25 предназначена для автоматизированного сервисного обслуживания недорогих некооперированных спутников.

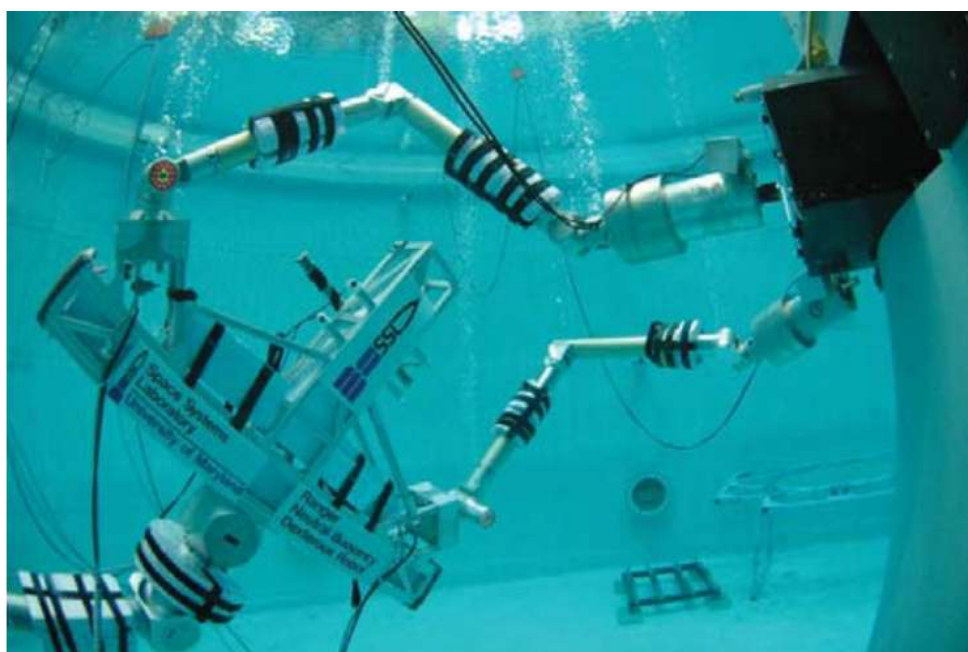


Рисунок 25 – The Ranger Dexterous Servicing System (Ranger)

В [3] также рассматриваются перспективы развития успешно эксплуатируемых на МКС систем Robonaut и Dextre.

Ряд проектов рассмотрен в библиографическом обзоре [2].

В [46] рассматриваются задачи осуществления пилотируемых полетов к другим планетам, при которых потребуется использование робототехники и прочей автоматики для обеспечения безопасности и работоспособности экипажа, когда движения и способности восприятия человеком в скафандре сильно ограничены. При этом важно создать класс роботов для сопровождения человека при выполнении работы за бортом космического аппарата, например, перенос инструментов, проведение видеосъемок, сбор проб и т. п. В 1999 г. НАСА проведен ряд рабочих испытаний системы ASRO, в которой использовался телеуправляемый мобильный робот Marsokhod, управляемый на расстоянии. Описываются особенности осуществления проекта применения роботов в космосе под названием ЕРА. Этот проект в настоящее время имеет прочную и гибкую основу для создания крупных разнообразных распределенных групп интеллектуальных агентов, построенных согласно стандарту CORBA.

В [47] приводится содержание программ по космической робототехнике, которые разрабатываются Европейским космическим агенством. Эти программы включают: исследование микрогравитации на низкоземной орбите и разработка робототехнической системы EUROBOT для Международной космической станции; геостационарное обслуживание и исследование планет. Описывается мобильный робот, выполненный по программе EUROBOT. Робот имеет несколько многофункциональных рук, которые при необходимости могут использоваться в качестве ног. Приводятся образцы лунохода и марсохода, а также телекамер для исследования планет.

В [48] сообщается, что фирма JAXA (Япония) проводит изучение концепций космических солнечных систем электропитания (SSPS) уже в течение многих лет. Рассматриваются два вида выполняемых роботами задач, необходимых для построения систем SSPS на орбите: задача передвижения и задача осуществления сборки. Задача передвижения определяется как движение робота по конструкции малой массы, а задача сборки состоит в захвате и соединении вибрирующих структур с целью сборки после саморазвертывания. Эти задачи необходимы для обеспечения работы системы SSPS. Представлены стратегия и результаты экспериментов с использованием наземного испытательного стенда для сборки системы SSPS на орбите этой системы, разработанной фирмой JAXA.

Как отмечается в [49], разработана архитектура программного обеспечения для групп роботов и людей, совместно выполняющих правильно скоординированные задачи, например, задачи по сборке конструкций на орбите или на поверхности других планет. Хотя прогнозируется автономное выполнение таких работ роботами в будущем, роботы располагают в настоящее время недостаточными возможностями для манипулирования всеми возможными объектами. Предлагаемая архитектура предусматривает использование принципиально новой методологии для участия человека в оптимизации как эффективности выполнения задачи, так и робастности при сочетании возможностей робота с ин-

туцией человека. Предлагается называть такую смешанную стратегию управления "скользящей автономностью". Роботы выполняют автономно максимально возможное число задач, а человек-оператор контролирует исполнение функций, которые сложно автоматизировать, а также предпринимает меры в случае отказа робота.

В [50] описывается опыт разработки технологии прецизионной сборки при помощи автономных космических роботов, классифицируются наиболее важные требования к космическим роботам, а затем обсуждаются вопросы их использования, в особенности при решении задач прецизионной сборки. Оцениваются практические шаги по овладению навыками в космосе и предлагаются к использованию эвристические методы поиска и простые обучающие технические средства. При проведении экспериментов по сборке с использованием руки робота продемонстрирована работоспособность метода и стратегии управления. Описывается объект сборки системы для выполнения сборочных операций. Разработка методов обучения выполнению сборочных операций повысила характеристики системы CellSat и позволяет выполнять задачи прецизионной сборки в космосе с помощью космических роботов.

В [51] отмечается, что руководители агентства НАСА высказываются за продолжение присутствия человека в космосе и за разработку крупногабаритных орбитальных конструкций. Для снижения степени риска важно уменьшить объем работы за бортом космического корабля и создать инфраструктуру среды обитания. Эффективная сборка космических конструкций требует использования автономных роботов, работающих под наблюдением человека. К выполняемым роботами задачам будут относиться: перемещение компонентов, прецизионное соединение деталей, контроль и анализ конструкции, а также очистка поверхностей конструкций. Лаборатория JPL разрабатывает ряд технических средств, необходимых для сборки и обслуживания, и выявляет возможные проблемы и требуемые функции роботов.

В [51] отмечается, что после эксперимента ROTEX (телеуправляемый космический робот на борту корабля шаттл, Колумбия) Rokviss представляет собой второй космический робот, разработанный Германским Институтом робототехники и мехатроники с участием Российского федерального космического агентства Роскосмос и предприятия Энергия. Проект был начат разработкой в 2002 году, аппаратура Rokviss была смонтирована на поверхности Российского обслуживающего модуля на Международной космической станции (МКС) в январе 2005 года. Обслуживание робота велось с наземной станции обслуживания в Москве. Приведено описание двухступенчатого термоконтролируемого робота, установленного на специальной плате на поверхности модуля, а также контроллера, стереокамеры, системы освещения, датчиков, установленных на роботе, устройств, осуществлявших нагрузку робота. Сообщается программа испытаний робота, продолжавшихся в течение нескольких месяцев. Приведены схемы, в которых проводились испытания, схемы защиты робота от возможных перегрузок, от заклинивания и др. Подробно изложены результаты испытаний. Отмечается успешность их, экспериментально подтверждена возможность работы робота в условиях открытого космоса, приемлемость конструктив-

ных решений, использованных на реальном роботе, могущем работать в открытом космосе год и вероятно в течение более длительных сроков. Предлагается разработать более сложный робот (например 7-осный) и провести его испытания в реальных условиях, с учетом уже накопленного опыта.

Как отмечено в [53], с использованием метода проектирования изделий с большим осевым отверстием разработано модульное сочленение для космического манипулятора. Сочленение оснащено несколькими датчиками, такими как позиционный датчик, датчик крутящего момента и датчик температуры. Все электрические системы, включая систему датчиков, систему привода, систему управления и систему питания, интегрированы в модульное сочленение. Чтобы избежать влияния космической среды на кабели и их сигналы, все кабели должны быть проведены через центральное отверстие модульного сочленения. Модульное сочленение обладает высокой жесткостью, высокой точностью управления.

В [54] исследуется возможность использования автономных роботов для уничтожения искусственных спутников Земли, движущихся по заданным орбитам вокруг Земли. Робот работает по командам, передаваемым по радиоканалу с Земли или из космоса. Отмечается, что одной из причин, которые вызывают создание подобных робототехнических манипуляторов, является то, что на орбите могут возникнуть условия, при которых искусственный спутник оказывается ненужным, устаревшим или с аварийной аппаратурой, иногда вредным для решения каких-либо задач. Это подтверждается примерами. В Канаде, в лаборатории Департамента Национальной Обороны были проведены исследования для оценки характеристик и возможностей подобного прибора. Был разработан первый эскизный автономный роботманипулятор, способный выполнять работы по уничтожению ненужных или вредных искусственных спутников. Он был назван MDMS (модульная разрушающая манипуляторная система).

Приведено подробное описание этой системы, ее характеристик. Манипулятор состоит из комплекта двухступенных модулей, соединенных вместе. Оценивается динамика манипулятора и средства возможного ее регулирования и управления, средства линеаризации характеристик манипулятора. Оцениваются необходимые характеристики манипулятора, обеспечивающие ему возможность догнать цель и воздействовать на нее заданным образом: снять показания приборов, подрегулировать, разрушить и т.д. Первый макетный прибор состоял только из трех различных модулей. Отмечается, что в тех случаях, когда конструируется система-разрушитель, она должна иметь возможность маневра около разрушаемого спутника Земли. Это предъявляет особые требования к двигателю разрушителя, его оборудованию. Сообщается о некоторых модельных работах, сопровождавших исследования, об их результатах. Эти материалы подтверждают лишь начальную стадию работ по разработке манипуляторной системы, они содержат мало материалов о реальных параметрах и характеристиках системы.

В [43] описываются разработанные в ЦНИИ РТК варианты средств робототехнического обеспечения (СРТО) на основе одного манипулятора СРТО-1 и на основе трех манипуляторов СРТО-3 (рис. 26).

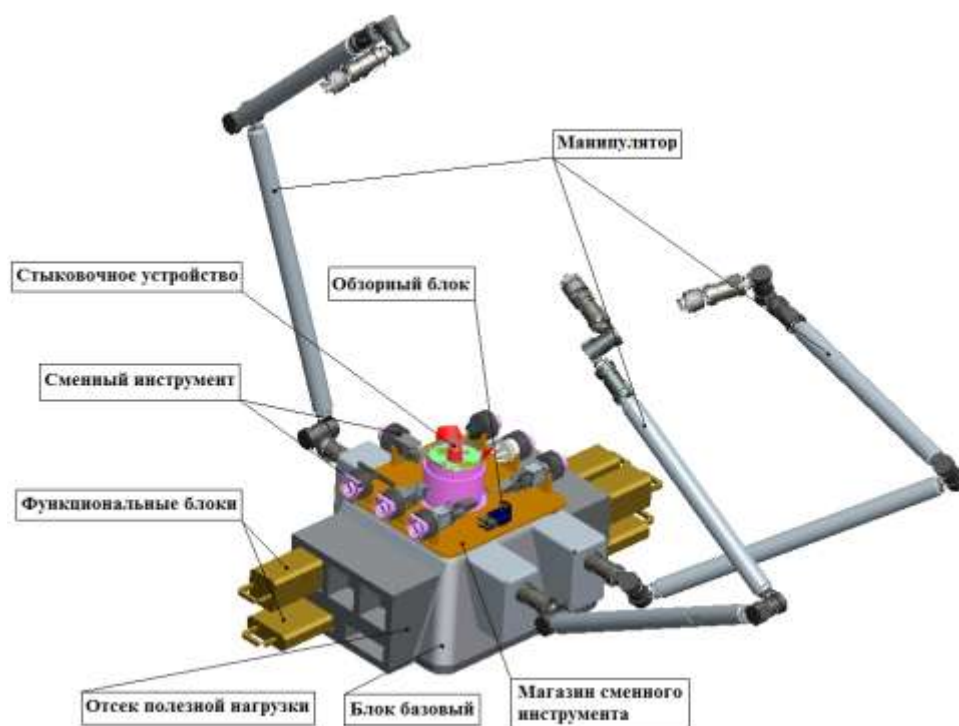


Рисунок 26 – средство робототехнического обеспечения на основе трех манипуляторов (СРТО-3)

4. Концепция монтажно-сервисных свободнолетающих роботизированных космических модулей

С учетом сказанного выше, вполне логичной выглядит проанализированная в [42] концепция монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей, осуществляющих захват фрагментов собираемой конструкции, доставляющих их к месту сборки и устанавливающих в штатное положение при помощи манипулятора.

Проблемам разработки, создания и эксплуатации таких модулей посвящено значительное число публикаций [33 – 43]. Устройства, называемые «свободнолетающие космические манипуляционные роботы», либо «свободнолетающие космические роботизированные модули», относятся к новому классу маломерных объектов космической техники, предназначенных для выполнения различных работ в открытом космосе, в том числе для сборки больших космических конструкций различного назначения, а также для технического обслуживания внешних устройств пилотируемых орбитальных станций и других функционирующих на орбите объектов. Основные идеи и принципы проектирования свободнолетающих манипуляционных роботов были сравнительно давно сформулированы, теоретически развиты и частично реализованы. Вместе с тем отмечается многофункциональность и многорежимность подобных роботизированных модулей, отсутствие на сегодняшний день успешно эксплуатируемых прототипов, и как следствие, большое число недостаточно изученных задач.

В [42] выделены наиболее общие элементы конструктивного облика монтажно-сервисных автономных роботизированных модулей:

- наличие подвижного основания – обладающего достаточно высокой степенью автономности космического модуля, способного самостоятельно перемещаться в космическом пространстве и приспособленного для контактного взаимодействия с другими космическими объектами, например, базовыми станциями, или монтируемыми (обслуживаемыми) объектами;

- наличие установленных на основании одного или нескольких манипуляторов, обеспечивающих возможность управляемого перемещения захваченного груза, в общем случае достаточно массивного, относительно основания.

Таким образом, рассматриваемый класс технических объектов может быть обобщенно идеализирован механической расчетной схемой вида «подвижное основание – манипулятор – груз». При этом масса манипулятора может быть существенно меньше массы основания (и груза, если груз достаточно массивен); приводы степеней подвижности в силу очевидных условий обладают ограниченной мощностью; возможны упругие деформации конструкции манипулятора (звеньев и сочленений), требующие учета при моделировании динамики и синтезе управления.

Обусловленная спецификой космического применения подвижность основания, порождает ряд характерных особенностей как при эксплуатации таких систем (например, ограничений на массо-инерционные характеристики переносимого манипулятором груза, или требований к системе активной стабилизации положения основания), так и при моделировании динамики управляемого движения. Особо подчеркнем практическую актуальность режимов, для которых возможно пренебречь всеми силами и моментами, действующими на систему, кроме управляющих усилий, создаваемых приводами степеней подвижности (по используемой терминологии – режим «free-floating»), для которых при определенных условиях возможно выделение независимой подсистемы уравнений динамики системы в шарнирных координатах в форме, аналогичной форме уравнений динамики для случая неподвижного основания. Следует также отметить важные качественные отличия случаев нулевого и ненулевого начального кинетического момента системы (сохраняющегося постоянным вследствие принятых предположений).

Многорежимность, как было отмечено выше, выделяется в качестве одного из важных характерных признаков рассматриваемого класса робототехнических систем – монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей. Рассмотрим в качестве примера возможные способы причаливания такого модуля к некоторому объекту (монтируемой конструкции, обслуживаемому аппарату, базовой станции), учитывая опыт эксплуатации орбитальной станции «Мир» и Международной космической станции (МКС).

1. Непосредственная стыковка при помощи стыковочного устройства (системы «штырь - конус», или андрогинного стыковочного узла). Манипулятор не задействуется. Предполагается взаимное движение массивных стыкуемых объектов и наличие ненулевых относительных скоростей на момент касания.

2. Стыковка путем захвата манипулятором модуля базового узла объекта (подобного, например, используемым на МКС узлам PDRF), к которому осуществляется пристыковка. Предполагается нулевая относительная скорость (линейная и угловая) массивных стыкуемых объектов. Взаимное положение стыкуемых объектов после завершения захвата манипулятором базового узла может рассматриваться как окончательное (объекты связаны посредством управляемого промежуточного механизма), либо как промежуточное, предполагающее дальнейшее взаимное позиционирование при помощи манипулятора.

3. Стыковка соединенных по схеме предыдущего пункта объектов при помощи манипулятора. В данном случае, в отличие от непосредственной стыковки, взаимное движение стыкуемых масс обеспечивается не системой управления движением и ориентацией активного объекта (в рассматриваемом случае роботизированного модуля), а управляемым взаимным позиционированием при помощи промежуточного механизма. Примером данной схемы стыковки может служить стыковка объектов к узлам СВМ при помощи манипулятора на МКС.

В зависимости от функциональных возможностей конкретных автономных роботизированных космических модулей и комбинирования перечисленных выше способов стыковки могут быть сформированы различные стратегии осуществления монтажно-сервисных операций.

Предположим наличие следующих этапов роботизированного монтажа некоторой крупногабаритной космической конструкции из пассивных фрагментов:

1. Доставка фрагментов в некоторое промежуточное положение на орбите. Возможно предположить доставку к специализированной базовой станции.
2. Приведение фрагментов в состояние готовности к монтажу – извлечение из транспортного отсека (с возможным изменением конфигурации).
3. Захват фрагментов автономным роботизированным космическим модулем.
4. Транспортировка фрагментов автономным роботизированным космическим модулем к месту сборки.
5. Присоединение доставленных фрагментов к монтируемой конструкции.

При этом ключевую роль играет степень оснащенности фрагментов захватными интерфейсами и стыковочными узлами.

Тогда могут быть выделены весьма различающиеся с точки зрения особенностей динамики управляемого движения режимы функционирования автономного роботизированного космического модуля, например:

- управляемое движение модуля без груза («порожний полет»);
- стыковка модуля к базовой станции или монтируемой конструкции без использования манипулятора;
- стыковка модуля к базовой станции или монтируемой конструкции с использованием манипулятора («захват» базовой станции манипулятором с возможной последующей пристыковкой модуля);

- захват манипулятором закрепленного относительно базовой станции модуля груза, также закрепленного относительно базовой станции;
- захват манипулятором свободного в инерциальном пространстве груза;
- управляемое движение модуля с грузом в схвате манипулятора;
- управляемое перемещение при помощи манипулятора груза относительно основания с последующим закреплением груза относительно основания («транспортная фиксация»);
- управляемое движение модуля с грузом, закрепленным на основании;
- пристыковка модуля с грузом к монтируемой конструкции с последующим отсоединением при помощи манипулятора груза от основания и установкой на штатное место;
- пристыковка груза в режиме, когда система «подвижное основание – манипулятор – груз» свободно перемещается относительно монтируемой конструкции (под действием усилий, прикладываемых со стороны системы управления движением и положением основания, или под действием усилий приводов степеней подвижности манипулятора) таким образом, чтобы в момент контакта фрагмента с конструкцией были обеспечены требуемые начальные условия стыковки.

Следует подчеркнуть, что перечисленное многообразие режимов функционирования выделено в рамках процедуры орбитального монтажа. Реализация еще более разнообразных сервисных задач, очевидно, потребует дополнительного рассмотрения характерных режимов, в том числе нештатных. Можно выделить, например, процедуру спасения груза, предполагающую, в общем случае произвольное движение захватываемого объекта, не оснащенного специализированными интерфейсами.

Выводы

1. Период с начала 1980-х годов по настоящее время может рассматриваться как период отладки технологий роботизированной стыковки.
2. Возможность освоения технологий роботизированного монтажа МКС в значительной мере обусловлена наличием предшествующего опыта создания и эксплуатации орбитальных пилотируемых станций, построенных по модульному принципу.
3. Потребность в создании перспективных многофункциональных наращиваемых космических систем, требующих для создания, эксплуатации и утилизации разработки новых классов автономных устройств космической робототехники можно считать достаточно аргументированной.
4. На основании обзора современного состояния и анализа тенденций развития объектов перспективной космической инфраструктуры может быть сделан вывод о потенциальном конструктивном многообразии перспективных робототехнических систем космического назначения, определяемом сложностью и разнородностью задач, требующих автоматизации.
5. Дальнейшее развитие средств робототехники видится целесообразным в направлении совершенствования отработанных прототипов. Например: отработка в режиме те-

леуправления и автоматическом режиме операций, освоенных в режиме полуавтоматического управления человеком-оператором, находящимся на борту.

6. Следует отметить, что наиболее функционально развитые и технологически отработанные средства космической робототехники по большей части эксплуатировались в составе систем Space Shuttle и Международной космической станции. В этой связи весьма актуальна задача разработки автономных средств космической робототехники сходной функциональности.

7. Весьма перспективным можно считать класс монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей, важной особенностью которых является многообразие возможных режимов функционирования.

8. Несмотря на опыт, накопленный в области космической робототехники, потенциальная многорежимность таких модулей определяет необходимость проведения дополнительных исследований при их разработке, создании и эксплуатации.

9. Целесообразным может быть использование совокупности монтажно-сервисных автономных роботизированных космических модулей, каждый из которых обладает разумной степенью универсальности, но ориентирован на предпочтительное использование в одном из возможных режимов функционирования.

Список литературы

1. Робототехническое обеспечение для объектов перспективной космической инфраструктуры / А.А. Градовцев, А.С. Кондратьев, А.Н. Тимофеев // Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника» 23--25 ноября 2011 г., ГНУ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург -- Электронный ресурс: <http://er.rtc.ru>
2. Управление подвижными объектами. Библиографический указатель. В 3-х выпусках. Вып.1. Космические объекты / Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. -- М.: 2011. -- 268 с.: ил.
3. H. A. Thronson, D. Akin, J. Lester The Evolution and Promise of Robotic In-Space Servicing // AIAA SPACE 2009 Conference&Exposition 14-17 September 2009, Pasadena, California. AIAA 2009-6545. Available at: <http://www.enu.kz/repository/2009/AIAA-2009-6545.pdf> , accessed 12.11.2016.
4. Лысый С.Р. Научно-технические проблемы и перспективы развития робототехники специального (космического) назначения // Экстремальная робототехника // Труды международной научно-технической конференции. -- Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. -- С. 29--32.
5. О некоторых перспективных направлениях развития космической робототехники / В.А. Лопота, Е.И. Юревич (сайт РКК «Энергия» <http://www.energia.ru>)
6. Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем / А.В. Лопота, Е.И. Юревич // Научно-технические ведомости СПбГПУ. -- 2013. -- № 1. -- С. 98 -- 103

7. Ющенко А.С. Человек и робот -- совместимость и взаимодействие // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1(2). С. 4 -- 9.
8. Супервизорное управление космическими манипуляторами / В.П. Макарычев, Е.И. Юревич. -- СПб.: Астерион, 2005. -- 108 с.
9. Космонавтика XXI века / под ред. Б.Е. Чертока -- М. : РТСофт, 2010. -- 864 с.
10. NASA // NASA: official website. Available at: <http://www.nasa.gov/> , accessed 12.11.2016.
11. CSA // CSA: official website. Available at: <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/default.asp> , accessed 12.11.2016.
12. Перспективы использования и особенности исследования динамики космических манипуляторов с упругими конструктивными элементами / А.П. Алпатов, П.А. Белоножко, П.П. Белоножко, Л.К. Кузьмина, С.В. Тарасов, А.А. Фоков // Техническая механика. -- 2012. -- № 1. -- С. 82 -- 93.
13. E. Kaupp, E. Bains, R. Flores, G. Jorgensen, Y.M. Kuo, H. White Shuttle Robotic Arm // Engineering Innovations / P. 286 -- 301. Available at: http://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584734main_Wings-ch4h-pgs286-301.pdf , accessed 12.11.2016.
14. B. Stockman, J. Boyle, J. Bacon International Space Station Systems Engineering Case Study Available at: <http://spacegrant.org/uploads/images/ISS/ISS%20SE%20Case%20Study.pdf> , accessed 12.11.2016.
15. The role of dexterous robotics in ongoing maintenance of the ISS / Lyndsey Poynter, P. Andrew Keenan // IAC-12,B3,4-B6.5,6,x16014
16. Flexible robot manipulators: modelling, simulation and control. - (IET control series) -- ISBN 978-0-86341-448-0
17. Васильев В.В. Введение в орбитальное сервисное обслуживание. -- К.: «Элмис», 2013, -- 28 с., ил. ISBN 978-617-696-111-6
18. Тимофеев А.Н., Шардыко И.В. Проблемы применения в космосе антропоморфных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 37 -- 41.
19. Яскевич А.В., Остроухов Л.Н., Егоров С.Н., Чернышев И.Е. Опыт полунатурной отработки причаливания российского модуля к Международной космической станции дистанционно управляемым манипулятором SSRMS // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 53 -- 58.
20. Сыромятников В.С. Стыковочные устройства космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1984. 216 с.
21. Сыромятников В.С. 100 рассказов о стыковке и других приключениях в космосе и на Земле. Часть 1: 20 лет назад. М.: Логос, 2003. 568 с.
22. Сыромятников В.С. 100 рассказов о стыковке и других приключениях в космосе и на Земле. Часть 2: 20 лет спустя. М.: Университетская книга; Логос, 2010. 568 с.

23. Алпатов А.П., Белоножко П.А., Горбунцов В.В., Ивлев О.Г., Чернявская С.С., Шичанин В.Н. Динамика пространственно развитых механических систем изменяемой конфигурации -- К.: Наукова думка, 1990. -- 256 с.
24. Алпатов А.П., Белоножко П.А., Белоножко П.П., Григорьев С.В., Тарасов С.В., Фоков А.А. Моделирование динамики космических манипуляторов на подвижном основании // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 59 -- 65.
25. Артеменко Ю.Н., Белоножко П.П., Карпенко А.П., Саяпин С.Н., Фоков А.А. Использование механизмов параллельной структуры для взаимного позиционирования полезной нагрузки и космического аппарата // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 65 -- 71.
26. Особенности синтеза системы управления космическим манипулятором / А.П. Алпатов, 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.
27. Международная энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / Гл. ред. А.Г. Братухин. -- М.: ОАО «НИИ АСК», 2015. -- 608 с.: ил.
28. Згуровский М.З., Бидюк П.И. Анализ и управление большими космическими конструкциями / Национальный технический ун-т Украины "Киевский политехнический ин-т". -- К.: Наукова думка, 1997. -- 451с.
29. Баничук Н.В., Карпов И.И., Климов Д.М. и др. Механика больших космических конструкций. -- М.: Факториал, 1997. -- 302 с.
30. Медзмариашвили Э.В. Трансформируемые конструкции в космосе и на земле / Э. В. Медзмариашвили. -- Тбилиси, 1995. -- 446 с.
31. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов Большие космические конструкции: модели, методы исследования и принципы управления. I // Автоматика и телемеханика, 1996, выпуск 7, С. 52--65
32. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов Большие космические конструкции: модели, методы исследования и принципы управления. II // Автоматика и телемеханика, 1996, выпуск 8, С. 55--66
33. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Некоторые проблемы управления при роботизированной сборке больших космических конструкций на орбите // Автоматика и телемеханика. 2006. № 8. С. 36 -- 50.
34. Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E. Free-flying robots in space: an overview of dynamics modeling, planning and control // Robotica 2007. Volume 25. P. 537 -- 547. DOI:[10.1017/S0263574707003438](https://doi.org/10.1017/S0263574707003438)
35. В.П. Богомолов, В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов Проектирование оптимальной механической структуры свободнолетающего космического робототехнического модуля как объекта автоматического управления. I // Автоматика и телемеханика, 1998, выпуск 5, С. 27--40

36. Глумов В.М., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Анализ особенностей управления перелетами космического роботизированного модуля вблизи поверхности орбитальной станции. I Управление ориентацией модуля // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2002. № 2. С. 162 -- 169.
37. Глумов В.М., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Анализ особенностей управления перелетами космического роботизированного модуля вблизи поверхности орбитальной станции. II Управление траекторными перемещениями модуля // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2002. № 3. С. 140 -- 148.
38. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Управление многорежимным космическим роботом при выполнении манипуляционных операций во внешней среде // Автоматика и телемеханика, 2010, выпуск 11, С. 96 - 111
39. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Уравнения движения и управление свободнолетающим космическим манипуляционным роботом в режиме реконфигурации // Автоматика и телемеханика, 2010, выпуск 1, С. 80 - 98
40. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами I // Мехатроника, автоматизация, управление, 2010, № 10, С. 52 - 59.
41. В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами II // Мехатроника, автоматизация, управление, 2010, № 12, С. 54 - 65.
42. Белоножко П.П. Перспективные монтажно-сервисные роботизированные космические модули // «Робототехника и техническая кибернетика», № 2(7) 2015. -- С. 18 -- 23.
43. Даляев И.Ю., Шардыко И.В., Кузнецова Е.М. Перспектива создания роботизированных сервисных спутников для технического обслуживания и продления сроков активного существования космических аппаратов // «Робототехника и техническая кибернетика», № 3(8) 2015. -- С. 27-31.
44. Проектирование орбитальных станций. Учебное пособие / С.Е. Пугаченко -- МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. -- 175 с.
45. Гапонов В.А., Железняков А.Б. Станция «Мир»: от триумфа до...СПб: Изд-во СИСТЕМА, 2007. 380 С.
46. Использование роботов при выполнении работ вне космического аппарата. Providing robotic assistance during extra-vehicular activity: Докл. [SPIE Conference on "Mobile Robots XVI", Newton, 29--30 Oct., 2001] / Burridge Robert R., Graham Jeffrey (S&K Electronics) // Proc. SPIE. - 2001. -- 4573. - С. 22-33. - Библ. 27.
47. Робототехнические программы и их разработка Европейским космическим агенством: состояние и перспективы развития. Robotic programmes and applications at ESA: present and perspectives / Visentin Gianfranco // Proceedings of i-SAIRAS 2005: The 8 International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Munich, 5-8 Sept., 2005. - Noordwijk: ESTEC, 2005. - С. 1-7. - (ESA SP. ISSN 1609-042X. № 603). - Библ. 8.

48. Экспериментальное исследование роботов, используемые шагающие системы сборки космических солнечных систем электропитания. Robotics experimental study for SSPS walking and assembly technology / Ueno Hiroshi, Oda Mitsushige, Inaba Kazuyuki (Japan Aerospace Exploration Agency, Tsukuba, Ibaraki, Japan) // Proceedings of i-SAIRAS 2005: The 8 International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Munich, 5-8 Sept., 2005. - Noordwijk: ESTEC, 2005. - С. 427-430. - (ESA SP. ISSN 1609-042X. № 603). - Библ. 4.
49. Результаты применения стратегии скользящей автономности" при осуществлении сборки в космосе с участием нескольких роботов. Results in sliding autonomy for multi-robot spatial assembly / Heger Frederik W., Hiatt Laura M., Sellner Brennan, Simmons Reid, Singh Sanjiv (The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, U.S.A.) // Proceedings of i-SAIRAS 2005: The 8 International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Munich, 5-8 Sept., 2005. - Noordwijk: ESTEC, 2005. - С. 448-455. - (ESA SP. ISSN 1609-042X. № 603). - Библ. 15
50. Прецизионная сборка с помощью автономного космического робота при использовании методов обучения с накоплением навыков. Precise assembly by autonomous space robot using skill acquisition learning / Tanaka Hideyuki, Yamamoto Noritaka, Yairi Takehisa, Machida Kazuo (Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo, Japan) // Proceedings of i-SAIRAS 2005: The 8 International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Munich, 5-8 Sept., 2005. - Noordwijk: ESTEC, 2005. - С. 552-559. - (ESA SP. ISSN 1609-042X. № 603). - Библ. 7.
51. Гетерогенные робототехнические системы для сборки и обслуживания. Heterogeneous robotic systems for assembly and servicing / Stroupe Ashley W., Huntsberger Terry, Kennedy Brett, Aghazarian Hrand, Baumgartner Eric T., Ganino Anthony, Garrett Michael, Okon Avi, Robinson Matthew, Townsend Julie Anne (Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, Drive, MS 82-105, Pasadena, CA, USA) // Proceedings of i-SAIRAS 2005: The 8 International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Munich, 5-8 Sept., 2005. - Noordwijk: ESTEC, 2005. - С. 567-573. - (ESA SP. ISSN 1609-042X. № 603). - Библ. 17.
52. Rokviss - проверка робототехнических компонентов на международной космической станции (ISS). ROKVISS - robotics component verification on ISS / Hirzinger G., Landzettel K., Reintsema D., Preusche C., Albu-Schäffer A., Rebele B., Turk M. (DLR (German Aerospace Center)) // Proceedings of i-SAIRAS 2005: The 8 International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Munich, 5-8 Sept., 2005. - Noordwijk: ESTEC, 2005. - С. 55-65, 27. - (ESA SP ISSN 1609-042X. № 603). - Библ. 13.
53. Разработка модульного сочленения высокой интеграции для космического манипулятора / Shi Shicai, Xie Zongwu, Ni Fenglei, Liu Hong (Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, China) // Xi'an jiaotong daxue xuebao J. Xi'an Jiaotong Univ. - 2007. - 41, № 2. - С. 162-166.

54. Автономный робот для уничтожения спутников, использующих вынужденное предикторное управление. Autonomous robotic capture of a satellite using constrained predictive control / McCourt Richard A., de Silva Clarence W. // IEEE/ASME Trans. Mechatron. - 2006. - 11, № 6. - С. 699-708. - Библ. 29.
55. <http://www.buran.ru> , accessed 17.12.2016.

Space Robotics: Current Status, Long-term Objectives, and Development Trends. Analytical Review

P.P. Belonozhko^{1,*}

^{*}byelonozhko@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: space robotics, need for robotic service, perspective space infrastructure, assembly and service autonomous robotic space modules, modes of the operated movement

Prospects for space robotics concern both the development of used prototypes to extend the capabilities and the creation of new classes of systems, the operating analogues of which are, currently, unavailable. Thus, a uniqueness of the objects of space robotics, extreme operating conditions, difficulty in full-scale ground work and tests define a variety of design solutions and a wide scope of issues for further theoretical and experimental studies.

The paper highlights the tasks successfully solved up to date, involving the space robotics equipment that was used in orbital environment, those of currently solved, involving the robotics equipment that is in use, and the long-term objectives, following from the logic of the space technology development to define the ways of its further development and require a development and creation of new equipment of space robotics.

Thus, the development trends of space robotics are largely defined by its history of development, on the one hand, and by a growing demand for the robotic service as applied to the promising objects of space technology, on the other one.

The paper considers the trends of space robotics development, which are a consequence of the natural logic of its development and are determined by a demand for advanced objects of space technology in robotic servicing. Highlights the most important elements of a design concept and the creating and operating features of the multipurpose extendable space systems, including those, which have no analogues and prototypes, are rolled into one demand for automation, and associated with their creation, operation, and problems of utilization. The concept of assembly and service autonomous robotic space modules has been under consideration. Within the orbital assembly procedure, the typical dynamic modes, relevant in terms of practical implementation of controlled movement are highlighted.

References

1. Gradovtsev A.A., Kondrat'ev A.S., Timofeev A.N. Robototekhnicheskoe obespechenie dlia ob"ektov perspektivnoi kosmicheskoi infrastruktury [Robotic systems for prospective space infrastructure functions support]. *International scientific-technical conference "Extreme Robotics", 23--25 November, 2011*. Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Saint Petersburg, 2011. Available at: <http://er.rtc.ru> , accessed 12.11.2016.
2. Moving objects management. Bibliographic index. In 3 issues. Iss. 1. Space objects. *V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences*. Moscow, 2011. 268 p.
3. Thronson H.A., Akin D., Lester J. The Evolution and Promise of Robotic In-Space Servicing. *AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition, 14-17 September 2009*, Pasadena, California. AIAA 2009-6545. Available at: <http://www.enu.kz/repository/2009/AIAA-2009-6545.pdf> , accessed 12.11.2016.
4. Lysyi S.R. Nauchno-tekhicheskie problemy i perspektivy razvitiia robototekhniki spetsial'nogo (kosmicheskogo) naznacheniiia. "Extreme Robotics". Proceedings of the International scientific-technical conference. Politehnika-servis. Saint Petersburg, 2015. P. 29--32.
5. Lopota V.A., Iurevich E.I. O nekotorykh perspektivnykh napravleniakh razvitiia kosmicheskoi robototekhniki. *RSC Energia* site: <http://www.energia.ru>
6. Lopota A.V., Iurevich E.I. Etapy i perspektivy razvitiia modul'nogo printsipa postroeniia robototekhnicheskikh sistem. *Nauchno-tekhicheskie vedomosti SPbGPU = SPbPU Scientific and technical statements*. 2013. No. 1. P. 98-103.
7. Iushchenko A.S. Chelovek i robot -- sovместimost' i vzaimodeistvie. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2014. No. 1(2). P. 4-9.
8. Makarychev V.P., Iurevich E.I. Supervizornoe upravlenie kosmicheskimi manipulatorami. *Asterion*. Saint Petersburg, 2005. 108 p.
9. Cosmonautics of the 21st century. Under ed. by B.E. Chertok. *RTSoft*. Moscow, 2010. 864 p.
10. NASA: official website. Available at: <http://www.nasa.gov/> , accessed 12.11.2016.
11. CSA: official website. Available at: <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/default.asp> , accessed 12.11.2016.
12. Alpatov A.P., Belonozhko P.A., Belonozhko P.P., Kuz'mina L.K., Tarasov S.V., Fokov A.A. Perspektivy ispol'zovaniia i osobennosti issledovaniia dinamiki kosmicheskikh manipulatorov s uprugimi konstruktivnymi elementami. *Tekhnicheskaiia mekhanika = Technical mechanics*. 2012. No. 1. P. 82-93.
13. Kaupp E., Bains E., Flores R., Jorgensen G., Kuo Y.M., White H. Shuttle Robotic Arm. *Engineering Innovations*. P. 286-301. Available at: http://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584734main_Wings-ch4h-pgs286-301.pdf , accessed 12.11.2016.

14. Stockman B., Boyle J., Bacon J. International Space Station Systems Engineering Case Study. Available at:
<http://space.se.spacegrant.org/uploads/images/ISS/ISS%20SE%20Case%20Study.pdf>, accessed 12.11.2016.
15. Lyndsey Poynter, P. The role of dexterous robotics in ongoing maintenance of the ISS. Andrew Keenan. IAC-12,B3,4-B6.5,6,x16014
16. Flexible robot manipulators: modelling, simulation and control. (IET control series). ISBN 978-0-86341-448-0
17. Vasil'ev V.V. Vvedenie v orbital'noe servisnoe obsluzhivanie. *Elmis*. Kiev, 2013, 28 p. ISBN 978-617-696-111-6
18. Timofeev A.N., Shardyko I.V. Problemy primeneniia v kosmose antropomorfnykh robotov. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2013. No 1. P. 37-41.
19. Iaskevich A.V., Ostroukhov L.N., Egorov S.N., Chernyshev I.E. Opyt polunaturnoi otrabotki prichalivaniia rossiiskogo modulia k Mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii distantsionno upravliaemym manipulatorom SSRMS. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2013. No. 1. P. 53-58.
20. Syromiatnikov V.S. Stykovochnye ustroistva kosmicheskikh apparatov. *Mashinostroenie = Mechanical engineering*. Moscow, 1984. 216 p.
21. Syromiatnikov V.S. 100 stories about coupling and other adventures in space and on Earth. Part 1: 20 years ago. *Logos*. Moscow, 2003. 568 p. [In Russian]
22. Syromiatnikov V.S. 100 stories about coupling and other adventures in space and on Earth. Part 1: 20 years ago. Part 2: 20 years after. *Universitetskaia kniga = University book; Logos*. Moscow, 2010. 568 p.
23. Alpatov A.P., Belonozhko P.A., Gorbuntsov V.V., Ivlev O.G., Cherniavskaia S.S., Shichanin V.N. Dinamika prostranstvenno-razvitykh mekhanicheskikh sistem izmeniaemoi konfiguratsii. *Naukova dumka*. Kiev, 1990. 256 p.
24. Alpatov A.P., Belonozhko P.A., Belonozhko P.P., Grigor'ev S.V., Tarasov S.V., Fokov A.A. Modelirovanie dinamiki kosmicheskikh manipulatorov na podvizhnom osnovanii. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2013. No. 1. P. 59-65.
25. Artemenko Iu.N., Belonozhko P.P., Karpenko A.P., Saiapin S.N., Fokov A.A. Ispol'zovanie mekhanizmov parallel'noi struktury dlia vzaimnogo pozitsionirovaniia poleznoi nagruzki i kosmicheskogo apparata. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2013. No. 1. P. 65-71.
26. Alpatov A.P., Belonozhko P.A., Belonozhko P.P., Tarasov S.V., Fokov A.A.. Osobennosti sinteza sistemy upravleniia kosmicheskimi manipulatorami. *Aktual'nye problemy aviatsionnykh i aerokosmicheskikh sistem = Actual problems of aviation and aerospace systems*. 2010. Vol. 15, No. 2(31). P. 38-57.
27. The International Encyclopedia CALS. Aerospace engineering. Chief editor A.G. Bratukhin. OAO "NITs ASK". Moscow, 2015. 608 p.

28. Zgurovskii M.Z., Bidiuk P.I. Analiz i upravlenie bol'shimi kosmicheskimi konstruktssiami. National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". *Naukova dumka*. Kiev, 1997. 451 p.
29. Banichuk N.V., Karpov I.I., Klimov D.M. et al. Mekhanika bol'shikh kosmicheskikh konstruktssii. *Faktorial*. Moscow, 1997. 302 p.
30. Medzmariashvili E.V. Transformiruemye konstruktssii v kosmose i na zemle. Tbilisi, 1995. 446 p.
31. Rutkovskii V.Iu., Sukhanov V.M. Bol'shie kosmicheskie konstruktssii: modeli, metody issledovaniia i printsipy upravleniia. I. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 1996, issue 7, P. 52-65.
32. Rutkovskii V.Iu., Sukhanov V.M. Bol'shie kosmicheskie konstruktssii: modeli, metody issledovaniia i printsipy upravleniia. II. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 1996, issue 8, P. 55-66.
33. Zemliakov S.D., Rutkovskii V.Iu., Sukhanov V.M. Nekotorye problemy upravleniia pri robotizirovannoi sborke bol'shikh kosmicheskikh konstruktssii na orbite. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*. 2006. No. 8. P. 36-50.
34. Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E. Free-flying robots in space: an overview of dynamics modeling, planning and control. *Robotica*, 2007. Volume 25. P. 537-547.
DOI: [10.1017/S0263574707003438](https://doi.org/10.1017/S0263574707003438)
35. Bogomolov V.P., Rutkovskii V.Iu., Sukhanov V.M. Proektirovanie optimal'noi mekhanicheskoi struktury svobodnoletaiushchego kosmicheskogo robototekhnicheskogo modulia kak ob"ekta avtomaticheskogo upravleniia. I. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 1998, issue 5, P. 27-40.
36. Glumov V.M., Rutkovskii V.Iu., Sukhanov V.M. Analiz osobennostei upravleniia pereletami kosmicheskogo robotizirovannogo modulia vblizi poverkhnosti orbital'noi stantsii. I. Upravlenie orientatsiei modulia. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2002. No. 2. P. 162-169.
37. Glumov V.M., Rutkovskii V.Iu., Sukhanov V.M. Analiz osobennostei upravleniia pereletami kosmicheskogo robotizirovannogo modulia vblizi poverkhnosti orbital'noi stantsii. II. Upravlenie traektornymi peremeshcheniiami modulia. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2002. No. 3. P. 140-148.
38. Rutkovskii V.Iu., Sukhanov V.M., Glumov V.M. Upravlenie mnogorezhimnym kosmicheskim robotom pri vypolnenii manipuliatsionnykh operatsii vo vneshnei srede. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 2010, issue 11, P. 96-111.
39. Rutkovskii V.Iu., Sukhanov V.M., Glumov V.M. Uravneniia dvizheniia i upravlenie svobodnoletaiushchim kosmicheskim manipuliatsionnym robotom v rezhime rekonfiguratsii. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 2010, issue 1, P. 80-98.

40. Rutkovskii V.Iu., Sukhanov V.M., Glumov V.M. Nekotorye zadachi upravleniia svobodnoletaiushchimi kosmicheskimi manipuliatsionnymi robotami. I. Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie, 2010, No. 10, P. 52--59.
41. Rutkovskii V.Iu., Sukhanov V.M., Glumov V.M. Nekotorye zadachi upravleniia svobodnoletaiushchimi kosmicheskimi manipuliatsionnymi robotami. II. Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie, 2010, No. 12, P. 54--65.
42. Belonozhko P.P. Perspektivnye montazhno-servisnye robotizirovannye kosmicheskie moduli. *Robotics and Technical Cybernetics*, No. 2(7), 2015. P. 18-23.
43. Daliaev I.Iu., Shardyko I.V., Kuznetsova E.M. Perspektiva sozdaniia robotizirovannykh servisnykh sputnikov dlia tekhnicheskogo obsluzhivaniia i prodleniia srokov aktivnogo sushchestvovaniia kosmicheskikh apparatov. *Robotics and Technical Cybernetics*, No. 3(8), 2015. P. 27-31.
44. Pugachenko S.E. Proektirovanie orbital'nykh stantsii. Textbook. *Bauman Moscow State Technical University*, 2009. 175 p.
45. Gaponov V.A., Zhelezniakov A.B. "Mir" station: from triumph to... *Sistema = System*. Saint Petersburg, 2007. 380 p.
46. Burridge Robert R., Graham Jeffrey (S&K Electronics). Providing robotic assistance during extra-vehicular activity. *SPIE Conference on "Mobile Robots XVI"*, Newton, 29--30 Oct., 2001. 4573. P. 22-33.
47. Visentin Gianfranco. Robotic programs and applications at ESA: present and perspectives. Robotics and Automation in Space. *Proc. of "The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space -- iSAIRAS"*, Munich, Germany. 5-8 September 2005, (ESA SP-603, August 2005). P. 1-7.
48. Ueno Hiroshi, Oda Mitsushige, Inaba Kazuyuki (Japan Aerospace Exploration Agency, Tsukuba, Ibaraki, Japan). Robotics experimental study for SSPS walking and assembly technology. *Proc. of "The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space -- iSAIRAS"*, Munich, Germany. 5-8 September 2005, (ESA SP-603, August 2005). P. 427-430.
49. Heger Frederik W., Hiatt Laura M., Sellner Brennan, Simmons Reid, Singh Sanjiv (The Robotics Institute, Carnegie Melon University, Pittsburgh, USA). Results in sliding autonomy for multi-robot spatial assembly. *Proc. "ISAIRAS 2005 Conference"*, Munich, Germany, 5-8 September 2005 (ESA SP-603, September 2005). P. 448-455.
50. Tanaka Hideyuki, Yamamoto Noritaka, Yairi Takehisa, Machida Kazuo (Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo, Japan). Precise assembly by autonomous space robot using skill acquisition learning. *Proc. of "The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space -- iSAIRAS"*, Munich, Germany. 5-8 September 2005, (ESA SP-603, August 2005). P. 552-559.
51. Stroupe Ashley W., Huntsberger Terry, Kennedy Brett, Aghazarian Hrand, Baumgartner Eric T., Ganino Anthony, Garrett Michael, Okon Avi, Robinson Matthew, Townsend Julie Anne

- (Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, Drive, MS 82-105, Pasadena, CA, USA). *Proc. of "The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space -- iSAIRAS"*, Munich, Germany. 5-8 September 2005, (ESA SP-603, August 2005). P. 567-573.
52. Hirzinger G., Landzettel K., Reintsema D., Preusche C., Albu-Schäffer A., Rebele B., Turk M. (DLR (German Aerospace Center)). ROKVISS -- robotics component verification on ISS. *Proc. of "The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space -- iSAIRAS"*, Munich, Germany. 5-8 September 2005, (ESA SP-603, August 2005). P. 55-65.
53. Shi Shicai, Xie Zongwu, Ni Fenglei, Liu Hong (Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, China). *Xi'an jiaotong daxue xuebao J. Xi'an Jiaotong Univ.* 2007. 41, No. 2. P. 162-166.
54. McCourt Richard A., de Silva Clarence W. Autonomous robotic capture of a satellite using constrained predictive control. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2006. 11, No. 6. P. 699-708.
55. "Molniya" Research & Industrial Corporation -- Official website. Available at: <http://www.buran.ru>, accessed 17.12.2016.