

ПРАКТИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ И РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Б.В. Бурдин, А.А. Курицын, В.Н. Дмитриев, Ю.Б. Сосюрка,
В.А. Довженко, Ю.С. Чеботарев

Канд. техн. наук, ст.н.с. Б.В. Бурдин; докт. техн. наук, доцент А.А. Курицын;
канд. воен. наук, ст.н.с. В.Н. Дмитриев; канд. техн. наук, доцент Ю.Б. Сосюрка;
канд. техн. наук, доцент В.А. Довженко; Ю.С. Чеботарев
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье рассматриваются вопросы применения космических робототехнических систем (РТС), показана роль и место РТС антропоморфного типа как высокотехнологичных сервисных систем, используемых для поддержки деятельности космонавтов при реализации перспективных космических программ. Рассмотрены принципы создания универсального компьютерного стенда антропоморфной РТС для проведения психофизиологических и эргономических исследований, отработки навыков управления космонавтами различными РТС на основе использования технологий виртуальной реальности и средств контроля двигательной и поведенческой активности оператора.

Ключевые слова: космические робототехнические системы, робот-манипулятор, антропоморфный робот, задающее устройство копирующего типа, режим телеуправления, универсальный компьютерный стенд, виртуальные 3D-модели, человеко-машинный интерфейс.

Practice in the Application of the Experimental Improvement and Development of Space Robotic Systems. B.V. Burdin, A.A. Kuritsyn, V.N. Dmitriev, Yu.B. Sosyurka, V.A. Dovzhenko, Yu.S. Chebotaryov

The paper discusses issues of applying space robotic systems (RSs), shows the role and place of humanoid RSs as high-tech service systems used to support activity of cosmonauts when implementing future space programs. It also considers the principles for the creation of a versatile computer-assisted humanoid RS to conduct psycho-physiological and ergonomic studies, to mature the skills of controlling various RSs using virtual reality technologies and means to monitor and control the motion and behavioral activity of an operator.

Keywords: space robotic systems, manipulation robot, humanoid robot, master-slave controller, remote control mode, versatile computer-based stand, virtual 3D-models, human-machine interface.

Обзор роботов-манипуляторов, нашедших практическое применение в пилотируемой космонавтике

Перспективные проекты в области пилотируемой космонавтики предполагают расширение сферы применения космических робототехнических систем, что обусловлено усложнением деятельности экипажей пилотируемых космических комплексов (ПКК), увеличением объемов трудоемких монтажно-восстановительных работ, рутинных операций и возрастанием рисков возникновения опасных ситуаций для жизни и здоровья членов экипажа ПКК. В этой связи особый интерес представляет использование РТС в качестве высокотехнологичного инструментария космонавта при осуществлении внутрикорабельной и внекорабельной деятельности, а также в перспективе – при выполнении напланетной деятельности в лунных миссиях и миссиях по освоению Марса.

Известен ряд практически реализованных подходов ведущих зарубежных и отечественных фирм к построению и применению РТС в пилотируемой космонавтике.

Примером успешного создания и использования роботов-манипуляторов является советский манипулятор «Ляпша». Манипуляторы указанного типа были установлены на 4 модулях орбитальной станции «Мир» и использовались при сборке станции [7].

Вторым ярким примером практического применения является канадский манипулятор «Canadarm» (рис. 1), установленный на космическом корабле «Space Shuttle» и используемый с ноября 1981 года по июль 2011 года. Основным предназначением манипулятора «Canadarm» было перемещение полезного груза из грузового отсека в некоторую точку рабочей зоны с требуемой ориентацией. Манипулятор использовался для захвата телескопа Хаббл, перемещения и выгрузки более 200 тонн компонентов Международной космической станции (МКС) и перемещения астронавтов.



Рис. 1. Канадский манипулятор «Canadarm»

Эволюционным развитием манипулятора «Canadarm» явился манипулятор «Canadarm-2» (SSRMS – Space Station Remote Manipulator System) (рис. 2), предназначенный для выполнения операций на орбите с объектами больших масс и габаритов [1–8].

Из других космических манипуляторов следует отметить японскую манипуляционную систему Japanese Experiment Module Remote Manipulator System – JEMRMS (рис. 3) [1–6] и европейский манипулятор – ERA [10, 11].

Все перечисленные космические манипуляционные системы представляли собой высокотехнологичные дорогостоящие инновационные проекты, потребовавшие создания исследовательских, технологических стендов для экспериментальной отработки образцов и разработки тренажерных средств для подготовки космонавтов и астронавтов.



Рис. 2. Мобильная система обслуживания (MSS)



Рис. 3. Японский экспериментальный модуль МКС, оснащенный манипуляционной системой Japanese Experiment Module Remote Manipulator System (JEMRMS)

В настоящее время при разработке перспективных космических программ, связанных с использованием российского сегмента МКС, наряду с созданием транспортно-манипуляционного робота для выполнения сборочных, монтажных и других технологических операций на внешней поверхности модулей российского сегмента МКС, необходимо создание и использование антропоморфных робототехнических систем (АРТС).

Как и в перечисленных выше манипуляторах, кинематика АРТС также состоит из плечевой, локтевой и кистевой, или запястной части. Отличие заключается в количестве манипуляторов. Так, у АРТС торсового типа их два. Каждый манипулятор крепится к торсовой части и включает шарниры рысканья плеча и тангажа плеча. Плечо и предплечье манипулятора связаны в локтевом сочленении при помощи шарнира тангажа локтя. В кистевой части расположены шарниры тангажа кисти, рысканья кисти и крена кисти. Кистевой захват АРТС позволяет пользоваться штатным бортовым инструментом, разработанным для выполнения работ экипажем МКС.

Первоначально применение АРТС планируется для выполнения операций обслуживания на внешней поверхности космической станции в копирующем режиме и выполнения работ внутри космической станции. При этом наибольший интерес представляет возможность дистанционного управления мобильным роботом, что предполагает задание человеком-оператором сложных двигательных актов на исполнение манипуляционному антропоморфному роботу в ручном (копирующем) режиме.

Следует отметить, что для дистанционного управления роботами с возможностями автономного функционирования имеются различные способы построения человеко-машинного интерфейса. Так, в качестве альтернативы методам контактного съема информации, когда взаимодействие ЧО с органами управления осуществляется на физическом уровне, могут использоваться способы бесконтактного формирования управляющих сигналов с помощью технологий распознавания и идентификации движений ЧО «на расстоянии», систем захвата движения и окулографов [12–14, 17].

Участие ЦПК имени Ю.А. Гагарина в научно-техническом сопровождении создания, экспериментальной отработки и развития АРТС космического назначения

В настоящее время вопросы оценки эффективности использования АРТС, возможности выполнения полетных операций с применением антропоморфных роботов, оптимизации взаимодействия человека и робота являются в большинстве случаев открытыми и требуют проведения специальных исследований. На первый план выходит проблема согласования элементов эргатической системы (ЭС) «человек–АРТС–среда», так как применительно к таким системам недостаточно изучены ограничения человеческого

фактора и способы их преодоления, особенно в тех случаях, когда это взаимодействие осуществляется дистанционно, то есть в режиме телеуправления. Данная проблема актуальна также в связи с трудностями оперативного обмена необходимой информацией по каналам связи из-за больших задержек прохождения сигналов (например, между Землей и Луной или между Землей и Марсом).

Начиная с 2010 года, ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» (далее – Центр) принимает активное участие в научно-техническом сопровождении создания и отработки РТС космического назначения. Ряд работ, связанных с эргономическими исследованиями и испытаниями различных робототехнических систем космического назначения, проводятся по заказу и совместно с ЦНИИмаш.

С июля 2011 года по настоящее время проводятся испытания антропоморфных робототехнических систем, разработанных АО НПО «Андроидная техника» (рис. 4) [15]. В 2014 году проводилась экспертиза АРТС – помощника экипажа, разработанного ООО «Нейроботикс» (рис. 5), и робототехнического комплекса для внекорабельной деятельности разработки ГНЦ РФ ЦНИИ РТК (СПб.).

При проведении испытаний АРТС АО НПО «Андроидная техника» робот повторял (копировал) движения человека-оператора (выполнял «бортовые полетные операции»), одетого в специальный костюм-экзоскелет, надеваемый на плечевой пояс и представляющий собой задающее устройство [15]. Копирование движений человека-оператора осуществлялось в реальном масштабе времени. При этом была реализована силомоментная обратная связь с роботом [12–17].



Рис. 4. Испытание АРТС в копирующем режиме управления по замене блоков научной аппаратуры

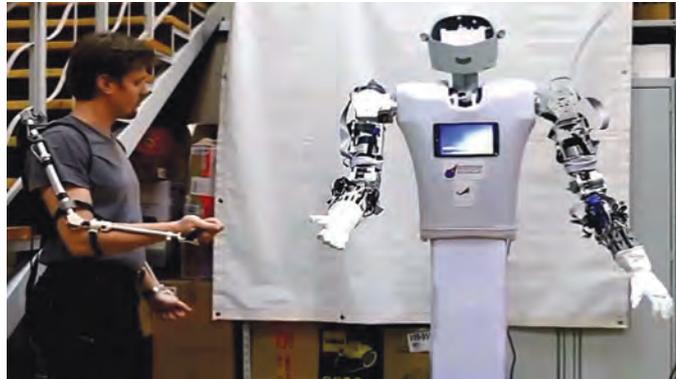


Рис. 5. Экспертиза разработанного ООО «Нейроботикс» АРТС в режимах сбора данных о психофизиологии космонавта-оператора и детекции эмоционального состояния



Рис. 6. Рабочее место космонавта при осуществлении функций управления РТС с борта МКС – космический эксперимент «Контур-2»

Космонавт-оператор, находясь на борту МКС, принимал непосредственное участие в отработке технологии телеуправления роботами по комбинированным каналам связи с ограниченной пропускной способностью и случайными задержками в рамках космического эксперимента «Контур-2» (рис. 6). Задачами данного эксперимента являлись:

– разработка системы телеуправления роботами с помощью задающего манипулятора с обратной связью по силе/моменту в условиях коммуникационных каналов связи с ограниченной пропускной способностью;

- разработка автоматизированного рабочего места, обеспечивающего телеуправление роботами на Земле с борта МКС;
- исследование возможностей человеко-машинного интерфейса при удаленном управлении с силовой обратной связью, используемого в условиях микрогравитации.

Принимая во внимание высокую стоимость создания и риски использования роботов космического назначения, практическую значимость имеют вопросы разработки и применения компьютерных стендов РТС, пригодных для экспериментальной отработки эргономических характеристик системы «космонавт–РТС–среда» различного целевого назначения. Стенды используются и для подготовки космонавтов к деятельности по управлению РТС при реализации вероятных сценариев пилотируемых полетов, что позволит снизить потенциальные риски и опасности при работе с новыми системами и оборудованием.

Состав, предназначение, перспективы использования УКС РТС

Для экспериментальной отработки реальных АРТС, на ранних этапах проектирования эргатической системы «космонавт–АРТС–среда» наиболее приемлемым решением для ЦПК явилось создание исследовательского компьютерного стенда АРТС.

При этом основными требованиями к стенду стали открытость архитектуры и универсальность. Это позволяет моделировать системы «оператор–РТС–рабочее окружение» и средства интерфейса различного типа на базе единого комплекса программно-аппаратных средств и визуализации (виртуальных интерактивных 3D-моделей роботов и их внешнего окружения).

Поскольку стенд относится к высокотехнологичным инновационным проектам, его обоснование и разработка потребовали участия и координации усилий ряда ведущих организаций России в области робототехники, имеющих опыт отработки технологий и эргономического обеспечения создания прототипов роботов и задающих устройств: ФГУП ЦНИИмаш, ПАО РКК «Энергия», ПАО «НПО Андроидная техника», ООО «Нейроботикс», НИИСИ РАН, ЦНИИ РТК (СПб.), МГУ имени М.В. Ломоносова, МГТУ имени Н.Э. Баумана.

УКС РТС представляет собой комплекс (рис. 7), включающий следующие основные элементы: четыре компьютерных рабочих места, два сервера, экран коллективного пользования с проектором, задающее устройство копирующего типа (ЗУКТ) для управления физическим роботом или его 3D-моделью в виртуальной среде, а также очки виртуальной реальности.

Для управления РТС в составе УКС РТС предусмотрено специальное программно-математическое обеспечение, позволяющее исследовать и предварительно планировать безопасные траектории перемещения звеньев роботов и моделировать выполнение полетных технологических операций в виртуальной среде, а затем исполнять их с помощью робота.



Рис. 7. Универсальный компьютерный стенд робототехнических систем

Это существенно снижает опасность ошибок, вызванных «человеческим фактором», и повышает результативность деятельности экипажа.

УКС РТС включает физические (натурные) модели, а также программно-аппаратные средства, имитирующие работу РТС различного целевого назначения и конструктивного исполнения в системе «экипаж–ПКА–среда» с элементами виртуальной реальности.

УКС РТС предназначен для:

- экспериментальной отработки полетных операций, выполняемых РТС с участием космонавтов, в интересах формирования обоснованных требований к программам и методикам подготовки космонавтов к работе с РТС и оценки качества операторской деятельности;
- ознакомления космонавтов с новейшими решениями в области космической робототехники не только на уровне теоретических знаний, но и на уровне формирования наглядно-образных представлений и первичных навыков организации взаимодействия и работы с космическими роботами, а также управления РТС в различных условиях эксплуатации (формирования общей операторской культуры);
- изучения принципов и способов контроля «поведенческой» активности роботов для обеспечения безопасности полета;
- оценки пределов функциональных возможностей космонавтов по выполнению операций при работе с РТС различного технического исполнения и целевого назначения;
- изучения возможных способов построения и использования многомодальных интерфейсов с «очувствленными» роботами, систем управления РТС;
- проведения с участием космонавтов и специалистов Центра эргономической экспертизы новых технических решений при создании РТС различного целевого назначения в интересах повышения эффективности и безопасности деятельности экипажей ПКА;

– формирования базы исходных данных для проведения натуральных космических экспериментов в части взаимодействия космонавтов с образцами РТС, планируемыми к доставке на борт космической станции, на основе предварительных исследований на стенде и др.

Стенд позволяет формировать и накапливать «базы данных» при выполнении технологических операций, детализировать их по элементам, а затем исполнять под контролем оператора или автономно. Этим может быть достигнута возможность впоследствии управлять роботами не только с борта космического аппарата, но и дистанционно, например, с Земли. Такие роботы станут незаменимыми помощниками человека для исследования Луны и Марса и построения лунных (марсианских) баз.

Автоматизированные рабочие места (АРМ) предназначены для оператора РТС и для бригады обеспечения экспериментов. Для удобства взаимодействия участников проводимых экспериментов АРМ располагаются на одной линии, в непосредственной близости друг от друга.

Интерфейс рабочего места оператора обеспечивает:

- отображение трехмерной сцены, включающей РТС, рабочую зону и объекты взаимодействия и окружающего интерьера;
- масштабируемость на экраны различного разрешения.

Интерфейс рабочего места специалистов оперативного управления исследованием обеспечивает:

- отображение на монитор и экран коллективного пользования трехмерной сцены, идентичной изображению на шлеме оператора;
- отображение текущих значений векторов состояний математических моделей в виде числовых данных и в виде графиков.

Интерфейс связи с задающим устройством копирующего типа обеспечивает:

- передачу командной информации;
- обмен данными с задающим устройством;
- перевод величин выходных данных математической модели органов управления в значения для выдачи на задающее устройство.

В основе построения УКС РТС использованы следующие принципы:

1. Открытость и масштабируемость. Модульная архитектура программного обеспечения позволяет вести поэтапную разработку и внедрения, а также позволяет осуществлять дальнейшее расширение как интегрируемых данных, так и объектов информационного обмена и моделей РТС.

2. Интеграция и консолидация данных. Интеграция разрозненных данных от различных систем РТС и органов его управления в упорядоченную единую структуру базы данных, которая представляет собой предметно-ориентированный, интегрированный, поддерживающий хронологию набор данных, постоянно пополняющийся новой достоверной информацией. Этот набор данных является единым источником непротиворечивых и согласованных данных для всех систем УКС РТС.

3. Преемственность. При необходимости возможно пополнение и расширение состава функций, технических, информационных и программных компонентов без нарушения ее функционирования.

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований с использованием УКС РТС позволил разработать предложения по совершенствованию конструкции и технико-эксплуатационных показателей программно-аппаратного интерфейса и виртуальной интерактивной 3D-модели АРТС.

На последующих этапах работы по совершенствованию УКС РТС необходимо проведение исследований по совершенствованию конструктивных и технико-эксплуатационных показателей программно-аппаратного интерфейса, виртуальной интерактивной 3D-модели АРТС и физического прототипа АРТС. Также важны исследования с целью определения возможностей по выполнению 3D-моделью АРТС и физическим прототипом АРТС расширенного перечня бортовых полетных операций внекорабельной и внутрикорабельной деятельности космонавтов. УКС РТС позволяет отрабатывать взаимодействие космонавтов с различными РТС космического назначения и проведение эргономических исследований как в виртуальной среде, так и с физическими прототипами РТС КН. Использование УКС РТС возможно на всех этапах наземной подготовки космонавтов

В настоящее время формируется исследовательская программа, которая нацелена на удовлетворение запросов разработчиков космических роботов в отношении психофизиологических возможностей космонавта при напланетной деятельности и наличии ограничений человеческого фактора.

Выводы

Как свидетельствует опыт реализации космических полетов, одним из перспективных направлений инновационного развития в области космонавтики следует считать разработку технологий создания и применения роботизированных средств (американской – «Canadarm», «Canadarm-2», японской – JEMRMS, европейской – ERA) для осуществления транспортно-манипуляционных работ. Транспортно-манипуляционные роботы нашли практическое применение при выполнении сборочных и монтажных работ на МКС, выполнении технологических операций по восстановлению работоспособности телескопа «Хаббл», инспекции состояния керамических плиток Шаттла и ряд других работ.

Наряду с применением транспортно-манипуляционных роботов существуют проекты по созданию и использованию робототехнических систем антропоморфного типа космического назначения применительно к перспективным лунным миссиям. Однако при этом для обеспечения эффективного и безопасного взаимодействия космонавтов с АРТС требуется решение ряда задач «опережающего» эргономического проектирования космической робототехники.

Учитывая высокую стоимость создания и риски использования роботов космического назначения, практическую значимость для экспериментальной отработки реальных АРТС на ранних этапах проектирования эргатической системы «космонавт–АРТС–среда» имеют вопросы разработки и применения компьютерных стендов РТС различного целевого назначения. Стенд на основе использования технологий виртуальной реальности и средств контроля двигательной и поведенческой активности оператора позволяет проводить подготовку космонавтов к деятельности по управлению РТС при реализации вероятных сценариев пилотируемых полетов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] NASA // NASA: official website. Available at: <http://www.nasa.gov/>, accessed 12.11.2016.
- [2] CSA // CSA: official website. Available at: <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/default.asp>, accessed 12.11.2016.
- [3] E. Kaupp, E. Bains, R. Flores, G. Jorgensen, Y.M. Kuo, H. White Shuttle Robotic Arm // Engineering Innovations. pp. 286–301. Available at: http://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584734main_Wings-ch4h-pgs286-301.pdf, accessed 12.11.2016.
- [4] B. Stockman, J. Boyle, J. Bacon 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.
- [5] The role of dexterous robotics in ongoing maintenance of the ISS / Lyndsey Poynter, P. Andrew Keenan // IAC-12,B3,4-B6.5,6,x16014
- [6] Flexible robot manipulators: modelling, simulation and control. – (IET control series) – ISBN 978-0-86341-448-0
- [7] Крючков Б.И., Усов В.М., Ярополов В.И., Сосюрка Ю.Б., Троицкий С.С., Долгов П.П. Об особенностях профессиональной деятельности космонавтов при осуществлении лунных миссий // Пилотируемые полеты в космос. – № 2 (19). – 2016. – С. 35–58.
- [8] Крючков Б.И., Крикалев С.К., Салаев А.М., Усов В.М. Человек и робот на пилотируемом космическом аппарате // Сборник научных статей по материалам докладов на Первом российско-германском семинаре по космической робототехнике, Германия, Штутгарт, 2012, электронные труды.
- [9] Карпов А.А., Крючков Б.И., Рогаткин Д.А., Усов В.М. Концептуальные подходы к применению сервисных роботов: общность проблем внедрения (на примерах пилотируемой космонавтики и высокотехнологической медицины) // Биотехносфера. – № 6. – 2013. – С. 48–59.
- [10] Алпатов А.П., Белоножко П.А., Белоножко П.П., Кузьмина Л.К., Тарасов С.В., Фоков А.А. Перспективы использования и особенности исследования динамики космических манипуляторов с упругими конструктивными // Техническая механика. – № 1. – 2012. – С. 82–93.
- [11] 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. – № 1. – 2013. – С. 53–58.
- [12] 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. – № 1. – 2013. – С. 59–65.

- [13] Лончаков Ю.В., Сиволап В.А., Сохин И.Г., Сорокин И.Г., Бурдин Б.В.. Эргономические исследования взаимодействия космонавтов с антропоморфными роботами–помощниками. // Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники / Материалы 51-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. – Калуга, 2016. – 496 с.
- [14] Бурдин Б.В., Довженко В.А. Разработка стендов с элементами виртуальной реальности для проведения эргономических исследований системы «Оператор–РТС–Профессиональная среда деятельности» // Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники / Материалы 51-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. – Калуга, 2016 – 496 с.
- [15] <http://express-news.ru/index.php/news/science/item/2943-predstavlen-rossijskij-robot-kosmonavt-sar-401>.
- [16] Бурдин Б.В., Михайлюк М.В., Сохин И.Г., Торгашев М.А. Использование виртуальных 3D-моделей для экспериментальной отработки бортовых полетных операций, выполняемых с помощью антропоморфных роботов. // Робототехника и техническая кибернетика. – № 1. – 2013. – С. 42–46.
- [17] Сохин И.Г., Довженко В.А., Бурдин Б.В., Гребенщиков А.В., Соловьева И.Б. и др. Экспериментальные эргономические исследования процессов дистанционного управления антропоморфной робототехнической системой космонавтами при проведении операций обслуживания КА и объектов лунной инфраструктуры // Материалы XI МНПК «Пилотируемые полеты в космос» 10–12 ноября 2015 г. – Звездный городок, ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», 2015. – С. 31–33.

REFERENCES

- [1] NASA: official website. Available at: <http://www.nasa.gov/>, accessed 12.11.2016.
- [2] CSA: official website. Available at: <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/default.asp>, Accessed 12.11.2016.
- [3] Kaupp E., Bains E., Flores R., Jorgensen G., Kuo Y.M., White H. Shuttle Robotic Arm. Engineering Innovations. pp. 286–301. Available at: http://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584734main_Wings-ch4h-pgs286-301.pdf, accessed 12.11.2016.
- [4] Stockman B., Boyle J., Bacon J. International Space Station Systems Engineering Case Study. Available at <http://spacese.spacegrant.org/uploads/images/ISS/ISS%20SE%20Case%20Study.pdf>, accessed 12.11.2016.
- [5] Lyndsey Poynter, P. The Role of Dexterous Robotics in Ongoing Maintenance of the ISS. Andrew Keenan. IAC-12,B3,4-B6.5,6,x16014
- [6] Flexible Robot Manipulators: Modelling, Simulation and Control. (IET control series). ISBN 978-0-86341-448-0
- [7] B.I. Kryuchkov, V.M. Usov, V.I. Yaropolov, Yu.B. Sosyurka, S.S. Troitsky, P.P. Dolgov. On the Features of Professional Activity of Cosmonauts When Implementing Lunar Missions // Manned Space Flights. 2016. No 2 (19). pp. 35–58.
- [8] Kryuchkov B.I., Krikalev S.K., Salaev A.M., Usov V.M. [Human and a Robot in a Manned Spacecraft]. Sbornik nauchnykh statei po materialam dokladov na Pervom rossiisko-germanskome seminare po kosmicheskoi robototekhnike [Proceedings of the 1st Russian-German Workshop on Space Robotics]. Stuttgart, 2012.
- [9] Karpov A.A., Kryuchkov B.I., Rogatkin D.A., Usov V.M. [Conceptual Approaches for Using Service Robots: Common Problems of Implementation (On the Example of Manned Space Exploration and High-Tech)]. Biotekhnosfera – Biotechnosphere. 2013. No 6. pp. 48–59. (In Russ.).

- [10] 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. [The Prospect and Peculiarities of Using Space Manipulators with Elastic Constructive Elements] / *Tekhnicheskaja mekhanika = Technical mechanics*. 2012. No 1. pp. 82–93.
- [11] Iaskevich A.V., Ostroukhov L.N., Egorov S.N., Chernyshev I.E. Opyt polunaturalnoi otrabotki prichalivaniia rossiiskogo modulia k Mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii distantsionno upravliaemym manipulatorom SSRMS. [Simulation of the ISS – Russian Module Docking Operations Using the Space Station Remote Manipulator System (SSRMS)] / *Robotics and Technical Cybernetics*. 2013. No 1. pp. 53–58.
- [12] 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. [Modeling the Dynamics of Space Manipulators on a Movable Platform] / *Robotics and Technical Cybernetics*. 2013. No 1. pp. 59–65.
- [13] Lonchakov Yu.V., Sivolap V.A., Sokhin I.G., Sorokin V.G., Burdin B.V. Ergonomic Studies of the Interaction Between Cosmonauts and Anthropomorphic Robotic Assistants // *The ideas of K.E. Tsiolkovsky the innovation of science and technology / Materials 51-s Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky – Kaluga*. 2016. – p. 496.
- [14] Burdin B.V., Dovzhenko V.A., The Development of Stands with VR-elements for Ergonomic Research of the «OPERATOR – RS - PROFESSIONAL ENVIRONMENT» System // *The ideas of K.E. Tsiolkovsky. the innovation of science and technology / Proceeding of the 51-st Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky – Kaluga*. 2016. – p. 496.
- [15] Available at: <http://express-news.ru/index.php/news/science/item/2943-predstavlen-rossijskij-robot-kosmonavt-sar-401>.
- [16] Burdin B.V., Mihayluk M.V., Sokhin I.G., Torgashev M.A. The Use of Virtual 3D models for Experimental Testing of the Flight Operations Performed by Means of Anthropomorphic Robots // *Robotics and technical cybernetics* No 1. 2013, ISSN 2310-5305 – pp. 42–46.
- [17] Sokhin I.G., Dovzhenko V.A., Burdin B.V., Grebenshikov A.V., Solovyova I.B. and others. Experimental Ergonomic Studies of an Anthropomorphic Robotic System Controlled by Cosmonauts while Maintaining Spacecraft and Lunar Infrastructure Facilities. // *Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference “Manned Space Flights”, November 10–12, 2015. – Gagarin Test& Research CTC, Star City, Moscow Region, 2015. pp. 31–33.*