

УДК 621.004.896

doi: 10.18698/0536-1044-2021-1-16-26

Эргономическое сопровождение разработки антропоморфных робототехнических систем космического назначения

Е.А. Дудоров^{1,2}, И.Г. Сохин², А.А. Богданов², Б.Г. Колбасин²

¹ МГТУ им. Г.И. Носова

² АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника»

Ergonomic Support for the Development of Anthropomorphic Robotic Systems for Space Purposes

E.A. Dudorov^{1,2}, I.G. Sokhin², A.A. Bogdanov², B.G. Kolbasin²

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University

² AO Research and Production Association Android Technics

Перспективные проекты освоения и использования Луны и других планет Солнечной системы предполагают широкое использование робототехнических систем космического назначения, в частности, антропоморфных роботов-помощников экипажей космических экспедиций. При создании и применении таких роботов-помощников организация их эффективного и безопасного взаимодействия с космонавтами становится актуальной задачей. Рассмотрены основные эргономические проблемы, возникающие при разработке и использовании коллаборативных роботов, содержание процесса эргономического сопровождения их разработки и методологический подход к его реализации. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: антропоморфный робот-помощник, виртуальная реальность, дистанционное управление, копирующий режим, эргатическая система, эргономическое сопровождение

Advanced projects of exploration and use of the Moon and other planets of the Solar system involve extensive use of robotic systems for space purposes and, in particular, anthropomorphic robot assistants for space expedition crews. The challenges of effective organization of interaction between the cosmonauts and robot assistants are of particular importance. The article examines the main ergonomic problems that arise in the development and use of collaborative robots, the content of the process of ergonomic support for their development and the methodological approach to its implementation. The results of the experimental research are also presented.

Keywords: anthropomorphic robot assistant, virtual reality, remote control, copying mode, ergatic system, ergonomic support

Перспективные программы освоения дальнего космоса, осуществления межпланетных полетов на Луну, к Марсу и ближайшим астероидам невозможны без использования робототехнических систем (РТС) космического назначения.

Одним из направлений развития РТС в пилотируемой космонавтике является разработка

так называемых антропоморфных роботов-помощников экипажей (АРПЭ), подобных по построению телу человека и имеющих аналогичные кинематические характеристики.

Такие роботы имеют некоторые преимущества перед РТС другого типа при выполнении высокоточных полетных операций в уже со-

зданных человеко-машинных интерфейсах пилотируемых космических комплексов. АРПЭ могут функционировать как в автономном (автоматическом) режиме, так и в копирующем режиме удаленного управления.

Копирующий режим дистанционного управления АРПЭ наиболее эффективен в ситуациях неопределенности, когда целеполагание и алгоритм деятельности должны быть гибко адаптированы к изменяющимся внешним условиям.

Наилучшим образом к такому виду деятельности приспособлен человек, поэтому использование его достоинств можно реализовать в копирующем режиме дистанционного управления АРПЭ с помощью экзоскелета. В качестве человека-оператора, управляющего АРПЭ, может выступать член экипажа или оператор наземного центра управления полетами [1–4].

Вследствие отсутствия опыта применения АРПЭ в космической деятельности организация их безопасного и эффективного взаимодействия с космонавтами становится актуальной задачей. Предлагается решать эти задачи комплексно в ходе эргономического сопровождения (ЭС) процессов их разработки.

ЭС необходимо для распределения функций между космонавтом и АРПЭ, для обоснования и включения эргономических требований к АРПЭ в состав технических заданий на выполнение опытно-конструкторских работ по созданию образцов АРПЭ, для проведения эргономической экспертизы и др.

В итоге ЭС благодаря оптимизации совместной деятельности космонавта и АРПЭ должно обеспечить заданную целевую эффективность применения АРПЭ в условиях космического полета без ущерба для здоровья космонавтов [5].

Цель работы — обоснование эргономических требований к АРПЭ в эргатической системе космонавт — робот — среда.

Сущность ЭС разработки АРПЭ. Рассматриваемые АРПЭ относятся к классу так называемых коллаборативных (безопасно взаимодействующих с человеком) космических роботов. В отличие от полностью автономных РТС космического назначения коллаборативные РТС могут функционировать в непосредственной близости от космонавта и имеют следующие особенности:

- обеспечение необходимого уровня безопасности находящимся рядом с АРПЭ космонавтам (минимизация рисков причинения им вреда);

- обучение космонавтов удаленному выполнению полетных операций с помощью телеуправляемого АРПЭ, формирование навыков эффективного и безопасного взаимодействия с АРПЭ (требуется специальная тренажерная подготовка космонавтов-операторов);

- совместная работа космонавтов с АРПЭ, функционирующим как в автоматическом, так и в копирующем режиме удаленного управления (должен быть создан и экспериментально отработан эффективный человеко-машинный интерфейс).

Эти особенности коллаборативных роботов обуславливают появление следующих эргономических проблем (задач), требующих решения при разработке и применении АРПЭ [6]:

- обоснование перечня полетных задач и операций экипажа, которые целесообразно передать для выполнения АРПЭ;

- рациональное распределение функций между человеком-оператором и АРПЭ, выбор приоритетных режимов функционирования АРПЭ при реализации полетных задач;

- разработка рабочего места человека-оператора и эффективного человеко-машинного интерфейса;

- обоснование требований по эффективному применению АРПЭ и обеспечению безопасности космонавтов;

- обоснование требований к методикам подготовки космонавтов для работы с АРПЭ, а также к средствам их подготовки и проведения экспериментальных эргономических исследований и экспертиз;

- выполнение опережающих эргономических исследований по использованию АРПЭ космонавтами и экспертиз принимаемых технических решений.

Перечисленные задачи следует решать поэтапно в ходе ЭС процессов проектирования, разработки, испытаний и опытной эксплуатации АРПЭ.

ЭС должно включать в себя: обоснование эргономических требований к АРПЭ, человеко-машинному интерфейсу, рабочему месту человека-оператора и средствам подготовки космонавтов; включение их в состав тактико-технического задания на выполнение опытно-конструкторских работ; участие в эргономическом



Рис. 1. Структура эргатической системы космонавт — робот — среда

проектировании; научно-методическое обеспечение и проведение эргономической экспертизы проектов с целью оптимизации; выбор наиболее эффективных путей и способов реализации эргономических требований и ряд смежных задач.

Особенностью ЭС является его жесткая связь с проектированием и экспертизой, которые в совокупности образуют непрерывный комплекс работ, представляющий собой (в силу необходимости учета большого количества взаимосвязанных между собой факторов) многоступенчатый итеративный процесс, основанный на применении методов оптимизации.

Модельное представление эргатической системы космонавт — АРПЭ — профессиональная среда деятельности (система космонавт — робот — среда). ЭС должно опираться на системный подход к анализу взаимосвязей космонавта-оператора с АРПЭ. Такой анализ позволяет определить особенности взаимодействия космонавта с АРПЭ при выполнении полетных операций, а также исследовать факторы, влияющие на эффективность их совместной деятельности [7].

В основу современных научных методов исследований, включая экспериментальные, как

правило, положены различные модельные представления объекта исследования. Для анализа взаимодействия космонавта с АРПЭ выбрана модель сложной эргатической системы космонавт — робот — среда, концептуальная структура которой приведена на рис. 1 [6, 7].

Компонентами рассматриваемой системы являются космонавт-оператор, АРПЭ, представляющий собой сложную техническую систему, и профессиональная среда деятельности — некая среда, в которой находятся космонавт-оператор, АРПЭ, другие технические объекты (системы) и где осуществляется профессиональная деятельность космонавта при выполнении полетных операций.

Следует отметить, что в настоящее время принципиально невозможно построить строгую формализованную математическую модель исследуемой системы в силу ее сложности, слабой изученности, многообразия действующих факторов, их качественного и случайного характера, нечеткости целей и критериев оценивания.

Вследствие этого в качестве альтернативы для моделирования эргатической системы в ходе ЭС предлагается использовать многофакторную эвристическую модель, основанную на построении эвристик и опирающихся на субъ-

ективные суждения экспертов. Внешне эвристическая модель отличается от формальной прежде всего отсутствием переменных в явном виде. Для обозначения таких понятий как переменная, характеристика, параметр, признак, цель и критерий в эвристических моделях используют один термин — *фактор*.

Исходя из такого модельного представления и ранее приобретенного опыта экспериментальных исследований взаимодействия космонавта с телеуправляемой антропоморфной робототехнической системой (АРТС), разработана эвристическая модель системы космонавт — робот — среда (рис. 2).

Взаимные влияния R_F факторов F образуют иерархическую *структуру эвристической (факторной) модели*:

$$M = \{F, R_F\}.$$

Корневую вершину этой структуры составляет фактор f_0 , непосредственно характеризующий изучаемый объект. Объект определяется *критерием*, состоящим в наложении явных ограничений Ω на абсолютное или относительное значение корневого фактора. Здесь введены следующие обозначения: f_i — учитываемые факторы, $\{\Omega\}$ — множество ограничений, накладываемых на функционирование системы (например, управление осуществляется виртуальными моделями или физическими макетами АРТС).

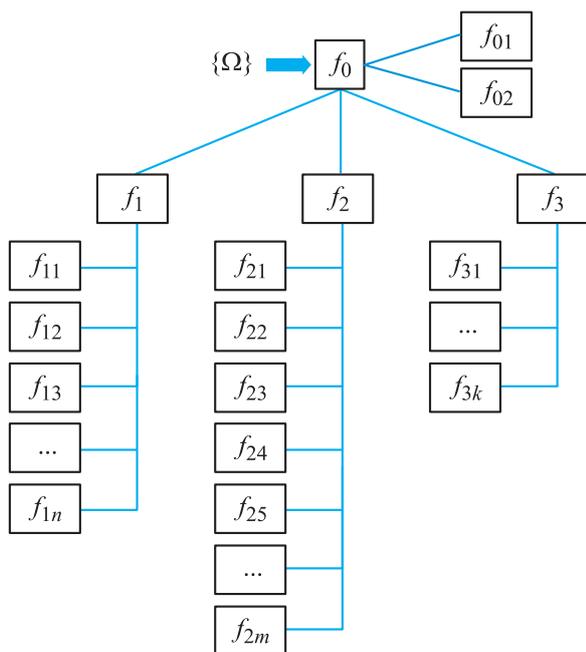


Рис. 2. Эвристическая модель системы космонавт — робот — среда

Примеры факторов, учитываемых в эвристической модели, и способов их оценивания приведены в таблице.

Следует отметить, что состав факторов модели и способы их оценивания могут быть изменены или дополнены в процессе ЭС разных этапов разработки робота.

Результаты экспериментальных исследований дистанционного управления опытными образцами АРПЭ с помощью управляющего экзоскелета. Для решения задач ЭС, в частности для выполнения экспериментальных исследований взаимодействия космонавтов с АРПЭ, эффективное применение получили технологии виртуального окружения [10, 11]. Их использование позволяет проводить исследования на виртуальных интерактивных 3D-моделях роботов и окружающей среды без проведения натуральных экспериментов с дорогостоящими макетами АРПЭ.

При этом на текущем уровне развития технологий можно обеспечить высокую достоверность виртуального моделирования как визуальных, так и динамических характеристик. Такое решение было реализовано на универсальном компьютерном стенде РТС, разработанном специалистами АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (АО «НПО «Андроидная техника») в Центре подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина для выполнения экспериментальных эргономических исследований применения АРПЭ и подготовки космонавтов.

Общая схема работы с моделью выглядит следующим образом [10]. Оператор надевает специальный костюм (экзоскелет), позволяющий с высокой точностью фиксировать движения человека. Управляющие сигналы от экзоскелета поступают в систему моделирования, где вычисляются углы поворота и координаты отдельных звеньев АРТС.

Результирующие координаты и углы передаются в систему 3D-моделирования, которая синтезирует на экране монитора (или большом настенном экране) в моно- или стереорежиме изображение АРПЭ с текущими положениями его звеньев, а также окружающую обстановку. Ориентируясь на полученное изображение, оператор выполняет необходимые движения, которые в реальном времени (т. е. с частотой не менее 25 кадров в секунду) отображаются на экране.

Факторы эвристической модели системы космонавт — робот — среда

Фактор		Показатель оценивания	Критерии оценивания
Обозначение	Наименование		
f_0	Качество операции	–	1. Точность. 2. Быстродействие
f_{01}	Точность, безошибочность	Ошибка	1. Без ошибки. 2. Некритические ошибки. 3. Критические ошибки (операция считается невыполненной)
f_{02}	Быстродействие	Время выполнения операции	1. Время выполнения операции в пределах выделенного лимита времени. 2. При превышении этого лимита операция считается невыполненной
f_1	Космонавт-оператор	–	–
f_{11}	Подготовленность	Исходный уровень тренированности	1. Неопытный. 2. Опытный (большой опыт работы с задающим устройством копирующего типа)
f_{12}	Мотивация	Уровень мотивации оператора на выполнение операций	1. Низкий. 2. Высокий
f_{13}	Антропометрические данные оператора	Рост, размах рук, объем груди, размер кисти и др.	Данные подлежат ранжированию по трем уровням (типам) телосложения операторов: 1) астенический; 2) нормостенический; 3) гиперстенический
f_{1i}
f_{1n}	Обучаемость оператора	Время тренировок/количество отработанных режимов, достаточных для проведения большинства операций	Определяется в ходе выполнения предварительных (обучающих) операций перед началом тестовой работы
f_2	АРТС	–	–
f_{21}	Управляемость	Оценка в баллах (1...10)	1. Экспертная оценка членов бригады. 2. Субъективная оценка оператора по шкале Купера — Харпера [8, 9]
f_{22}	Обратная связь по ощущениям оператора (визуальная, силомоментная, тактильная)	Субъективная оценка оператора	1. Комментарии оператора в ходе проведения эксперимента. 2. Послеоперационный тест оператора
f_{2j}
f_3	Среда	–	–
f_{31}	Тип операции	Уровень сложности операции	1. Простая. 2. Сложная. NB: уровень сложности операции определяется количеством и сложностью выполняемых элементарных манипуляционных действий
f_{3q}

Таким образом, у оператора возникает ощущение непрерывного перемещения модели АРПЭ, повторяющей его движения. Если в вир-

туальной среде задать инерционные характеристики АРПЭ, его звеньев и окружающих объектов (массы, тензоры инерции и т. д.), то можно



Рис. 3. Сеанс дистанционного управления операциями виртуального АРПЭ

моделировать реальную динамику его работы. К ней относятся обработка столкновений частей АРПЭ с окружающими объектами (коллизии), захват и манипуляции с объектами, воздействие других объектов на АРПЭ и т. д. На виртуальной сцене можно моделировать различные повреждения, нештатные ситуации, стратегии выполнения операций и др.

Технологии виртуальной реальности также могут быть эффективными для создания человеко-машинных интерфейсов взаимодействия космонавт — робот [11]. Примерами являются режимы индуцированной и дополненной виртуальных реальностей.

Режим индуцированной виртуальной реальности заключается в том, что в процессе работы реального АРПЭ в космосе все параметры его движений (углы поворота звеньев) передаются по телеметрии в масштабе реального времени в виртуальную модель, находящуюся на Земле или внутри космического аппарата.

По этим данным виртуальная модель будет в точности повторять движения реального АРПЭ. Таким образом, космонавт может осуществлять дополнительный визуальный контроль выполняемых операций на виртуальной модели в реальном масштабе времени. При этом ему доступны произвольные ракурсы наблюдения, в том числе те, которые отсут-

ствуют в реальности. Это позволяет повысить эффективность использования АРПЭ при проведении полетных операций.

В режиме дополненной виртуальной реальности происходит совмещение реальной обстановки, наблюдаемой с помощью видеокамер, с виртуальной сценой. Это предоставляет дополнительные возможности контроля действий космонавта-оператора со стороны инструктора.

В 2015 г. на базе Центра подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина в рамках ЭС разработки опытного образца АРПЭ (SAR-401) впервые были проведены экспериментальные эргономические исследования дистанционного управления космонавтом АРПЭ в копирующем режиме [12].

Для выполнения ряда тестовых операций использовали натурный образец задающего устройства копирующего типа (экзоскелета), разработанного АО «НПО «Андроидная техника», шлем оператора Oculus Rift DK2 и виртуальные 3D-модели АРПЭ и окружающей среды совместной разработки АО «НПО «Андроидная техника» и ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований РАН».

На этом этапе исследований разрабатывали экспертные предложения и рекомендации по улучшению характеристик аппаратно-программного комплекса управления роботом

и 3D-моделями, а также оценивали возможность дистанционного управления 3D-моделью АРПЭ в копирующем режиме, качество реализации эффекта присутствия при виртуальном управлении роботом, физические ограничения (стесненность, скованность и др.), накладываемые на оператора задающим устройством копирующего типа, восприятие оператором степени соответствия движений (собственных и манипуляторов робота), комфортность и утомляемость оператора при использовании шлема виртуальной реальности.

В эксперименте принимали участие космонавты и квалифицированные инструкторы, проводящие их подготовку по динамическим операциям (всего более 30 человек). На операторов-испытателей накладывали задающее устройство, шлем отображения виртуальных сцен и медицинские датчики контроля состояния (рис. 3).

Тестовые задания операторам включали в себя операции взятия и перемещения с помощью АРПЭ предметов на рабочем столе, а также штатные полетные операции, выполняемые космонавтами внутри гермоотсеков Международной космической станции и на ее поверхности в открытом космосе. В среднем непрерывная работа каждого оператора в виртуальном окружении составляла около одного часа.

Экспериментальные исследования носили комплексный характер. Оценивались показатели психофизиологического состояния работоспособности операторов-испытателей до, во время и после проведения экспериментов, а также показатели качества управления роботом (рис. 4).

Методика экспериментальных исследований, основанная на многофакторной модели системы космонавт — робот — среда, предусматривала учет качества результатов деятельности операторов, условия выполнения ими поставленных задач, затруднений, возникающих в процессе их деятельности, результаты физиологических и психологических исследований операторов и др. Для отбора релевантных частных методик оценивания использовали статистический анализ данных, наблюдения, опросы, экспертную оценку и психологическое тестирование операторов.

После завершения серии экспериментов и статистической обработки данных получены следующие результаты [12–15]:

- показана принципиальная возможность дистанционного управления мобильным АРПЭ в копирующем режиме при использовании задающего устройства копирующего типа с эмулирующей сценариев взаимодействия 3D-моделей АРПЭ и окружающей обстановки;
- проведенные исследования не подтвердили публикации о побочных реакциях организма со



Рис. 4. Сеанс комплексных исследований

стороны зрительного анализатора, проприоцептивной системы, вестибулярной системы и мышечного аппарата, которые мешали бы выполнению поставленной задачи виртуального управления роботом; по предварительным оценкам, при управлении виртуальной 3D-моделью АРПЭ с помощью устройства копирующего типа и шлема виртуальной реальности у операторов не возникало побочных реакций организма, препятствующих выполнению заданий;

- выявлены недостатки (технические, технологические, эргономические), значительно влияющие на характеристики управляемости программно-аппаратного комплекса рабочего места оператора АРПЭ;

- в целом оценка эффекта присутствия — положительная: оператор ощущает себя внутри ситуации, выступает активным звеном системы и процесса управления; при работе с АРПЭ преобладающей информацией являются собственные представления и визуальный ряд; вследствие ограничений моделей (отсутствия осязания, искажения геометрических размеров объектов, недостатков шлема виртуальной реальности, недостаточного полного моделирования физических условий и др.) эффект присутствия оказался ниже ожидаемого.

Выводы

1. Для перспективных программ освоения космического пространства потребуется широкое использование РТС разных типов и назначения. В частности, для операционной поддержки деятельности межпланетных экспедиций найдут применение АРПЭ.

2. При создании и использовании АРПЭ возникают эргономические проблемы их взаимодействия с космонавтами. Для решения этих проблем предложено проводить ЭС процессов проектирования, разработки, испытаний и опытной эксплуатации АРПЭ. Целью ЭС является обоснование эргономических требований тактико-технического задания к образцам АРПЭ и их поэтапное обеспечение в ходе разработки путем оптимизации совместной деятельности космонавта и АРПЭ.

4. Эргономическое сопровождение разработки АРПЭ должно опираться на научно-методическое, кадровое и техническое обеспечение.

5. Участниками ЭС могут стать организации-разработчики роботов, научно-исследовательские организации государственного заказчика и организации ракетно-космической промышленности, определенные решением госкорпорации «Роскосмос».

Литература

- [1] Сорокин В.Г., Сохин И.Г. Возможные области применения антропоморфных роботов-помощников экипажей в отсеках перспективных космических комплексов. *Пилотируемые полеты в космос*, 2015, № 4(17), с. 71–79.
- [2] Богданов А.А., Дудоров Е.А., Пермяков А.Ф., Рыбак Е.В., Сохин И.Г. Искусственный интеллект в робототехнических системах космического назначения. *Искусственный интеллект в космической технике: состояние, перспективы применения*, Москва, Радиотехника, 2020, с. 195–259.
- [3] Жиденко И.Г., Кутлубаев И.М., Богданов А.А., Сычков В.Б. Обоснование выбора структурной схемы роботов космического исполнения. *Решетневские чтения. Матер. XVII междунар. науч. конф.*, Красноярск, 12–14 ноября 2013, Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, в 2 ч. Ч. 1, 2013, с. 278–280.
- [4] Кутлубаев И.М., Богданов А.А., Дудоров Е.А., Пермяков А.Ф., Пронин А.А. Исследование возможности использования дистанционно-управляемого антропоморфного робота в условиях космического полета. *Робототехника и искусственный интеллект. Матер. XI Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием*, Железногорск, 14 декабря 2019, Красноярск, ЛИТЕРА, 2019, с. 88–93.
- [5] Лончаков Ю.В., Сиволап В.А., Сохин И.Г. Эргономические проблемы создания и применения антропоморфных роботов-помощников экипажей перспективных космических миссий. *Экстремальная робототехника. 26-я науч.-техн. конф.*, Санкт-Петербург, 8–9 октября 2015, Санкт-Петербург, Изд-во Политехника-сервис, с. 191–199.

- [6] Сохин И.Г., Курицын А.А. Проблемы взаимодействия экипажей перспективных космических миссий с антропоморфными роботами-помощниками. *Человеческий фактор в сложных технических системах и средах. Сб. тр. 3-й Междунар. конф.*, Санкт-Петербург, 4–7 июля 2018, Санкт-Петербург, ЛЭТИ, с. 782–789.
- [7] Сохин И.Г., Сорокин В.Г. Системный подход к обоснованию эргономических требований к роботу-помощнику экипажа пилотируемого космического комплекса. *Пилотируемые полеты в космос*, 2016, № 1(18), с. 89–98.
- [8] Ефремов А.В., Коровин А.А. Модификация критериев оценки пилотажных характеристик и явлений раскачки самолета летчиками. *Труды МАИ*, 2012, вып. 55. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=30131> (дата обращения 15 августа 2020).
- [9] Осыковский О.Н. Шкала Купера–Харпера как инструмент обеспечения безопасности полетов. *Проблемы безопасности полетов*, 2010, № 10, с. 14–22.
- [10] Сохин И.Г., Бурдин Б.В., Михайлюк М.В., Торгашев М.А. Использование виртуальных 3-D моделей для экспериментальной отработки бортовых полетных операций, выполняемых с помощью антропоморфных роботов. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2013, № 1, с. 42–46.
- [11] Михайлюк М.В., Сохин И.Г., Прилипко А.А. Использование индуцированной виртуальной реальности для повышения безопасности работы роботов в космическом пространстве. *Проблемы управления безопасностью сложных систем. Тр. XXIV Междунар. науч. конф.*, Москва, 21 декабря 2016, Москва, РГГУ, 2016, с. 199–201.
- [12] Сохин И.Г., Лончаков Ю.В., Сиволап В.А., Михайлюк М.В., Сычков В.Б. Эргономическое исследование дистанционного взаимодействия космонавтов с антропоморфными роботами-помощниками. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2016, № 3(12), с. 18–22.
- [13] Сосюрка Ю.Б., Сохин И.Г., Долгов П.П., Каспранский Р.Р. Актуальные проблемы пилотируемых полетов к Луне: новые задачи отбора и подготовки экипажей лунных экспедиций. *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*, 2014, № 6, с. 21–28.
- [14] Bogdanov A., Dudorov E., Kutlubayev I., Permyakov A., Pronin A. Control System of a Manipulator of the Anthropomorphic Robot FEDOR. *12th International Conference on Developments in e-Systems Engineering*, Kazan, IEEE, INSPEC Accession Number 9557273, 2019, pp. 449–453, doi: 10.1109/DeSE.2019.00088
- [15] Пермяков А.Ф., Сохин И.Г., Шпонько А.А., Дудоров Е.А. Подготовка и проведение космического эксперимента с применением антропоморфного робота «Федор». *Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки*, 2020, № 3(207), с. 64–72, doi: 10.17213/1560-3644-2020-3-64-72

References

- [1] Sorokin V.G., Sokhin I.G. Feasible application of anthropomorphic robotic assistants to support a crew inside the modules of future space complexes. *Pilotiruyemyye polety v kosmos*, 2015, no. 4(17), pp. 71–79 (in Russ.).
- [2] Bogdanov A.A., Dudorov E.A., Permyakov A.F., Rybak E.V., Sokhin I.G. Artificial intelligence in space-based robotic systems. *Iskusstvennyy intellekt v kosmicheskoy tekhnike: sostoyaniye, perspektivy primeneniya* [Artificial intelligence in space technology: state and prospects of application]. Moscow, Radiotekhnika publ., 2020, pp. 195–259.
- [3] Zhidenko I.G., Kutlubayev I.M., Bogdanov A.A., Sychkov V.B. Basis of structural scheme selection of space application robots. *Reshetnevskiy chteniye. Mater. XVII mezhunar. nauch. konf.* [Reshetnev readings. Materials of the XVII international scientific conference]. Krasnoyarsk, 2013, pp. 278–280.
- [4] Kutlubayev I.M., Bogdanov A.A., Dudorov E.A., Permyakov A.F., Pronin A.A. Investigation of the possibility of using a remote-controlled anthropomorphic robot in space flight. *Robototekhnika i iskusstvennyy intellekt. Mater. XI Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdu-narodnym uchastiyem* [Robotics and artificial intelligence. Materials of the XI all-Russian

- scientific and technical conference with international participation]. Zheleznogorsk, 2019, pp. 88–93.
- [5] Lonchakov Yu.V., Sivolap V.A., Sokhin I.G. Ergonomic problems of creation of antropomorphic robotic crew assistants for future space missions. *Ekstremal'naya robototekhnika. 26-ya nauch.-tekhn. konf.* [Proceedings of the International Scientific and Technological Conference Extreme Robotics]. Saint-Petersburg, pp. 191–199.
- [6] Sokhin I.G., Kuritsyn A.A. Problems of interaction of crews with anthropomorphous robotic assistants in future space missions. *Ekstremal'naya robototekhnika*, 2018, no. 1, pp. 44–50 (in Russ.).
- [7] Sokhin I.G., Sorokin V.G. System approach to the substantiation of ergonomic requirements for the robotic assistant of a crew aboard manned space complexes. *Pilotiruyemyye polety v kosmos*, 2016, no. 1(18), pp. 89–98 (in Russ.).
- [8] Efremov A.V., Korovin A.A. The modification of criteria for flying qualities and PIO prediction. *Trudy MAI*, 2012, iss. 55 (in Russ.). Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=30131> (accessed 15 August 2020).
- [9] Osykovyy O.N. Cooper–Harper's scale as a tool of providing the security of flights. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2010, no. 10, pp. 14–22 (in Russ.).
- [10] Sokhin I.G., Burdin B.V., Mikhaylyuk M.V., Torgashev M.A. The usage of virtual 3D models for experimental exercising the flight operations performed with the help of antropomorphic robots. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2013, no. 1, pp. 42–46 (in Russ.).
- [11] Mikhaylyuk M.V., Sokhin I.G., Prilipko A.A. Use of induced virtual reality to improve the safety of robots in outer space. *Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem. Trudy XXIV Mezhdunar. nauch. konf.* [Security management problems of complex systems. Proceedings of the XXIV International scientific conference]. Moscow, 2016, pp. 199–201.
- [12] Sokhin I.G., Lonchakov Yu.V., Sivolap V.A., Mikhaylyuk M.V., Sychkov V.B. Ergonomic studies of remote interaction between astronauts and antropomorphic robot assistants. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2016, no. 3(12), pp. 18–22 (in Russ.).
- [13] Sosyurka Yu.B., Sokhin I.G., Dolgov P.P., Kaspranskiy R.R. Actual issues of manned space flight to the moon: new tasks of crew's selection and training for lunar missions. *Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2014, no. 6, pp. 21–28 (in Russ.).
- [14] Bogdanov A., Dudorov E., Kutlubaev I., Permyakov A., Pronin A. Control System of a Manipulator of the Antropomorphic Robot FEDOR. *12th International Conference on Developments in e-Systems Engineering*, Kazan, IEEE, INSPEC Accession Number 9557273, 2019, pp. 449–453, doi: 10.1109/DeSE.2019.00088
- [15] Permyakov A.F., Sokhin I.G., Shpon'ko A.A., Dudorov E.A. Preparing and performing a space experiment with use of the antropomorphic robot “Fedor”. *Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*, 2020, no. 3(207), pp. 64–72 (in Russ.), doi: 10.17213/1560-3644-2020-3-64-72

Статья поступила в редакцию 15.09.2020

Информация об авторах

ДУДОРОВ Евгений Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры МиТОДиМ. МГТУ им. Г.И. Носова; исполнительный директор АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (109518, Москва, Российская Федерация, ул. Грайвороновская, д. 23, e-mail: dudorov@npo-at.com).

СОХИН Игорь Георгиевич — доктор технических наук, научный руководитель. АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (109518, Москва, Российская Федерация, ул. Грайвороновская, д. 23, e-mail: isokhin@yandex.ru).

БОГДАНОВ Алексей Анатольевич — главный конструктор. АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (109518, Москва, Российская Федерация, ул. Грайвороновская, д. 23, e-mail: bogdanov@npo-at.com).

КОЛБАСИН Борис Геннадьевич — руководитель научно-технического отдела № 2 по направлению «Космическая робототехника». АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (109518, Москва, Российская Федерация, ул. Грайвороновская, д. 23, e-mail: boris.kolbasin@npo-at.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дудоров Е.А., Сохин И.Г., Богданов А.А., Колбасин Б.Г. Эргономическое сопровождение разработки антропоморфных робототехнических систем космического назначения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 1, с. 16–26, doi: 10.18698/0536-1044-2021-1-16-26

Please cite this article in English as:

Dudorov E.A., Sokhin I.G., Bogdanov A.A., Kolbasin B.G. Ergonomic Support for the Development of Anthropomorphic Robotic Systems for Space Purposes. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 1, pp. 16–26, doi: 10.18698/0536-1044-2021-1-16-26

Information about the authors

DUDOROV Evgeniy Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Machines and Technologies of Pressure Treatment and Mechanical Engineering. Nosov Magnitogorsk State Technical University; Executive Director. AO Research and Production Association Android Technics (109518, Moscow, Russian Federation, Grayvoronovskaya St., Bldg. 23, e-mail: dudorov@npo-at.com).

SOKHIN Igor Georgievich — Doctor of Science (Eng.), Research Manager. AO Research and Production Association Android Technics (109518, Moscow, Russian Federation, Grayvoronovskaya St., Bldg. 23, e-mail: isokhin@yandex.ru).

BOGDANOV Aleksei Anatolievich — Chief Designer. AO Research and Production Association Android Technics (109518, Moscow, Russian Federation, Grayvoronovskaya St., Bldg. 23, e-mail: bogdanov@npo-at.com).

KOLBASIN Boris Gennadievich — Head of Department, Research and Development Department no. 2 of Space Robotics. AO Research and Production Association Android Technics (109518, Moscow, Russian Federation, Grayvoronovskaya St., Bldg. 23, e-mail: boris.kolbasin@npo-at.com).