

УДК 004.896:629.78.007

**ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ КОЛЛАБОРАЦИИ КОСМОНАВТОВ  
С РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ  
ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПИЛОТИРУЕМЫХ  
КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ**

В.А. Дикарев, А.Н. Симбаев, А.Ю. Кикина,  
Ю.С. Чеботарев, И.А. Буковская, А.Е. Белявский

Докт. техн. наук, проф. В.А. Дикарев; канд. техн. наук, доц. А.Н. Симбаев; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации А.Ю. Кикина; Ю.С. Чеботарев; И.А. Буковская (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Докт. техн. наук А.Е. Белявский (МАИ)

В статье рассматриваются вопросы выполнения совместных операций космонавтов и робототехнических систем. Это позволит акцентировать внимание на достижении коллаборативного взаимодействия космонавтов и робототехнических систем как бесконфликтного, исключающего системные бинарные отношения: конфликт и безразличие. Таким образом, коллаборативное взаимодействие космонавта и робототехнической системы рассматривается с точки зрения бинарных системных отношений: сотрудничество между взаимосвязанными компонентами эргатической системы «человек – машина». Предложен метод проектирования бесконфликтных операций, являющийся основой для создания технологии формирования содержательного компонента заданий на применение робототехнических систем.

**Ключевые слова:** коллаборативные робототехнические системы, информационно-моделирующая среда, коллаборативное взаимодействие, конфликт, безразличие, сотрудничество, космический эксперимент

**On Providing Collaboration with Robotic Systems for Cosmonauts  
in the Interests of Promising Manned Space Flights. V.A. Dikarev,  
A.N. Simbaev, A.Yu. Kikina, Yu.S. Chebotarev, I.A. Bukovskaya,  
A.E. Belyavsky**

The paper considers issues of performing joint operations by cosmonauts and robotic systems. This will allow to accent on achieving collaborative interaction between cosmonauts and robotic systems as conflict-free, excluding systemic binary relations such as conflict and indifference. Thus, collaborative interaction between cosmonauts and robotic systems is considered from the point of view of binary systemic relations: cooperation between interconnected elements of the “human – machine” ergatic system. We suggest a method for designing conflict-free operations that is the basis to develop the technology for forming meaningful element of the task of using robotic systems.

**Keywords:** collaborative robotic systems, information-simulation environment, collaborative interactions, conflict, indifference, cooperation, space experiment

Важность и значимость развития космической робототехники в интересах создания и использования робототехнических систем (РТС) в перспективных пилотируемых космических полетах (ППКП) для совместной работы с космонавтами не вызывает сомнения. Компоненты эргатической системы (ЭС) «космонавт – РТС», которая может находиться в бинарных системных отношениях взаимодействия: конфликт, безразличие и сотрудничество. Конфликт характеризуется снижением целевой функции полезности ЭС «космонавт – РТС», безразличие – ее неизменностью, сотрудничество – ее повышением. Безусловно, целью создания и применения таких РТС является достижение между компонентами системы ЭС «космонавт – РТС» сотрудничества путем недопущения конфликта и исключения безразличия.

Концептуально взаимодействие космонавта и РТС, а также рабочий процесс в коллаборативной робототехнической системе (КРТС) можно разбить на следующие классы: сосуществование, кооперация, коллаборация.

Класс непосредственно самого взаимодействия определяется четырьмя атрибутами: рабочее время, рабочее пространство, общая цель, физический контакт.

Соотношение классов и атрибутов класса взаимодействия показан на рис. 1 [1–4, 8].

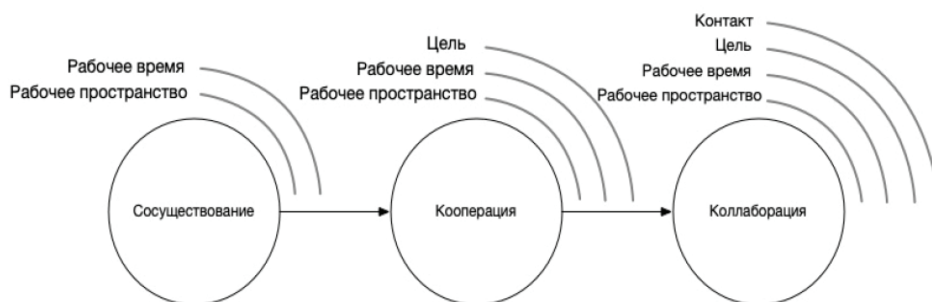


Рис. 1. Классификация взаимодействия космонавта и РТС по классам взаимодействия

В представленной классификации взаимодействия космонавта и РТС отображается длительность совершения совместных действий в рамках единого рабочего пространства. Если космонавт и РТС находятся в едином рабочем пространстве, то данное взаимодействие представляет собой их сосуществование. При наличии единой цели взаимодействия космонавт и РТС кооперируются для выполнения поставленных задач, а если происходит контакт с объектом воздействия или, например, используется речевое управление роботом, то такое взаимодействие может быть обозначено как коллаборация космонавта и РТС.

Под коллаборативными роботами (коботами) принято понимать автоматические устройства, которые могут работать совместно с человеком для

создания или производства различных продуктов; под робототехникой (*англ.* robotics, от робот/техника) – прикладную науку, занимающуюся разработкой автоматизированных технических систем. С учетом этого, в проекции на пилотируемую космонавтику, можно применять следующие термины:

- космические коботы (космокоботы) – автоматические устройства, которые могут работать совместно с космонавтами при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте пилотируемых космических аппаратов (ПКА);
- космическая кобототехника – прикладная наука, занимающаяся разработкой автоматизированных технических систем, которые могут работать совместно с космонавтами при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте ПКА.

Развитие и внедрение коллаборативных роботизированных технологий и средств, направленных на выполнение совместных операций с эффектом в отношениях сотрудничества в сочетании с интеллектуальными интегрированными технологиями и средствами виртуальной, дополненной реальности и манипуляции (элементов искусственного интеллекта), является предпосылкой:

- для трансформации роботов-помощников космонавтов в роботы-партнеры космонавтов, которые обеспечат их взаимодействие с эффектом отношения сотрудничества в процессе выполнения совместной деятельности, соответственно и расширение задач на Российской орбитальной станции (РОС) с использованием КРТС;
- разработки РТС, обеспечивающих выполнение задач во время отсутствия космонавтов.

## Исследование системной модели проектирования операций применения РТС

На основании этих моделей предлагается концептуальная модель (рис. 2), являющаяся своего рода постановкой задачи по проектированию операций управления РТС.

Для системного описания задачи по проектированию операций управления РТС использованы концептуальные модели анализа условий функционирования –  $\langle \text{среда} \rangle \leftrightarrow \langle \text{конфликт} \rangle \leftrightarrow \langle \text{цель} \rangle$ , и целенаправленного функционирования любой системы –  $\langle \text{цель} \rangle \leftrightarrow \langle \text{стратегия} \rangle \leftrightarrow \langle \text{ресурсы} \rangle$ .



Рис. 2. Обобщенная структура проектирования операций управления РТС

При этом категория  $\langle \text{цель} \rangle$  характеризует множество желаемых результатов функционирования РТС;  $\langle \text{среда} \rangle$  – множество взаимодействий РТС с элементами окружающей среды, обусловленных общностью;  $\langle \text{конфликт} \rangle$  – область недостижимости желаемых результатов функционирования РТС;  $\langle \text{ресурсы} \rangle$  – область допустимых решений;  $\langle \text{стратегия} \rangle$  – совокупность тех мероприятий, реализация которых обеспечит достижение поставленной перед РТС цели при имеющихся ограничениях на ресурсы;  $\langle \text{операция} \rangle$  – упорядоченную совокупность связанных взаимными отношениями действий, направленных на достижение конкретной цели, в частности, действий  $D_s$  операторов для достижения цели функционирования РТС.

В соответствии с этой концептуальной моделью операция может быть направлена либо только на выбор и распределение ресурсов РТС при отсутствии конфликтов, либо на разрешение конфликтов (в случае их наличия), предусматривающих или перераспределение выбранных ресурсов, или выбор и распределение дополнительных ресурсов.

### Исследование метода проектирования бесконфликтных операций применения РТС

Схематично метод проектирования бесконфликтных операций управления РТС изображен на рис. 3.

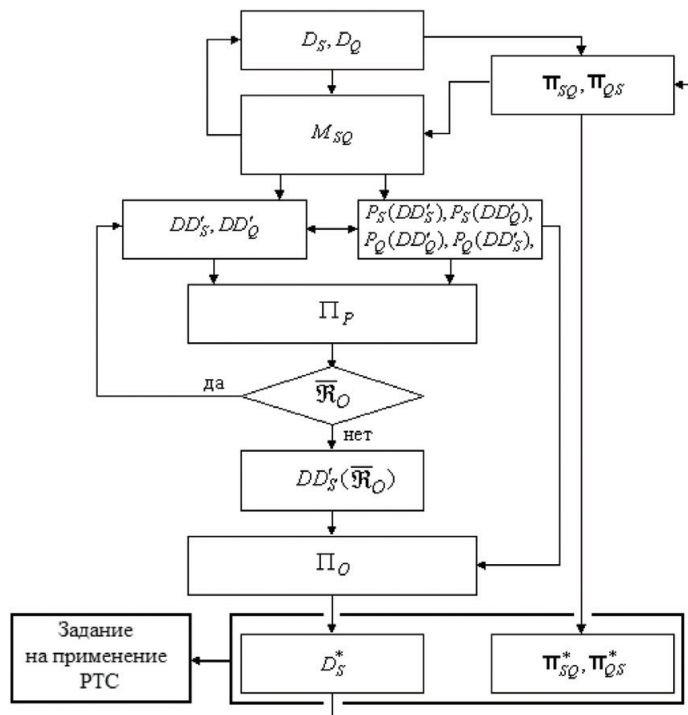


Рис. 3. Процедура выбора бесконфликтных операций

Сущность этого метода заключается в следующем:

1. В системной модели  $M_{SQ}$  задаются текущие условия функционирования РТС, определяющиеся воздействиями  $\pi_{QS}$  и  $\pi_{SQ}$ , а также располагаемые ресурсы  $R_S$ .

2. С помощью системной модели  $M_{SQ}$  формирования операций методом перебора стратегий действий  $D_S$  и  $D_Q$  определяются совокупности возможных операций  $DD'_S = \{D'_S\}$  и  $DD'_Q = \{D'_Q\}$  по управлению РТС и соответствующие величины полезности для операций  $P_S(D'_S)$ ,  $P_S(D'_Q)$ ,  $P_Q(D'_Q)$  и  $P_Q(D'_S)$ , а также  $P_S(\overline{D'_S})$ ,  $P_S(\overline{D'_Q})$ ,  $P_Q(\overline{D'_Q})$  и  $P_Q(\overline{D'_S})$ , где  $\overline{D'_S} \in DD'_S$  и  $\overline{D'_Q} \in DD'_Q$ .

3. На основании анализа показателей  $\Pi_P$  взаимного влияния выполняемых операций на полезность функционирования РТС и среды происходит выявление конфликтов, которые выбраковываются из множества  $DD'_S$ . Это обеспечивает формирование бесконфликтного множества операций  $DD'_S(\overline{K}_O) \subset DD'_S$ , где  $\overline{K}_O$  – отсутствие конфликта.

4. На основании анализа показателей  $\Pi_O$  взаимной ориентации операций РТС и среды в соответствии с назначением РТС выбор рациональной операции  $D_S^*$  из множества  $DD'_S(\overline{K}_O)$  происходит по одному из вариантов:  $D_S^* = \max_{DD'_S(\overline{K}_O)} P_S$  или  $D_S^* = \min_{DD'_S(\overline{K}_O)} P_S$ .

5. В соответствии с выбранной рациональной операцией  $D_S^*$  с помощью системной модели  $M_{SQ}$  происходит уточнение условий функционирования РТС: воздействия  $\pi_{SQ}^*$  и  $\pi_{QS}^*$ .

6. По сформированным операциям  $D_S^*$  и воздействиям  $\pi_{SQ}^*$  и  $\pi_{QS}^*$  происходит коррекция соответствующих содержательных компонентов заданий на применение РТС.

Представленный метод позволяет обеспечить оперативную адаптацию предписанных операций по управлению РТС, являющихся содержательным компонентом заданий на применение РТС, к изменяемым условиям их функционирования.

Этот метод является основой для создания технологии формирования содержательного компонента заданий на применение РТС (рис. 4), которая позволит освободить постановщиков заданий от рутинной работы по обработке массивов необходимых данных, исключить по субъективным факторам искажение результатов. Это способствует обеспечению корректности определения квалификационных требований, предъявляемых к операторам РТС, а значит и проведению их подготовки с отражением существующей действительности.

Естественно, в процессе дальнейшего развития этот метод может быть дополнен различными компонентами, например, для оптимизации выбора операций по времени ее реализации и по использованию ресурсов РТС.

Таким образом, предлагается метод проектирования содержательного компонента заданий на применение РТС, отличающийся от известных

тем, что в нем используются показатели взаимной ориентации и взаимного влияния операций, по которым при возникновении конфликта применения заданий на использование РТС осуществляется выбраковка конфликтных и выбор рациональных операций, сгенерированных из допустимого множества функциональных действий операторов.

Это вполне соответствует пониманию конфликтозащищенности в широком смысле слова, которое выражается как способность к выявлению полезных содержательных компонентов заданий на применение РТС в условиях конфликтов, вызванных изменяющимися условиями функционирования РТС. Характерным достоинством этого метода, аналогично как и системной модели проектирования операций, является его инвариантность как целевому и функциональному назначению, так и физико-математическому и структурно-параметрическому представлению РТС [4].

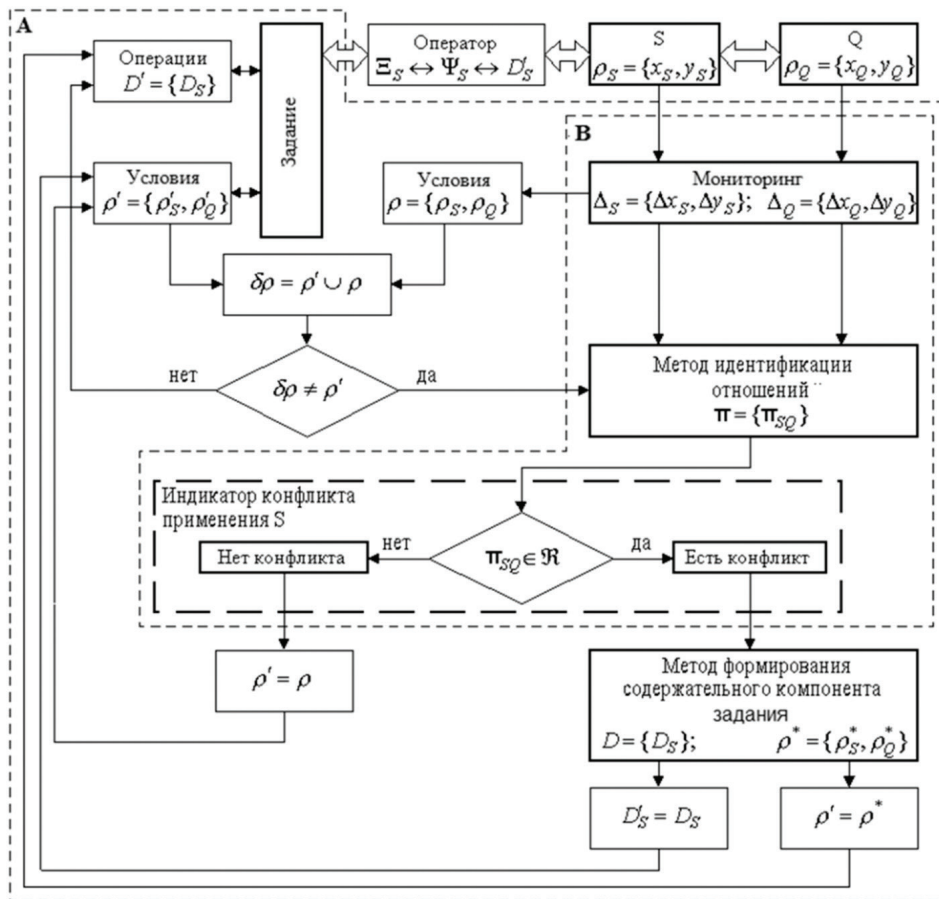


Рис. 4. Технология определения содержательных компонентов заданий на применение РТС в интересах обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавта и РТС

## **Исследование метода предварительного проектирования операционной поддержки деятельности экипажей ПКА с применением РТС**

Одной из ключевых особенностей коллаборативного взаимодействия космонавта с РТС является выполнение ими совместных операций, которые по своей сути являются спаренными или бигеминальными. Исследования взаимодействия человека с РТС с позиции достижимости степени бигеминальности операций человека и робота в явном виде не проводились. Очевидно, что уровень коллаборативного взаимодействия человека и РТС может определяться необходимостью и достаточностью достижимости бигеминальности операторской деятельности в ППКП [4–6].

Одними из способов обоснования необходимости и достаточности достижимости бигеминальности операторской деятельности космонавтов в ППКП могут стать специальные экспериментальные исследования (ЭИ) на моделирующих комплексах до и после воздействия невесомости и других неблагоприятных факторов длительных ППКП. С учетом этого адаптирован метод предварительного проектирования средств и интерфейсов информационной поддержки деятельности экипажей ПКА в интересах предварительного проектирования средств и интерфейсов операционной поддержки деятельности экипажей ПКА с применением РТС (рис. 5).

Этот метод позволяет разрешить перекрестные взаимосвязи относительно обеспечения операторской деятельности космонавтов с применением РТС, а именно:

- между операторской деятельностью космонавтов длительных пилотируемых космических полетов и обликом средств и интерфейсов операционной поддержки деятельности экипажей ПКА с применением РТС с учетом тенденций развития конструкторско-технологических решений;
- обликом средств и интерфейсов операционной поддержки деятельности экипажей ПКА с применением РТС и конфигурацией моделирующих и натуральных (физических) стендов (например, универсальный компьютерный стенд (УКС) РТС), используемых для оценки операторской деятельности космонавтов длительных пилотируемых космических полетов.

Базовым стендом для проведения данных ЭИ в ближайшей перспективе планируется использовать модернизированный УКС РТС Центра подготовки космонавтов.

С помощью УКС РТС моделируется выполнение полетных технологических операций РТС в виртуальной среде при копирующем управлении космонавтом-оператором с помощью ЗУКТ, а также возможно управление реальной РТС (например, антропоморфный робот, совмещенный с мобильной платформой). Применительно к лунным экспедициям в первую очередь требуется рассмотреть модели и механизмы коллаборативного взаимодействия космонавта-оператора и РТС, отражающие этапы отработки технологий

РТС в соответствии с необходимостью и достаточностью достижения степени бигеминальности операторской деятельности в длительных ППКП.

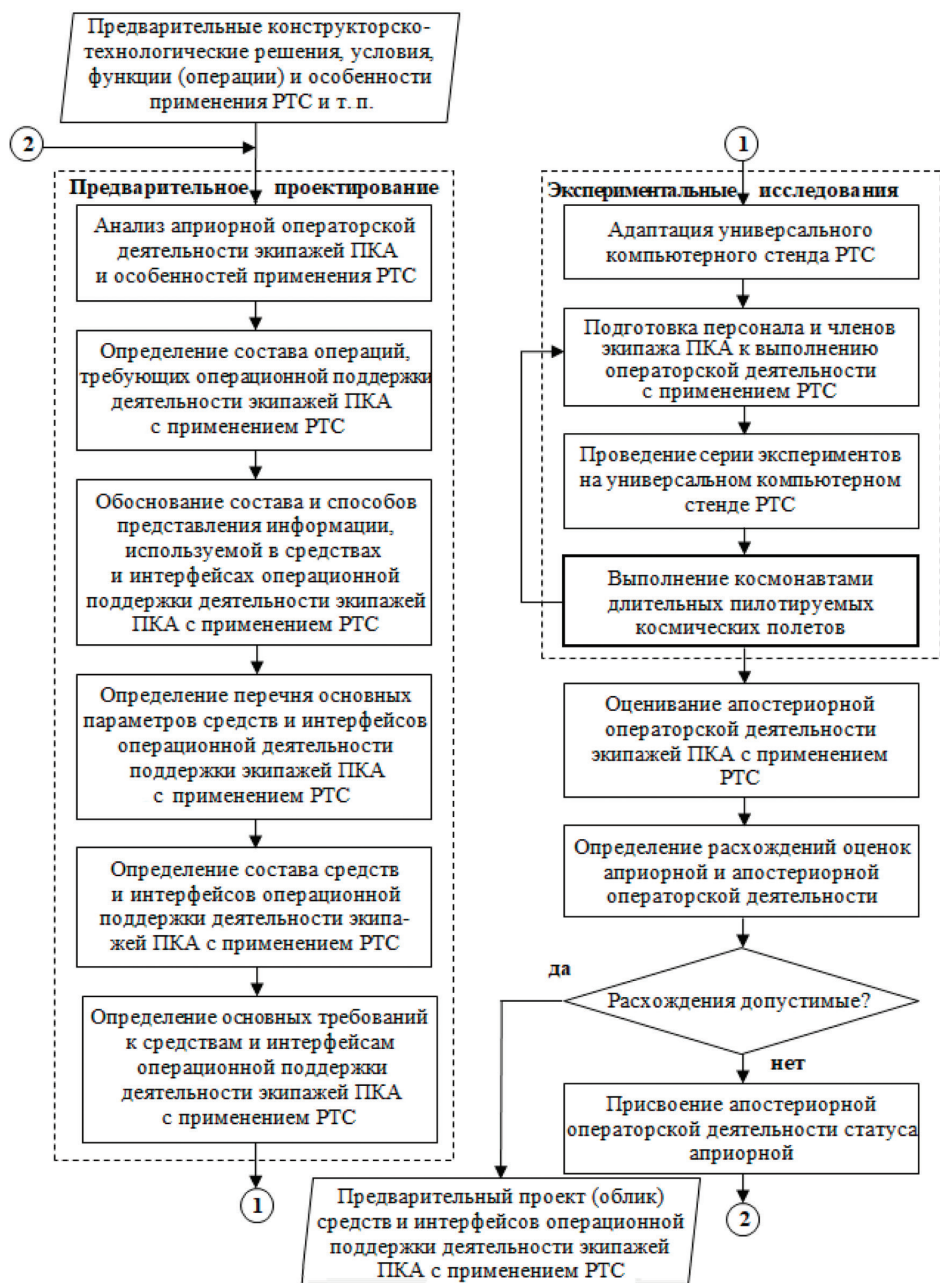


Рис. 5. Итерационный метод предварительного проектирования средств и интерфейсов операционной поддержки деятельности экипажей ПКА с применением РТС



Они станут основой для адаптации методов структурно-параметрического поиска решений на стадии предварительного проектирования компонентов коллаборативного взаимодействия космонавтов и РТС с возможностями их экспериментальной отработки на моделирующих и натуральных комплексах ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», включая УКС РТС.

Серия планируемых исследований по возможным направлениям обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с РТС для ППКП в первую очередь направлена на определение применимости рассмотренного научно-методического аппарата с экспериментальным подтверждением возможностей и ограничений его использования. В случае успешной апробации и верификации рассмотренного научно-методического аппарата появятся дополнительные возможности по расширению принятого научно-методического аппарата, используемого в том числе для оценки операторской деятельности космонавтов с точки зрения обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с различными объектами космической техники, планируемыми к использованию при реализации ППКП. Для этого, конечно, необходимо получить соответствующие экспериментальные данные.

При этом одним из направлений ЭИ является согласование свойств интерактивности и ассистивности окружения РТС с возможностями восприятия информации космонавтом, что может быть достигнуто развитием диалоговых средств, включая применение многомодальных интерфейсов взаимодействия системы «космонавт – робот-помощник». Наиболее значимая тенденция в проектировании интерфейсов взаимодействия космонавтов с РТС при выполнении совместных операций – использование многомодальных пользовательских интерфейсов (рис. 6) [7].

При организации и отработке коллаборативных робототехнических технологий и средств (КРТиС) и их развитии в обеспечении функционирования ППКК, обслуживание их систем в беспилотном полете и при нештатных



Рис. 6. Варианты построения интерфейсов интерактивного взаимодействия космонавта с РТС

ситуациях, а также процессов операционной и информационной поддержки внутрикорабельной (ВнуКД) и внекорабельной деятельности (ВКД) при ограничениях функциональных возможностей членов экипажа в условиях факторов космического пространства, можно выделить следующие этапы:

1. Наземная подготовка с использованием мобильного автоматизированного рабочего места (АРМ) УКС РТС, позволяющая проведение концептуальных и системных исследований для решения следующих задач:

- создание научно-технического задела КРТиС;
- отработка новых технологий при создании и обосновании сценариев использования КРТиС;
- отработка операционной и информационной поддержки деятельности космонавтов с использованием КРТиС.

2. Бортовая реализация с использованием бортовой версии мобильного АРМ УКС РТС, предназначенная для проведения в условиях факторов космического пространства (невесомость, перегрузки, шумы, вибрация, десинхронизация биоритма, высокие напряжения в электрических цепях, радиация, температура, вакуум) прикладных и поисковых исследований для решения следующих задач:

- отработка в условиях факторов космического пространства ЭИ применимости новых технологий, используемых при разработке КРТиС;
- отработка в условиях факторов космического пространства ЭИ реализуемости сценариев использования КРТиС;
- отработка в условиях факторов космического пространства ЭИ результативности операционной и информационной поддержки деятельности космонавтов с использованием КРТиС;
- отработка в условиях факторов космического пространства ЭИ сравнительной оценки операторской деятельности космонавта с использованием КРТиС.

3. Анализ результатов исследований, предназначенный для решения следующих задач при исследовании экспериментальных данных для оценки:

- научно-технического задела КРТиС;
- применимости новых технологий, используемых при создании КРТиС;
- реализуемости сценариев использования КРТиС;
- результативности операционной и информационной поддержки деятельности космонавтов с использованием КРТиС;
- операторской деятельности космонавтов с использованием КРТиС.

## **Выводы**

Решение задач с использованием КРТиС в обеспечении функционирования ПКА, обслуживании их систем в беспилотном полете и при нештатных ситуациях, а также ограничениях функциональных возможностей членов

экипажа при совместном выполнении операций ВнуКД и ВКД, в моделируемых на Земле условиях космического полета способствует получению данных:

1) о динамике изменения качественных показателей профессиональной деятельности космонавтов;

2) динамике изменения качественных показателей операционной и информационной поддержки деятельности космонавтов;

3) динамике изменения качественных показателей операторской деятельности космонавта;

4) согласовании сценариев использования КРТиС.

Наличие этих данных позволит обеспечить проектирование и отработку коллаборации и интерфейса взаимодействия космонавтов с РТС для операционной и информационной поддержки деятельности экипажей в ППКП.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дикарев, В.А. Разработка элементов коллаборативного взаимодействия космонавтов с робототехническими системами для пилотируемых космических полетов / В.А. Дикарев, Ю.С. Чеботарев // Идеи и Новации. – 2022. – № 1, 2, Т. 10. – С. 99–103.
- [2] О возможности отработки коллаборативного использования антропоморфной и манипуляционной робототехнической системы для операционной поддержки внекорабельной деятельности космонавтов / В.А. Дикарев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев, Э.В. Никитов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – № 3(44). – С. 69–84.
- [3] Ющенко, А.С. Эргономические проблемы коллаборативной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 85–93.
- [4] Чеботарев, Ю.С. О некоторых направлениях обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с робототехническими системами для пилотируемых космических полетов / Ю.С. Чеботарев, В.А. Дикарев. – DOI:10.31776/ConfER.32.2021 // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – С. 65–77.
- [5] Исследование особенностей выполнения космонавтами совместной операторской деятельности по применению антропоморфного робота, совмещенного с мобильной платформой в режиме телеуправления в длительных космических экспедициях / В.А. Дикарев, А.Н. Симбаев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев [и др.] // Сборник тезисов 35-й международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК, 2024. – С. 351–353.
- [6] Исследование возможностей использования робототехнических систем для поддержания операторской деятельности экипажей и формирования экосистемы/микроклимата сотрудничества / В.А. Дикарев, В.И. Дубинин, А.Н. Симбаев, А.Ю. Кикина [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – № 2(47). – С. 15–31.
- [7] Исследование и разработка подходов к распределению задач в коллаборативной робототехнической системе / Р.Р. Галин, М.В. Мамченко, С.Б. Галина, Р.В. Мещеряков // Материалы 18-й Всероссийской научно-практической

конференции «Перспективные системы и задачи управления» и 14-й молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах» (Таганрог, 2023). – Таганрог: Лукоморье, 2023. – С. 72–76.

- [8] Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах / Р.Р. Галин, В.В. Серебряный, Г.К. Тевяшов, А.А. Широкий // Известия Юго-Западного Государственного университета. – 2020. – № 24(4). – С. 180–199.

## REFERENCES

- [1] Dikarev V.A., Chebotarev Yu.R. Development of Elements of Collaborative Interaction Between Cosmonauts and Robotic Systems for Manned Space Flights / V.A. Dikarev, Yu.R. Chebotarev // Ideas and Innovations. – 2022. – No 1, 2, Vol. 10. – P. 99–103.
- [2] On the Possibility of Maturing the Collaborative Use of Anthropomorphic Robotic System and Manipulation Robotic System for Operational Support of Cosmonaut's Extravehicular Activity / V.A. Dikarev, A.Yu. Kikina, Yu.R. Chebotarev, E.V. Nikitov [et al.] // Manned Spaceflight. – 2022. – No 3(44). – P. 69–84.
- [3] Yushchenko A.R. Ergonomic Problems of Collaborative Robotics // Robotics and Technical Cybernetics. – Vol. 7, No 2. – 2019. – P. 85–93.
- [4] Chebotarev, Yu.R. On Some Directions of Ensuring Collaborative Interaction Between Cosmonauts and Robotic Systems for Manned Space Flights / Yu.R. Chebotarev, V.A. Dikarev. – DOI:10.31776/ConfER. 32.2021 // Proceedings of the international scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”. – P. 65–77.
- [5] Study of the Features of Joint Operator Activity Performed by Cosmonauts in Using an Anthropomorphic Robot Combined with a Mobile Platform in Telecontrol Mode during Long-Duration Space Expeditions / V.A. Dikarev, A.N. Simbaev, A.Yu. Kikina, Yu.S. Chebotarev [et al.] // Collection of Abstracts of the 35th International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”. – St. Petersburg: Central Research Institute OF RTK, 2024. – P. 351–353.
- [6] Investigation of Robotic Systems Possibilities to Support Crew Operator Activity and Formation of Cooperation Ecosystem / Microclimate / V.A. Dikarev, V.I. Dubinin, A.N. Simbaev, A.Yu. Kikina [et al.] // Manned Spaceflight. – No 2(47). – 2023. – P. 15–31.
- [7] The Study and Development of Approaches to the Distribution of Tasks in a Collaborative Robotic System / R.R. Galin, M.V. Mamchenko, R.B. Galina, R.V. Meshcheryakov // Proceedings of the 18th All-Russian Scientific and Practical Conference “Advanced Systems and Control Tasks” and the 14th Youth School-Seminar “Control and Information Processing in Technical Systems” (Taganrog, 2023). – Taganrog: Lukomorye, 2023. – P. 72–76.
- [8] Human Interaction and Work in Collaborative Robotic Systems / R.R. Galin, V.V. Serebrenny, G.K. Tevyashev, A.A. Shirokiy // Proceedings of the Southwestern State University. – 2020. – No 24(4). – P. 180–199.