

УДК 621.865.8

doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-49-62

Технологии системы управления антропоморфными робототехническими платформами*

Е.А. Дудоров

АО «НПО «Андроидная техника»

Technology of the anthropomorphic robotic complex control system

E.A. Dudorov

JSC Scientific and Production Association Android Technics

Антропоморфная (человекоподобная) робототехника с каждым годом вызывает все больший интерес со стороны разработчиков и потенциальных потребителей. Развитие технологий искусственного интеллекта и компонентов робототехники позволяют уже сегодня создавать робототехнические комплексы, способные выполнять типовые операции на уровне человека в самых разных условиях эксплуатации. Рассмотрены результаты работы по созданию технологий управления антропоморфными робототехническими комплексами. Описаны технологические макеты роботов, их состав и структурно-функциональная схема аппаратной реализации технологии управления. Отмечены особенности технологий управления с силомоментной обратной связью и без нее. Показаны перспективы применения технологий комбинированного управления в антропоморфных робототехнических комплексах, которые смогут полностью заменить человека во всех сферах деятельности при выполнении работ в опасных для здоровья и жизни условиях. Предложен трансфер технологий и решений для применения роботов в химической и атомной промышленности при выполнении работ в условиях радиационного, химического и биологического заражения с использованием штатного оборудования и инструментов, а также при освоении космического пространства.

Ключевые слова: человекоподобный робот, антропоморфная робототехническая платформа, технологический макет, робототехнический комплекс, копирующее управление, комбинированное управление

Anthropomorphic (humanoid) robotics is arousing more and more interest with developers and potential consumers every year. Development of the artificial intelligence technologies and robotics components makes it possible even today to create robotic systems capable of performing standard operations at the human level in a wide variety of the operating conditions. The paper considers results of the work on creating technologies to control the anthropomorphic robotic systems. Technological layouts of robots, their composition and the structural and functional diagram of hardware implementation of the control technology are described. Distinctive features of the control technologies with and without the force-torque feedback are noted. Prospects of using the combined control technologies in the anthropomorphic robotic systems that could completely replace humans in all the areas of activity and

* Работа проведена в рамках научно-исследовательской работы «Разработка технологии создания комбинированной системы управления робототехническими комплексами» шифр «Спасатель», выполненной по договору № 5/011/2014-2016 от 23.05.2014 г. между Акционерным обществом «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» и Фондом перспективных исследований в период с 02.06.2014 по 31.10.2016.

performing operations in conditions hazardous to health and life are shown. Transfer of technologies and solutions to introduce robots in the chemical and nuclear industries, in performing work under conditions of radiation, chemical and biological contamination using the standard equipment and tools, as well as in space exploration, is proposed.

Keywords: humanoid robot, anthropomorphic robotic platform, technological model, robotic system, copy control, combined control

В настоящее время сфера деятельности человека, связанная с риском утраты здоровья и жизни, расширяется. Увеличивается вероятность техногенных аварий и катастроф. Зачастую спасатели, участвующие в ликвидации таких ситуаций, становятся жертвами, либо рискуют жизнями в случае повторного проявления бедствия. В таких условиях актуально уменьшить степень участия человека при проведении работ в условиях, опасных для жизни и здоровья, путем применения дистанционно-управляемых и автономных робототехнических комплексов.

Конструктивные особенности разрабатываемых робототехнических комплексов должны позволять выполнять промышленные и спасательные работы в инфраструктуре человека с использованием штатного оборудования и инструментов. Роботы должны иметь возможность свободно перемещаться в помещениях, предназначенных для человека, и по труднопроходимой местности.

Указанным условиям удовлетворяет класс антропоморфных (человекоподобных) роботов, который качественно отличается от промышленных роботов и требует разработки принци-

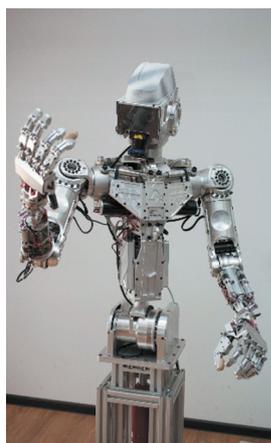
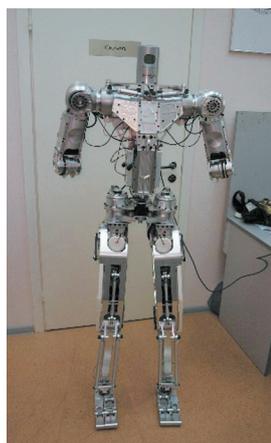
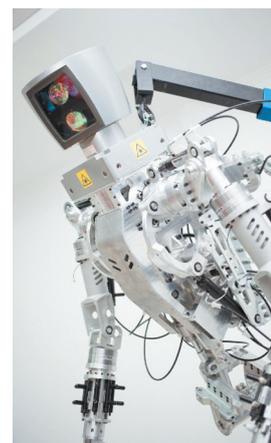
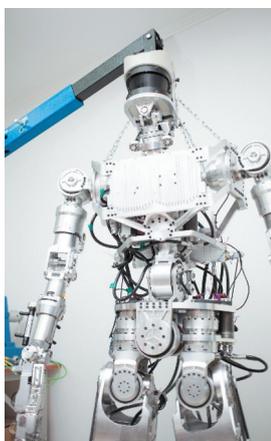
*a**б**в**г**д**е*

Рис. 1. Внешний вид ТМ № 1–6 (а–е)

пиально новых систем и технологий, их реализующих. Это обуславливает создание новых технологических решений, интегрированных в единый функциональный объект — антропоморфную робототехническую платформу (АРТП), которая способна выполнять действия, в значительной степени присущие только человеку.

В силу объективных и субъективных причин Российская Федерация имеет значительное отставание в создании антропоморфных роботов. В настоящее время значительные достижения в этой области принадлежат Японии (ASIMO, Honda [1]), США (Atlas, Boston Dynamics [2], Optimus, Tesla [3]), Германии (AILA, DLR [4]) и другим странам. При этом основные усилия направлены на создание антропоморфных роботов — многодвигательных рычажных механизмов с кинематической схемой, подобной скелету человека [5–7]. Это в значительной степени обусловлено необходимостью решать широкий комплекс научных и технических задач, имеющих связанный характер.

Цели и задачи разработки технологий управления АРТП. В 2014 г. Фондом перспективных исследований [8] организована научно-исследовательская работа «Разработка технологии создания комбинированной системы управления робототехническими комплексами» шифр «Спасатель». Исполнитель работ — АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника».

Цель работы — разработка технологии комбинированного управления робототехнической платформой на основе элементов сенсорики с обратными связями. Для достижения указанной цели решены следующие основные задачи:

- обоснование технических решений и характеристик АРТП с комбинированной системой дистанционного управления на основе элементов сенсорики с обратными связями;
- разработка технологии комбинированного управления АРТП, что позволяет считывать, передавать моторику и голос оператора для формирования команд управления;
- разработка сенсорной системы АРТП, обеспечивающей сбор и передачу данных от АРТП к оператору, реализацию эффекта присутствия для оператора;
- создание демонстрационного образца АРТП и проведение его испытаний.

На первом этапе НИР «Спасатель» разработаны и изготовлены технологические макеты (ТМ) АРТП № 1–6 (рис. 1), на которых проводили отработку и верификацию технологий комбинированного управления.

ТМ № 1–5, являющиеся антропоморфными, построены на модульном принципе. Манипуляторные модули имеют семь степеней подвижности с кинематическими характеристиками, аналогичными руке человека, и контролем нагрузок в соединении захватного устройства с манипулятором.

В ТМ № 1 введена дополнительная подвижность на каждый манипулятор. В ТМ № 2–5 выполнен ряд педипуляторных модулей с числом степеней подвижности от пяти до шести. Корпусные модули обладают двумя степенями подвижности. Захватные модули, реализующие групповой привод, имеют шесть степеней подвижности, а при применении индивидуальных приводов (ТМ № 5) — двенадцать.

ТМ № 6 — задающее устройство копирующего типа (ЗУКТ), предназначенное для отработки технологии копирующего режима управления АРТП и обеспечивающее регистрацию и передачу моторики оператора для формирования команд управления.

На втором этапе НИР «Спасатель» на основе созданных технологий и верификации для ТМ № 1–6 разработан демонстрационный образец робототехнического комплекса (ДО РТК), впоследствии получивший наименование «ФЕДОР». ДО РТК (рис. 2) способен работать в автономном режиме, осуществлять перемещение в пространстве, захватывать и выполнять дей-



Рис. 2. Внешний вид ДО РТК

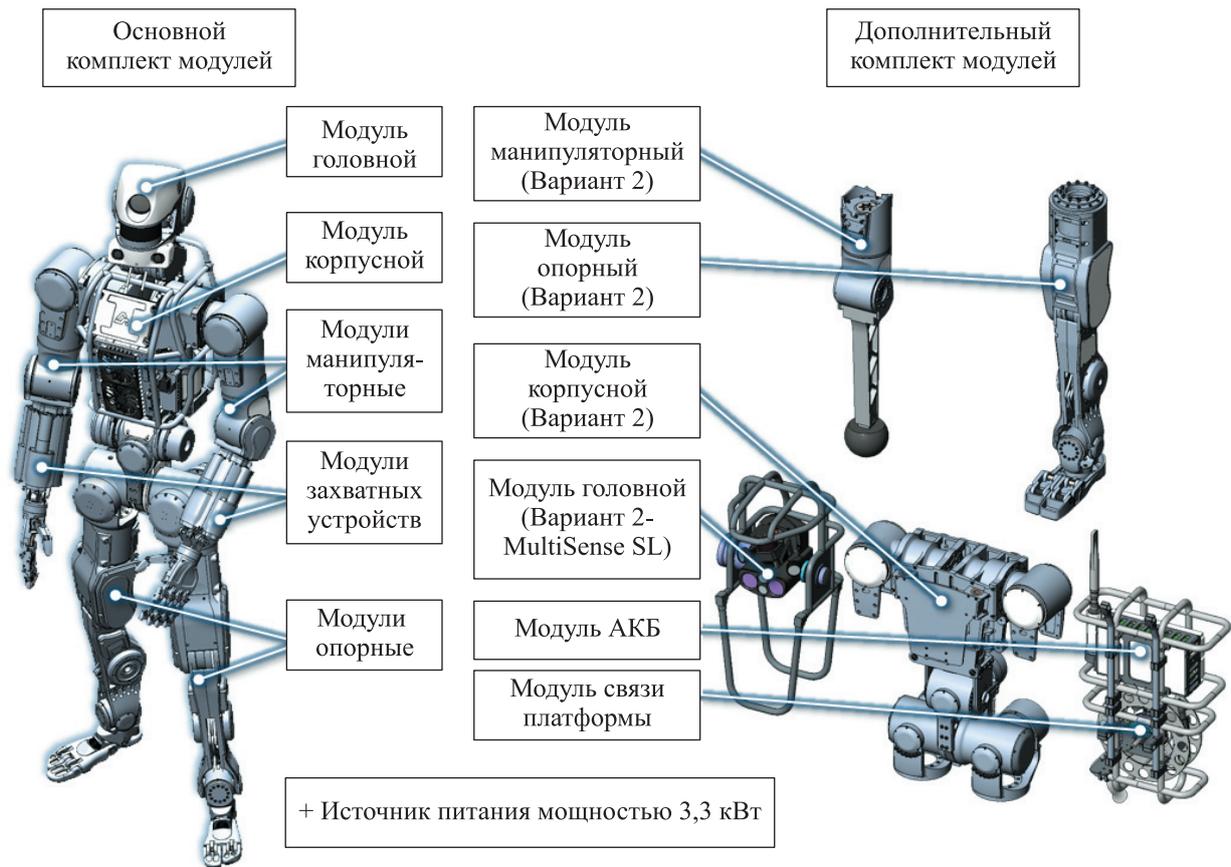


Рис. 3. Схема ДО РТК с модулями

ствия с внешними объектами, относящимся к инфраструктуре человека, в том числе со специальным инструментом.

ДО РТК является платформой модульной конструкции со сложной системой механизмов, включающей в себя элементы с десятками степеней подвижности, бесколлекторными электроприводными решениями и современными электронными компонентами. В состав ДО РТК входят манипуляторные, головной, корпусной и опорные модули, показанные на рис. 3.

Кинематические схемы модулей ДО РТК разработаны на основе аналогичных кинематических сочленений частей тела человека: корпуса, рук (манипуляторов), ног (педипуляторов), кистей (захватов), мозга (блока вычисления, контроля и управления). Число сосредоточенных степеней подвижности принято соответствующим человеку. Второстепенными степенями подвижности пренебрегали.

В качестве заданных кинематических параметров выбраны углы и скорости относитель-

ного поворота звеньев, характерные для человека во время активной нагрузки: бега, отжиманий и приседаний.

При разработке ДО РТК учтены следующие особенности:

- угол сгиба бедра по отношению к тазу до 110° ;
- подвижность шеи в фронтальной плоскости;
- подвижность в запястье $\pm 30^\circ$.
- подвижность в ключично-лопаточном узле $10...15^\circ$ в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Состав технологий комбинированного управления АРТП. По результатам первого этапа НИР «Спасатель» определены и отработаны базовые технологии регистрации моторики оператора, формирования мелкой моторики, создания силомоментной обратной связи (СМОС), телеприсутствия с дополненной реальностью, компенсации внешних воздействий на оператора и локальной навигации.

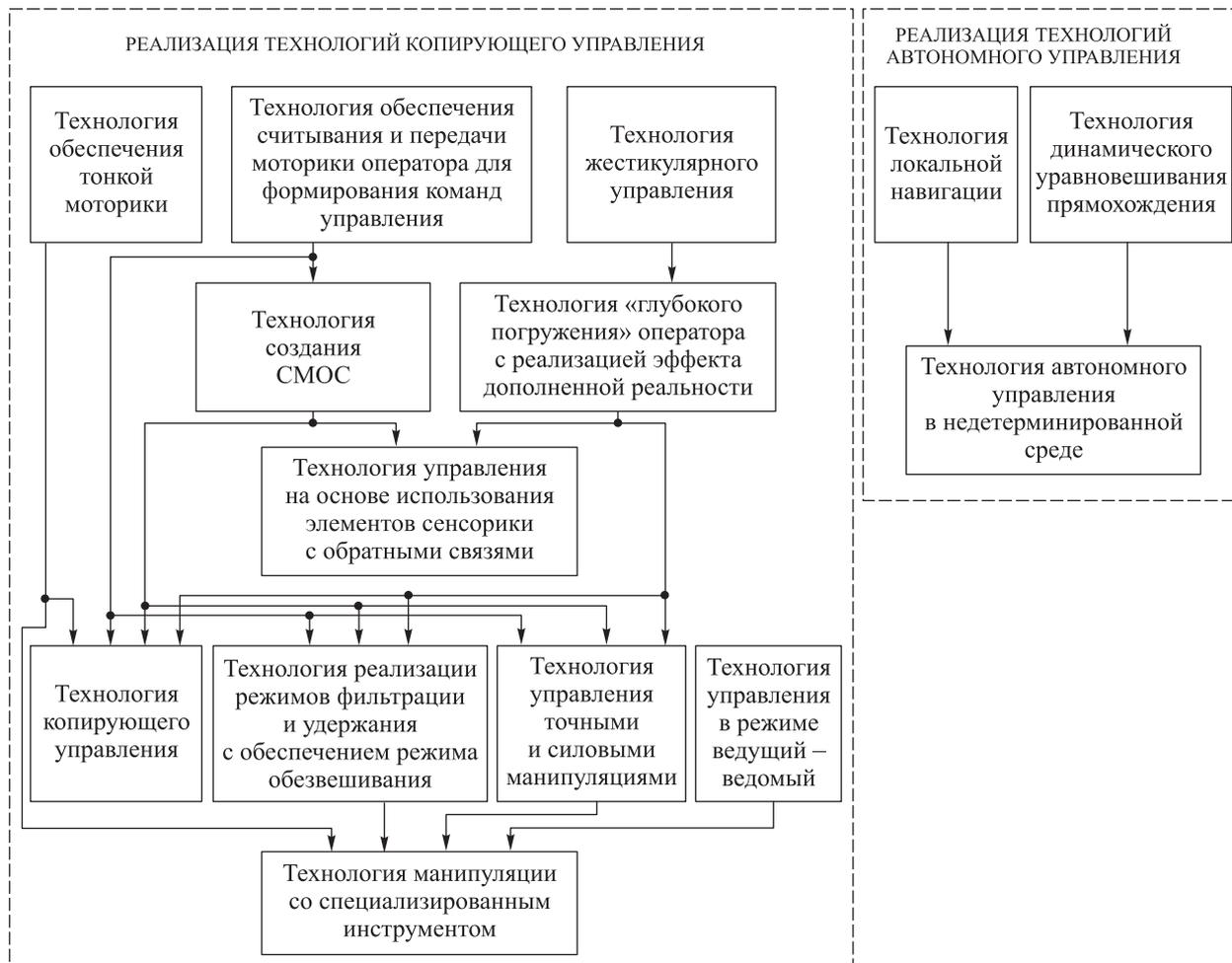


Рис. 4. Схема комбинированного управления АРТП

Базовые технологии стали основой для разработки комбинированного управления, взаимосвязь которых показана на рис. 4.

В рамках НИР «Спасатель» реализованы следующие основные технологии:

- обеспечения тонкой моторики;
- обеспечения считывания и передачи моторики оператора для формирования команд управления;
- создания СМОС;
- глубокого погружения оператора с реализацией эффекта дополненной реальности;
- жестикулярного управления;
- копирующего управления;
- манипуляции со специализированным инструментом;
- реализации режимов фильтрации и удержания с обеспечением режима обезвешивания;
- управления точными и силовыми манипуляциями;

- локальной навигации;
- динамического уравнивания прямохождения;
- автономного управления в недетерминированной среде;
- управления в режиме *ведущий* — *ведомый*;
- управления на основе элементов сенсорики с обратными связями.

Принципиально взаимосвязь технологий комбинированного управления АРТП, сформированная из отдельных субтехнологий, базируется на трех типах управления: автономном, супервизорном и копирующем. Комбинация копирующего управления верхней части (манипуляторов с захватами, торса, головного модуля) и автономного управления нижней части (педипуляторов) АРТП, является основополагающим элементом комбинированной системы управления.

Рассмотрим некоторые из основных технологий подробнее.

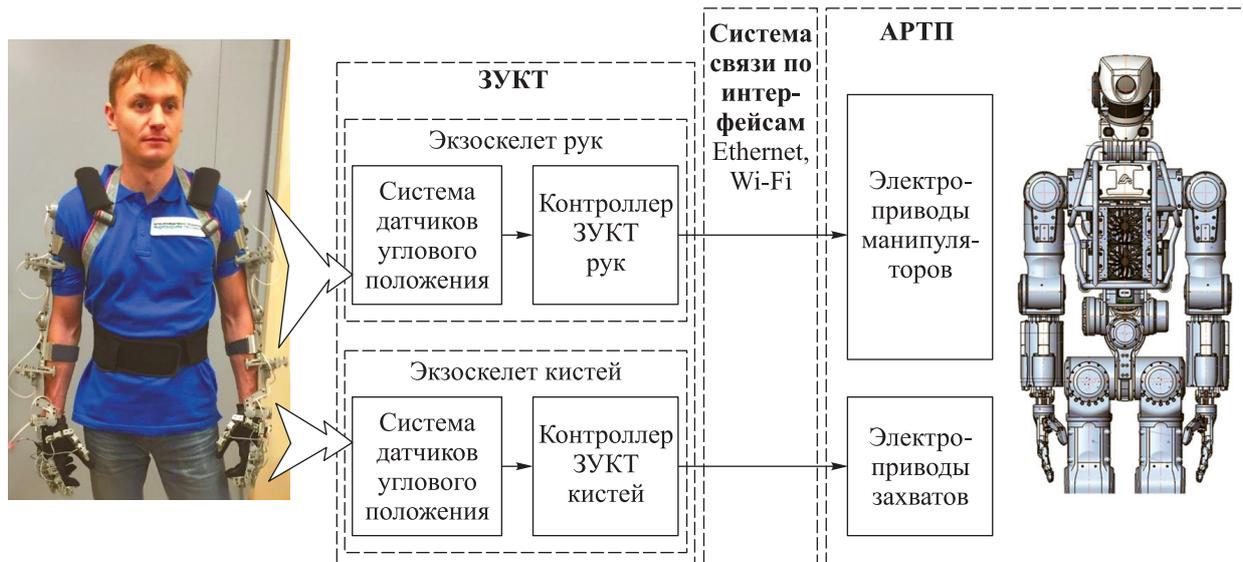


Рис. 5. Структурно-функциональная схема аппаратной реализации технологии обеспечения считывания и передачи моторики оператора для формирования команд управления

Технология обеспечения считывания и передачи моторики оператора для формирования команд управления дает возможность дистанционно управлять многозвенной АРТП одним оператором, выполняющим в процессе управления движения, которые АРТП повторяет (копирует). Структурно-функциональная схема аппаратной реализации этой технологии на ДО РТК приведена на рис. 5.

Эта технология включает в себя операции и процедуры, выполняемые в следующей последовательности:

- измерение углов поворота звеньев ЗУКТ руки оператора по семи степеням подвижности;
- измерение углов поворота звеньев ЗУКТ кистей оператора по двенадцати степеням подвижности;
- расчет моторики рук оператора через условные виртуальные поверхности по результатам измерений поворота звеньев ЗУКТ;
- расчет тонкой моторики оператора по результатам измерений поворота звеньев ЗУКТ кистей;
- формирование заданий углового положения для управления электроприводами многозвенных манипуляторов и захватных устройств АРТП;
- обработка заданий системами автоматического регулирования углового положения электроприводов многозвенных манипуляторов и захватных устройств АРТП.

В НИР «Спасатель» технологию отработывали на торсовой АРТП (ТМ № 1) и ДО РТК в процессе управления оператором с помощью ЗУКТ (ТМ № 6).

Технология создания СМОС в процессе дистанционного управления АРТП позволяет оператору контролировать и регулировать силовое взаимодействие модулей АРТП с внешними объектами, а также определять весовые характеристики и деформируемость объектов манипулирования.

Эта технология включает в себя операции и процедуры, выполняемые в следующей последовательности:

- считывание моторики оператора с помощью ЗУКТ с СМОС;
- формирование заданий углового положения электроприводам АРТП;
- отработка заданий системами автоматического регулирования электроприводов АРТП, во время которых измеряются крутящие моменты в шарнирах АРТП;
- обработка результатов измерений крутящих моментов;
- масштабирование крутящих моментов и формирование заданий для электроприводов ЗУКТ с СМОС;
- отработка заданий системами автоматического регулирования крутящего момента электроприводов ЗУКТ с СМОС.

В НИР «Спасатель» технологию создания СМОС отработывали на торсовой АРТП

(ТМ № 1) и ДО РТК в процессе управления оператором с помощью ЗУКТ (ТМ № 6) с СМОС. Структурно-функциональная схема аппаратной реализации технологии создания СМОС приведена на рис. 6.

Технология дистанционного копирующего управления с СМОС обеспечивает эффективное дистанционное управление АРТП путем создания эффекта присутствия оператора в рабочей зоне с позиции АРТП и возможностью контроля и регулирования оператором силового взаимодействия АРТП с внешними объектами.

Эта технология является элементом комбинированного управления, в которую включены субтехнологии регистрации моторики оператора, формирования тонкой моторики, создания СМОС и телеприсутствия с дополненной реальностью.

Технология дистанционного копирующего управления с СМОС включает в себя операции

и процедуры, выполняемые в следующей последовательности:

- распознавание речевых команд оператора и выбор режима управления АРТП;
- регистрация моторики рук и тонкой моторики кистей оператора с помощью ЗУКТ;
- регистрация углов поворота головы оператора;
- фильтрация нештатных команд по базе данных критериев нештатных команд и формирование заданий электроприводам АРТП;
- отработка заданий системами автоматического регулирования электроприводов АРТП, в процессе которой измеряются и обрабатываются крутящие моменты в шарнирах АРТП и формируются задания электроприводам ЗУКТ;
- отработка заданий системами автоматического регулирования электроприводов головного модуля АРТП, изменяющая угол зрения и масштаб наблюдаемой рабочей зоны;

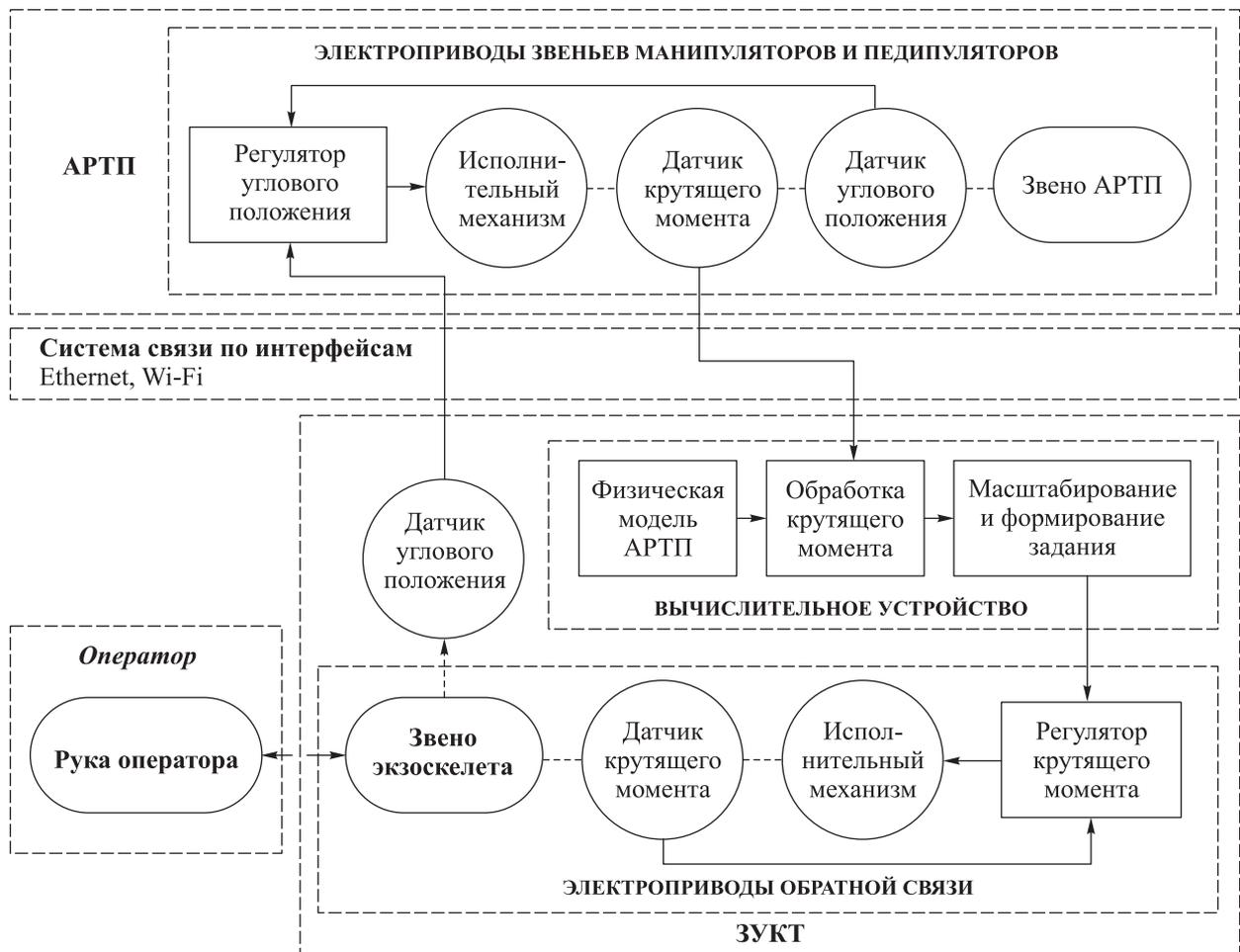


Рис. 6. Структурно-функциональная схема аппаратной реализации технологии создания СМОС

- передача стереоизображения рабочей зоны со стереокамеры головного модуля АРТП в вычислительное устройство, где формируется 3D-изображение рабочей зоны с наложенным 2D-изображением с телеметрической и служебной информацией;

- отображение на стереодисплее шлема виртуальной реальности 3D-изображения рабочей зоны с 2D-изображением, содержащим телеметрическую и служебную информацию;

- отработка заданий системами автоматического регулирования крутящего момента электроприводов ЗУКТ с СМОС.

В НИР «Спасатель» технологию дистанционного копирующего управления с СМОС отработывали на торсовой АРТП (ТМ № 1) и ДО РТК в процессе управления оператором с помощью ЗУКТ (ТМ № 6) с СМОС. Структурно-функциональная схема реализации этой технологии приведена на рис. 7.

Использование технологии дистанционного копирующего управления с СМОС обеспечило получение технической характеристики ДО РТК, приведенной ниже.

Техническая характеристика при использовании технологии дистанционного копирующего управления с СМОС

Время цикла управления в копирующем режиме, мс	40
Абсолютная ошибка копирования, град:	
моторики оператора	0,8
тонкой моторики оператора	0,5
Абсолютная ошибка регистрации и повторения внешнего силового воздействия на оператора, Н·м	0,1
Рассогласование углов поворота шлема виртуальной реальности и головного модуля, град	1,2
Эффективный угол обзора рабочей зоны оператором, град:	
по горизонтали	90
по вертикали	85
Вероятность распознавания голосовых команд, %	Не менее 97

Технология динамического уравнивания прямохождения обеспечивает прямохождение АРТП при неопределенном рельефе местности и физических свойствах поверхности за счет динамического уравнивания, компенсирует внешние воздействия на АРТП (толчки, удары, столкновения с препятствиями) выполне-

нием балансирующих движений и гарантирует безопасное падение АРТП с группировкой модулей для минимизации ущерба.

Эта технология включает в себя операции и процедуры, реализуемые в следующей последовательности:

- создание базы данных выполнения прямохождения, типовых движений для удержания равновесия и безопасного падения путем моделирования прямохождения АРТП в симуляторе;

- начало движений звеньев, реализующих прямохождение;

- измерение угловых скоростей и линейных ускорений корпуса и таза АРТП по осям X, Y, Z инерциальной системой датчиков;

- измерение сил, действующих на опоры АРТП;

- цифровая фильтрация данных инерциальной системы и силомоментных датчиков;

- расчет векторов угловых скоростей линейных ускорений корпуса и таза АРТП;

- расчет векторов сил, действующих на опоры АРТП;

- расчет отклонений векторов угловых скоростей, линейных ускорений корпуса и таза, сил, действующих на опоры, приводящих к потере равновесия АРТП;

- корректировка угловых перемещений звеньев педипуляторов и манипуляторов АРТП, если нет критических отклонений;

- расчет угловых перемещений звеньев педипуляторов и манипуляторов АРТП, если выявлены критические отклонения и выбраны типовые движения для удержания равновесия;

- выбор типовых движений для безопасного падения и расчет угловых перемещений звеньев педипуляторов и манипуляторов АРТП, если выявлены критические отклонения и не выбраны типовые движения для удержания равновесия;

- формирование команд управления электроприводами педипуляторов и манипуляторов АРТП для динамического уравнивания и выполнения прямохождения;

- передача команд вычислительным устройством и прием контроллерами электроприводов АРТП по интерфейсу Ethernet;

- начало движения звеньев АРТП на заданный угол с заданным крутящим моментом для динамического уравнивания и прямохождения.

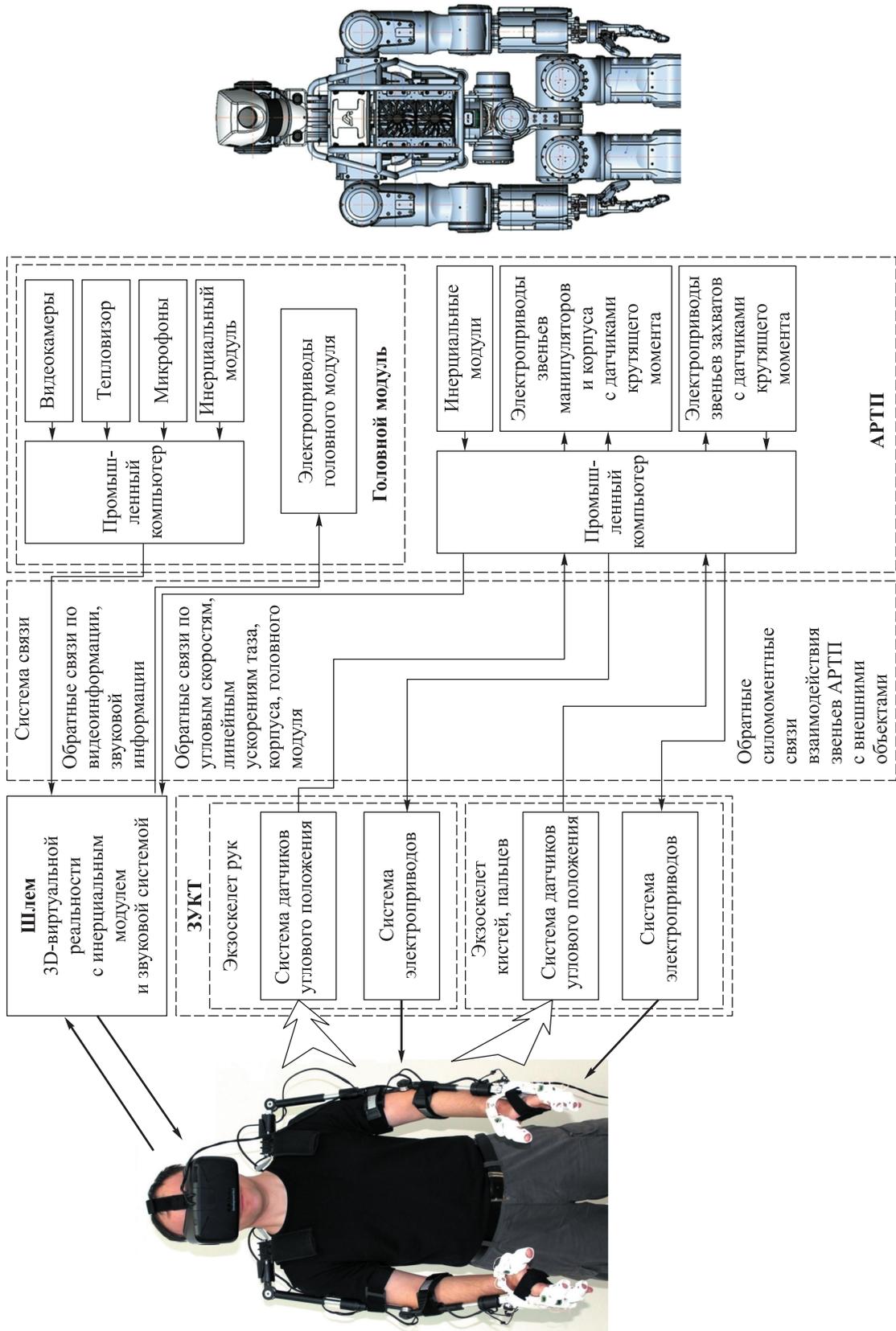


Рис. 7. Структурно-функциональная схема аппаратной реализации технологии дистанционного копирующего управления с СМОС

В НИР «Спасатель» технологию динамического уравнивания прямохождения по неподготовленной поверхности отрабатывали на ТМ № 4 и ДО РТК. Структурно-функциональная схема аппаратной реализации этой технологии приведена на рис. 8.

Использование технологии динамического уравнивания прямохождения обеспечило получение технической характеристики ДО РТК, приведенной ниже.

**Техническая характеристика ДО РТК
при использовании технологии динамического
уравнивания прямохождения
по неподготовленной поверхности**

Время цикла управления при динамическом уравнивании АРТП в процессе прямохождения, мс	35
Ошибка регулирования углового положения звеньев педи- и манипуляторов, град . . .	0,1
Максимальная скорость прямохождения, км/ч . . .	4

Сведения о применении технологий комбинированного управления АРТП. Технологии комбинированного управления АРТП нашли применение в различных отраслях промышленности:

- в составной части (СЧ) НИР «Разработка и создание универсального компьютерного стенда робототехнических систем» шифр «УКС РТС»; заказчик — ФГБУ «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина» (2016 г.); следует отметить, что ТМ № 1 и ДО РТК переданы Фондом перспективных исследований в ГК «Роскосмос» и являются составной частью УКС РТС [9–11];

- в СЧ опытно-конструкторской работы (ОКР) «Модернизация программного комплекса с задающим устройством (экзоскелетом) с СМОС и возможностью работы при наличии временных задержек. Экспериментальные исследования по управлению удаленным антропоморфным роботом с учетом наличия различных временных задержек» шифр «Пастораль-Аватар-2017» (2017 г.); заказчик — ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» [12], ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» [13];

- в СЧ НИР «Моделирование захвата антропоморфного робота для проведения оговоренных операций, которые выполняет космонавт с использованием перчатки скафандра. Экспери-

ментальные исследования эффективности захвата» шифр «Пастораль-Захват-АТ-2018» (2018 г.); заказчик — ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» [12]; ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» [13];

- в СЧ НИР «Подготовка антропоморфной робототехнической системы к доставке на корабле «Союз МС-14» зав. № 743» шифр «Испытатель» (2019 г.); заказчик — ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» [13];

- в СЧ ОКР «Мобильный роботизированный манипулятор для работы в сильных радиационных полях» шифр «Каньон»; заказчик — ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО» (2016 г.); целью работы являлась разработка и исследование функционирования опытного образца мобильного роботизированного манипулятора с дистанционным управлением для работы в зоне действия радиационных полей с уровнем до 100 мЗв/ч.

Перспективы использования технологий комбинированного управления АРТП. В перспективе эти технологии обеспечат создание дистанционно управляемых антропоморфных робототехнических комплексов, которые смогут полностью заменить человека во всех сферах деятельности при выполнении работ в опасных для здоровья и жизни условиях. АРТП найдут применение в химической и атомной промышленности при выполнении работ в условиях радиационного, химического и биологического заражений с применением штатного оборудования и инструментов.

Технологии дистанционного копирующего управления с СМОС и выполнения работ с общим и специализированным инструментами планируются к внедрению в антропоморфных робототехнических комплексах космического назначения для внутри- и внекорабельной деятельности в рамках СЧ ОКР «Система антропоморфная робототехническая» шифр «Теледроид» [14] и в перспективе для выполнения работ на лунной орбитальной станции и поверхности Луны [15].

На основе технологий прямохождения по неподготовленной поверхности и автономного перемещения в недетерминированной среде будут созданы АРТП, выполняющие работы с высокой степенью автономности и свободно перемещающиеся в помещениях, предназначенных для человека по труднопроходимой

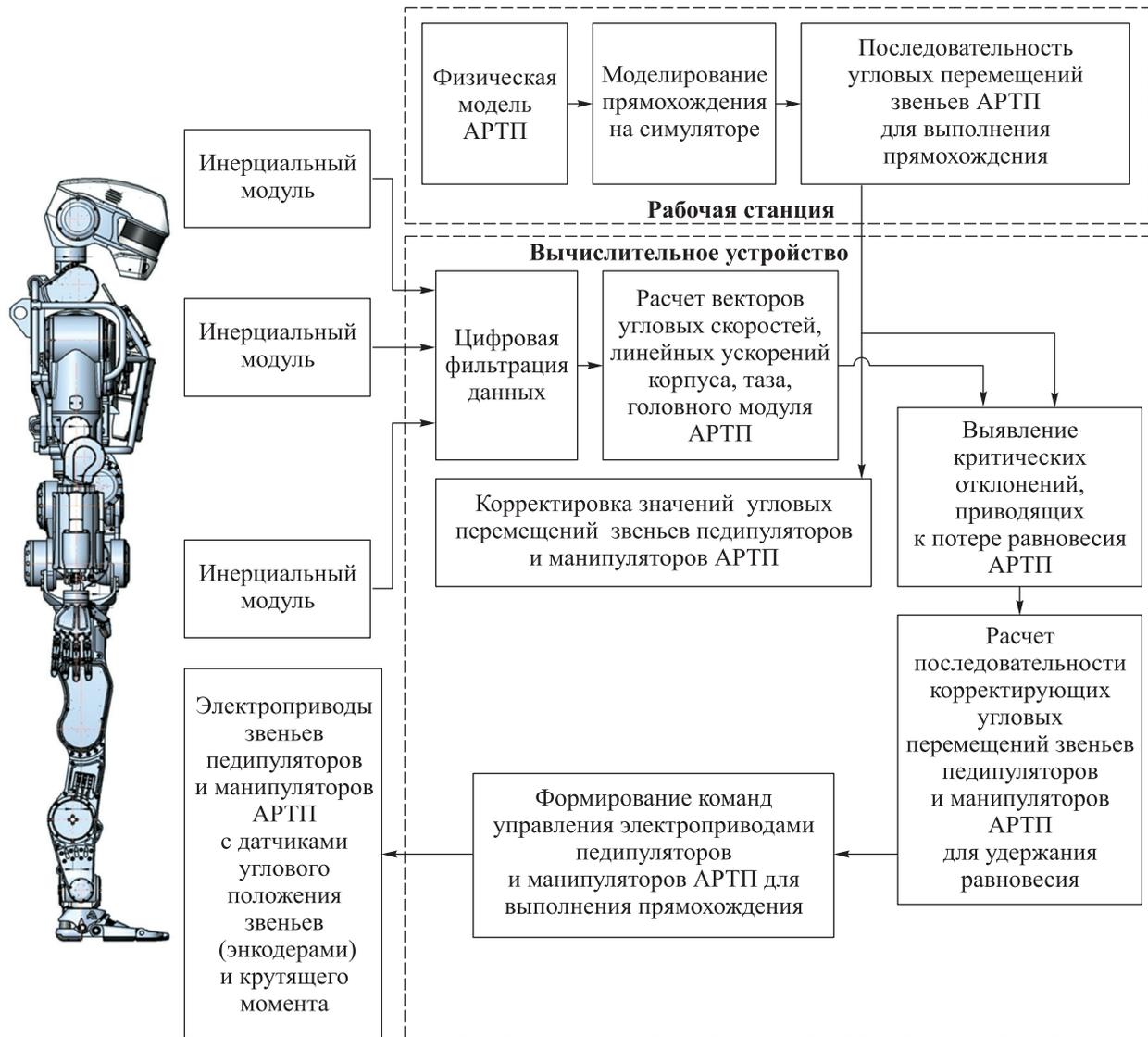


Рис. 8. Структурно-функциональная схема аппаратной реализации технологии динамического уравнивания прямохождения по неподготовленной поверхности

местности и в перспективе по поверхности других планет и спутников.

Выводы

1. Основные цели создания антропоморфных роботов заключаются в содействии человеку при выполнении работ особой сложности или в особых условиях, где нахождение человека ограничено по времени, либо совсем невозможно. При этом требуется применять функционал схожий с таковым работы рук и кистей человека.

2. В России до 2006 г. практически отсутствовали разработки в области антропоморфных роботов. Некоторые технологические коллекти-

вы вузов страны предпринимали попытки создания роботов без видимого результата и прогресса. В 2014 г. предпринята осмысленная попытка выполнения научно-технического исследования по созданию технологий антропоморфной робототехники в рамках проекта «Спасатель» Фонда перспективных исследований.

3. Успешные манипуляции АРТП с различными объектами (переключателями, ключами, дверными ручками, ручным инструментом и т. п.) становятся возможными при применении технологий тонкой моторики в захватном устройстве и не менее пяти доступных ориентирующих движений манипулятора, что соответствует захватным устройствам ТМ № 1 и ДО РТК. Такие захваты развивают малое усилие на

объект взаимодействия и требуют высокого уровня планирования траектории перемещения, что может обеспечить только ЗУКТ с СМОС.

4. Системы управления роботами с использованием ЗУКТ с СМОС имеют большие перспективы применения. ЗУКТ с СМОС позволяет передавать оператору тактильные ощущения, возникающие при взаимодействии с предметами и инструментами, вносить корректировки в его движения с учетом имеющихся временных задержек, обеспечивая управление удаленным роботом с высокой точностью.

5. Принимая во внимание перспективы расширения сферы внедрения систем управления АРТС с использованием ЗУКТ с СМОС для управления роботом на значительно удаленные расстояния с Земли на международную космическую станцию или Луну, необходимо ставить задачи, учитывающие эргономические параметры оператора, объектов манипулирования и пространства в системе *человек — робот — среда*. Таким образом, управление удаленным роботом станет более точным и будет учитывать особенности передачи сигнала.

Литература

- [1] Lemburg J., Gea Fernandez J., Eich M. et al. AILA — design of an autonomous mobile dual-arm robot. *IEEE ICRA*, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979775>
- [2] Kuindersma S., Deits R., Fallon M. et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. *Auton. Robots*, 2015, vol. 40, no. 3, pp. 429–455, doi: <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9479-3>
- [3] Chestnutt J., Lau M., Cheung G. et al. Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid. *IEEE ICRA*, 2005, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570188>
- [4] Friz A.P. Applying the TAII framework on tesla bot, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22323.96801>
- [5] Арасланов М.С. Разработка программно-аппаратного комплекса управления антропоморфным роботом. *Решетневские чтения*, 2016, т. 1, с. 390–393.
- [6] Лесков А.Г., Бажинова К.В., Селиверстова Е.В. Описание кинематики антропоморфных роботов методом блочных матриц. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2018, № 6, с. 102–111, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-102-111>
- [7] Авдонин К.А., Авдонин А., Захаров О.В. Анализ движения антропоморфных роботов. *Динамика сложных сетей и их применение в интеллектуальной робототехнике. Сб. мат. I меж. школы-конф. молодых ученых*. Саратов, Научная книга, 2017, с. 15–16.
- [8] Григорьев А.И. О деятельности Фонда перспективных исследований (опыт и достигнутые результаты). *Известия РАН*, 2020, № 3, с. 46–54.
- [9] Дикарев В.А., Симбаев А.Н., Кикина А.Ю. и др. Проблема обеспечения соответствия кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств антропоморфных робототехнических систем для перспективных пилотируемых космических программ. *Пилотируемые полеты в космос*, 2022, № 4, с. 54–71.
- [10] Дудоров Е.А. Имитационно-моделирующие программно-аппаратные комплексы тренировки операторов робототехнических комплексов. *Пилотируемые полеты в космос. Мат. XIV Межд. науч.-практ. конф. Звездный городок, НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина*, 2021, с. 35.
- [11] Дудоров Е.А. Имитационно-моделирующий стенд эргономического сопровождения робототехнических систем космического назначения. *МКПУ-2021*. Т. 1. Ростов-на-Дону, ЮФУ, 2021, с. 132–134.
- [12] Дудоров Е.А. Разработка алгоритмов управления движением робота с учетом временной задержки. *Перспективные системы и задачи управления. Мат. XVI Всерос. науч.-практ. конф. и XII молодежной школы-семинара*. Ростов-на-Дону, ИП Марук М.Р., 2021, с. 265–270.
- [13] Пермяков А.Ф., Дудоров Е.А., Сохин И.Г. и др. Подготовка и проведение космического эксперимента с применением антропоморфного робота «Федор». *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*, 2020, № 3, с. 64–72.
- [14] Дудоров Е.А. Робототехнические системы космического назначения. *Космическая техника и технологии*, 2022, № 3, с. 66–81.

- [15] Дудоров Е.А., Сохин И.Г. Предназначение и задачи робототехнических систем в российской лунной программе. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 12, с. 3–15, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-12-3-15>

References

- [1] Lemburg J., Gea Fernandez J., Eich M. et al. AILA — design of an autonomous mobile dual-arm robot. *IEEE ICRA*, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979775>
- [2] Kuindersma S., Deits R., Fallon M. et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. *Auton. Robots*, 2015, vol. 40, no. 3, pp. 429–455, doi: <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9479-3>
- [3] Chestnutt J., Lau M., Cheung G. et al. Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid. *IEEE ICRA*, 2005, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570188>
- [4] Friz A.P. Applying the TAI framework on tesla bot, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22323.96801>
- [5] Araslanov M.S. Development of the hardware and software for anthropomorphic robot control system. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2016, vol. 1, pp. 390–393. (In Russ.).
- [6] Leskov A.G., Bazhinova K.V., Seliverstova E.V. Kinematic description of humanoid robots using method of block matrices. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 6, pp. 102–111, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-102-111> (in Russ.).
- [7] Avdonin K.A., Avdonin A., Zakharov O.V. [Motion analysis of anthropomorphic robots.]. *Dinamika slozhnykh setey i ikh primeneniye v intellektualnoy robototekhnike. Sb. mat. I mezh. shkoly-konf. molodykh uchenykh* [Dynamics of Complex Networks and their Application to Intelligent Robotics. Proc. I Int. School-Conf. of Young Scientists]. Saratov, Nauchnaya kniga Publ., 2017, pp. 15–16. (In Russ.).
- [8] Grigoryev A.I. On the matter of the advanced research foundation activities (experience and results obtained). *Izvestiya RARAN*, 2020, no. 3, pp. 46–54. (In Russ.).
- [9] Dikarev V.A., Simbaev A.N., Kikina A.Yu. et al. Problem of matching kinematic characteristics of actuators and tasking devices of anthropomorphic robotic systems for advanced manned space programs. *Pilotiruemye polety v kosmos*, 2022, no. 4, pp. 54–71. (In Russ.).
- [10] Dudorov E.A. [Simulation and simulation software and hardware complexes for training of robotic complex operators]. *Pilotiruemye polety v kosmos. Mat. XIV Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Manned Missions in Space. Mat. XIV Int. Sci.-Pract. Conf.]. Zvezdnyy gorodok, NII TsPK im. Yu.A. Gagarina Publ., 2021, p. 35. (In Russ.).
- [11] Dudorov E.A. [Simulation and simulation stand for ergonomic support of space robotic systems.]. *MKPU-2021. T. 1* [MKPU-2021. Vol. 1]. Rostov-na-Donu, YuFU Publ., 2021, pp. 132–134. (In Russ.).
- [12] Dudorov E.A. [Development of algorithms for control of the robot movement with the consideration of the time delay]. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya. Mat. XVI Vseros. nauch.-prakt. konf. i XII molodezhnoy shkoly-seminara* [Perspective systems and control problems. Proc. XVI Rus. Conf. and XII Youth School-Seminar]. Rostov-na-Donu, IP Maruk M.R., 2021, pp. 265–270. (In Russ.).
- [13] Permyakov A.F., Dudorov E.A., Sokhin I.G. et al. Preparing and performing a space experiment with use of the anthropomorphic robot "Fedor". *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences], 2020, no. 3, pp. 64–72. (In Russ.).
- [14] Dudorov E.A. Robotic systems for space purposes. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space Technique and Technologies], 2022, no. 3, pp. 66–81. (In Russ.).
- [15] Dudorov E.A., Sokhin I.G. The purpose and tasks of robotic systems in the Russian lunar program. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 12, pp. 3–15, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-12-3-15> (in Russ.).

Информация об авторе

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

Information about the author

DUDOROV Evgeniy Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Metal Forming Machines and Technologies. Nosov Magnitogorsk State Technical University; recipient of the Award of the Russian Federation in the field of science and technology, Executive Director. JSC Scientific and Production Association Android Technics (109518, Moscow, Russian Federation, Grayvoronovskaya St., Bldg. 23, e-mail: dudorov@npo-at.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дудоров Е.А. Технологии системы управления антропоморфными робототехническими платформами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 12, с. 49–62, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-49-62

Please cite this article in English as:

Dudorov E.A. Technology of the anthropomorphic robotic complex control system. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 12, pp. 49–62, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-49-62



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебник В.В. Девяткова «Системы искусственного интеллекта»

Исследованы системы искусственного интеллекта как сообщества рассуждающих агентов. Каждый агент имеет возможность восприятия состояния среды, в которой он находится, и воздействия на нее с помощью реакций, вырабатываемых в результате осуществляемого им рассуждения в том или ином исчислении, на языке которого представляются знания агента. Создание системы искусственного интеллекта рассматривается как задача построения процедур такого рассуждения.

Для студентов и аспирантов вузов, обучающихся по специальностям «Информационные системы и технологии» и «Автоматизированные системы обработки информации и управления» по направлениям подготовки «Информационные системы» и «Информатика и вычислительная техника».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>