

УДК 621.865.8, 623.445

## Состояние и тенденции развития антропоморфной робототехники

Хурс С. П.<sup>1</sup>, Верейкин А. А.<sup>2,\*</sup>

[\\* aautres@gmail.com](mailto:aautres@gmail.com)

<sup>1</sup>Фонд перспективных исследований, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Представлены некоторые актуальные разработки в области антропоморфной робототехники: роботизированные экзоскелеты, андроидные платформы, аватары, андроиды. Выделены ключевые подсистемы современных робототехнических систем. Указаны основные проблемы, встающие на пути создания современной антропоморфной робототехники. Рассмотрены основные задачи и функции системы управления антропоморфной платформы. Особое внимание уделено энергетической подсистеме, развитие которой является делом первоочередной необходимости с позиции увеличения автономности подвижных робототехнических систем. Представлены некоторые аспекты сенсорной системы. Рассмотрены вопросы построения систем управления, в том числе и с элементами искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** антропоморфная робототехника, экзоскелет, андроид, андроидная платформа, аватар, солдат будущего, система управления, энергетическая подсистема, искусственный интеллект

---

### Введение

Осознанный и правильный выбор направлений развития разрабатываемой техники невозможен без анализа текущего её состояния. Именно поэтому настоящая работа ставит своей целью охарактеризовать состояние и тенденции развития антропоморфной робототехники, созданию которой уделяется огромное внимание в современном мире. Необходимо рассмотреть ключевые направления развития и выделить наиболее важные подсистемы в составе средств антропоморфной робототехники, которые затем следует подвергнуть анализу с целью выявления основных проблем, с которыми сталкиваются разработчики антропоморфных роботов.

## 1. Диверсифицируемые направления робототехники

**1. Экзоскелет (роботизированный).** Костюм для разгрузки скелета и мягких тканей, защита (броня), машина с сенсорным управлением. Считывает, поддерживает, воспроизводит и увеличивает мускульные действия человека. Система сенсоров и приводы исполнительных механизмов охватывают тело оператора. Оператор присутствует на месте событий.

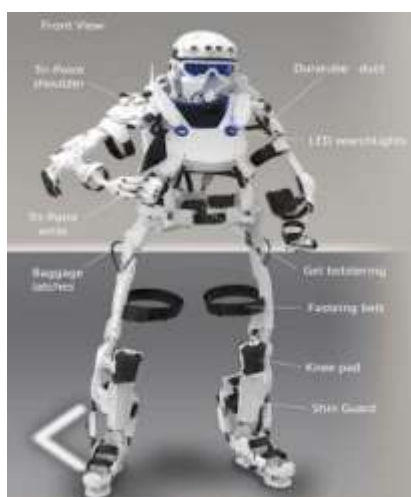
На рис. 1 представлен один из наиболее передовых на сегодняшний день демонстрационных образцов экзоскелетов, неавтономный экзоскелет нижних и верхних конечностей XOS 2, разработанный корпорацией Raytheon (США) [1]. На рис. 2 показан автономный экзоскелет нижних конечностей HULC, разработка которого ведётся в данный момент корпорацией Lockheed Martin (США) [2].



**Рис. 1.** XOS 2, Raytheon, США



**Рис. 2.** HULC, Lockheed Martin, США



**Рис. 3.** Perseus – MEA, Rhadamanthys Systems, США



**Рис. 4.** Перспективная разработка экзоскелета МГТУ им. Н.Э. Баумана

Проект HULC является, по сути, новейшим поколением модели BLEEX [3, 4] Концептуальная разработка экзоскелета Perseus – MEA, Rhadamanthys Systems (США) показана на рис. 3 [5]. На рис. 4 представлена перспективная разработка экзоскелета МГТУ им. Н.Э. Баумана [6-10], в настоящее время ведутся исследования, направленные на создание автономного экзоскелета нижних и верхних конечностей капсульного типа [11-13].

**2. Андроидная платформа с системой управления копирующего типа.** Сенсорная система управления одета на оператора и отделена от объекта управления – робототехнической платформы. Используется интеллект человека в копирующем режиме. Обратные связи создают “эффект присутствия”.

Задающее устройство УКТ-3 [14] для роботизированной платформы копирующего типа, разработанное НПО “Андроидная техника” (РФ), представлено на рис. 5. На рис. 6 показан экзоскелет-перчатка EchoHand разработки Festo (Германия) [15].



**Рис. 5.** Задающее устройство копирующего типа, НПО “Андроидная техника”



**Рис. 6.** Экзоскелет-перчатка EchoHand, Festo, Германия

**3. Андроидная платформа с системой управления комбинированного типа** (рис. 7). Внешняя сенсорная система управления сочетается с бортовой частично автономной системой управления платформы. Некоторые функции автоматизированы, применяются супервизорный и автономный режимы управления в сочетании с копирующим.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 7. Андроидная платформа с системой управления комбинированного типа

4. *Аватар* представляет из себя искусственную, максимально приближенную к живым организмам платформу, управляемую нервной системой и мозгом человека с эффектом “полного погружения” на основе обратных связей, охватывающих все органы чувств.

На рис. 8 и 9 представлены прототипы Repliee Q1 и Repliee Q2 [16, 17], разработанные в лаборатории разумной робототехники университета Осаки (Япония) профессором Хироси Исигуро (Hiroshi Ishiguro). Версия Q2 отличается от Q1 большей человекоподобностью, и, в частности, более полным отображением эмоций, что достигается за счёт 12 степеней подвижности в голове робота. Отечественный робот Алиса (рис. 10), разработанный компанией Нейроботикс, передаёт эмоции посредством 19 сервоприводов, размещённых в голове [18]. Робот HRP-4C компании AIST (Япония) [19, 20] показан на рис. 11. Робот-манекен (рис. 12) [21, 22], разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана, вкпе с копирующей установкой (рис. 13), позволит реализовать дистанционное управление в копирующем режиме.



**Рис. 8.** Repliee Q1, лаборатория разумной робототехники  
Осакского университета, Япония



**Рис. 9.** Repliee Q2, лаборатория  
разумной робототехники Осакского  
университета, Япония



**Рис. 10.** Алиса, компания Нейроботикс, Зеленоград, Россия



**Рис. 11.** HRP-4C, компания AIST,  
Япония



**Рис. 12.** Робот-манекен, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия



**Рис. 13.** Перспективная разработка  
копирующей установки, МГТУ им.  
Н.Э. Баумана, Россия

5. **Андроид** – робот с автономной системой управления, основанной на реализации искусственного интеллекта. Роль человека преимущественно заключается в постановке задач, получении отчётов, частичном контроле и разрешении применения подконтрольных функций и средств.

Среди наиболее заметных мировых разработок в области роботов-андроидов необходимо отметить NAO (Aldebaran Robotics, Франция) [23-25], рис. 14, Asimo (Honda, Япония) [26], рис. 15, PETMAN (Boston Dynamics, США) [27], рис. 16, SAR-400 (рис. 17) и AR-600 (рис. 18) (НПО “Андроидная техника”, Россия) [28, 29], THOR (Политехнический университет Виргинии, США) [30-32], рис. 19, Atlas (Boston Dynamics, США) [33-35], рис. 20, Robonaut 2 (NASA, DARPA, США) [36], рис. 21. Заслуживает внимания также двуногий шагающий робот (рис. 22), разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана [37-40].



Рис. 14. NAO, Aldebaran Robotics, Франция



Рис. 15. Asimo, Honda, Япония



Рис. 16. PETMAN, Boston Dynamics, США



Рис. 17. SAR-400, НПО “Андроидная техника”,  
Россия



Рис. 18. AR-600, НПО “Андроидная техника”



Рис. 19. THOR, Политехнический университет  
Виргинии, США



Рис. 20. Atlas, Boston Dynamics, США



Рис. 21. Robonaut 2, NASA, DARPA, США



Рис. 22. Двуногий шагающий робот, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия

## 2. Ключевые подсистемы робототехнической платформы

### 1. Средства очувствления роботизированной системы – сенсорная система

#### 1.1. Техническое зрение.

1.1.1. Видимый оптический диапазон.

1.1.2. Ультрафиолетовый диапазон.

1.1.3. Инфракрасный диапазон.

1.1.4. Радиолокационный диапазон.

1.1.5. ЛИДАР.

#### 1.2. Технический многоканальный слух.

1.2.1. Звуковой диапазон.

1.2.2. Инфразвуковой диапазон.

1.2.3. Ультразвуковой диапазон.

1.2.4. Определение направления на источник звука.

1.2.5. Выделение одного источника из многих и слежение за ним.

#### 1.3. Тактильные сенсоры.

1.3.1. Симуляция тактильных ощущений.

1.3.2. Симуляция тепловых ощущений.

1.3.3. Симуляция влажностных ощущений.

- 1.4. Силовой моментная обратная связь.
  - 1.4.1. Симуляция сосредоточенных сил.
  - 1.4.2. Симуляция моментов.
- 1.5. Техническое обоняние.
  - 1.5.1. Симуляция запахов.
- 1.6. Специализированные сенсоры.
  - 1.6.1. Система индикации отравляющих, биологических и радиоактивных веществ.

## **2. Средства самодиагностики, безопасности и назначения приоритетов.**

- 2.1. Диагностика.
  - 2.1.1. Работоспособность.
  - 2.1.2. Запас энергии (ресурсы).
  - 2.1.3. Повреждения.
- 2.2. Безопасность.
  - 2.2.1. Относительно людей.
  - 2.2.2. Относительно машин.
  - 2.2.3. Относительно среды.
- 2.3. Приоритеты.
  - 2.3.1. Приоритеты миссий.
  - 2.3.2. Приоритеты безопасности.
  - 2.3.3. Приоритеты функционала.
- 2.4. Рефлекторное управление.
  - 2.4.1. Защита сенсоров.
  - 2.4.2. Защита конечностей.
  - 2.4.3. Защита приводов.

## **3. Энергетическая подсистема.**

- 3.1. Бортовая энергетическая система.
  - 3.1.1. Аккумуляторы.
  - 3.1.2. Топливные элементы.
  - 3.1.3. Рекуператоры энергии.
  - 3.1.4. Внешние генераторы тока.
  - 3.1.5. ДВС-генераторы тока.
  - 3.1.6. Ядерные генераторы тока.
- 3.2. Внешняя энергетическая система.
  - 3.2.1. Стационарные источники тока.
  - 3.2.2. Мобильные источники тока.
  - 3.2.3. Сменные картриджи топливных элементов.
  - 3.2.4. Топливные ёмкости.
  - 3.2.5. Переносные источники газа.

#### **4. Информационно-вычислительный комплекс.**

- 4.1. Интегрированная система обработки данных.
  - 4.1.1. Центральный процессор.
  - 4.1.2. Специализированные вычислители.
  - 4.1.3. Интерфейс дистанционного управления.
- 4.2. Пространственная ориентация.
  - 4.2.1. Электронный компас.
  - 4.2.2. ГЛОНАСС, GPS.
  - 4.2.3. Инерциальная система.
  - 4.2.4. Датчики естественной ориентации.
  - 4.2.5. Система построения 3D модели среды.
- 4.3. Связь, сеть.
  - 4.3.1. Цифровая многодиапазонная радиостанция/речь, радиомодем/данные.
  - 4.3.2. Оптические каналы передачи видео- и аудиопотоков.
  - 4.3.3. Кабельные каналы.
  - 4.3.4. Голосовой интерфейс.
- 4.4. Программное обеспечение.
  - 4.4.1. Алгоритмы распознавания визуальных образов.
  - 4.4.2. Алгоритмы распознавания аудио образов.
  - 4.4.3. Алгоритмы распознавания тактильных образов.
  - 4.4.4. Алгоритмы распознавания запахов.
  - 4.4.5. Алгоритмы распознавания отравляющих, биологических и радиоактивных веществ.
- 4.5. Библиотеки.
  - 4.5.1. Стандартных (типовых) движений.
  - 4.5.2. Стандартных (типовых) звуков.
  - 4.5.3. Стандартных (типовых) запахов.
  - 4.5.4. Стандартных (типовых) 2D и 3D образов.
  - 4.5.5. Признаков веществ.
- 4.6. Автономное управление.
  - 4.6.1. Контроль кинематического и динамического состояния.
  - 4.6.2. Управление походкой и устойчивостью.
- 4.7. Система амортизации и демпфирования.
- 4.8. Мехатроника (приводы, датчики).

### **3. Ключевые подсистемы “Солдата будущего”**

#### **1. Средства прицеливания, разведки и наблюдения.**

- 1.1. Оружие.
  - 1.1.1. Комплект сменных модулей.

## 1.2. Шлем.

- 1.2.1. Оптико-электронный прицельный комплекс, видеокамера, тепловизор, лазерный дальномер, прибор ночного видения.
- 1.2.2. Защита глаз, ушей, органов дыхания.
- 1.2.3. Система индикации отравляющих, биологических и радиоактивных веществ.
- 1.2.4. Система информирования.

## 2. Средства защиты и увеличения физических возможностей.

### 2.1. Бронежилет.

- 2.1.1. Динамическая броня.
- 2.1.2. Жилет разгрузки.

### 2.2. Экзоскелет.

- 2.2.1. Интегрированная броня.
- 2.2.2. Маскировка.
- 2.2.3. Терморегулирование.
- 2.2.4. Влагоотведение.
- 2.2.5. Силовые приводы.

## 3. Средства самоанализа (контроля) и корректировки физиологического состояния.

- 3.1. Датчики параметров физиологического состояния в режиме онлайн.
- 3.2. Инъекторы корректировки физиологического состояния в режиме онлайн.

## 4. Информационно-вычислительный комплекс.

### 4.1. Интегрированная система обработки данных.

- 4.1.1. Карманный переносной компьютер.
- 4.1.2. Планшетный переносной компьютер.

### 4.2. Навигация.

- 4.2.1. Электронный компас.
- 4.2.2. ГЛОНАСС, GPS.
- 4.2.3. Инерциальная система.
- 4.2.4. Датчики естественной ориентации.

### 4.3. Связь, сеть.

- 4.3.1. Цифровая многодиапазонная радиостанция/речь, радиомодем/данные, оптические каналы передачи видео- и аудиопотоков.

### 4.4. Программное обеспечение.

## 5. Энергетика, полезная нагрузка.

### 5.1. Источник тока.

- 5.1.1. Аккумуляторы.

- 5.1.2 Топливные элементы.
- 5.1.3 Использование тепла и движения тела.
- 5.1.4 Попутная выработка электроэнергии.
- 5.2 Рюкзак.
  - 5.2.1 Боеприпасы.
  - 5.2.2 Медикаменты.
  - 5.2.3 Провизия.

#### 4. Основные проблемы

1. **Создание совершенной мехатроники**, максимально соответствующей анатомии человека. У роботов-андроидов: COMAN – 25 [41-43], SAR-401 – 38, AR-600E – 53, ASIMO – 57 управляемых осей управления, в современные проекты закладывается до 90. Электромеханические приводы не могут обеспечить движение высоконагруженных конечностей робота с заданными характеристиками.
2. **Создание совершенных приводов**. Мышцы плотно облегают костяк и обеспечивают характерные амплитуды и скорости перемещения конечностей. Электромеханические, гидравлические и пневматические приводы отстают от мышц по удельным характеристикам в заданных габаритах. Наиболее приемлемые результаты дают гидроприводы, но будущее за искусственными мышцами.
3. **Очувствление роботов** – создание совершенных: технического зрения, слуха, обоняния, осязания. Создание обратных связей по всем видам чувств и реализация “эффекта присутствия” оператора на месте робота, а также улучшение восприятия за счёт охвата диапазонов недоступных органам человеческих чувств – реализация “эффекта дополненной реальности”. Возможно в будущем место “эффекта присутствия” займёт “эффект полного погружения”.
4. **Создание совершенной системы дистанционного управления** от управляющего экзоскелета до нейроинтерфейса, обеспечивающего устойчивое пропорциональное управление без необходимости длительного процесса обучения оператора (интуитивное управление), а также сочетание с автономными функциями.
5. **Создание автономной системы управления на основе элементов искусственного интеллекта** открывает путь практически полной автономности роботов, однако перспектива создания “искусственного разума” ускользает, одновременно существуют несовместимые мировоззренческие точки зрения на познаваемость механизмов мышления и рассудочной деятельности человека.
6. **Решение проблемы энергопитания** на пути создания совершенных аккумуляторов, топливных элементов, сбалансированных двигателей внутреннего сгорания, конденсаторных батарей и миниатюрных ядерных и термоядерных источников, реакторов, преобразующих бросовую органику в углеводороды с последующей выработкой электроэнергии.

## 5. Система управления антропоморфной платформой

Предусмотрены несколько режимов работы системы управления: копирующий режим, супервизорный режим, комбинированный режим, сочетающий копирующий и супервизорный режимы, автономный режим.

Задачи мехатроники:

- ❖ Создание антропоморфной платформы, с массой, длиной звеньев и числом осей управления, обеспечивающими анатомическое сходство с человеком.
- ❖ Создание управляющего экзоскелета плечевого пояса.
- ❖ Создание управляющего экзоскелета тазобедренного пояса.
- ❖ Выбор приводов, длин перемещения и углов поворота, обеспечивающих воспроизводство основных движений человека с типичными скоростями и амплитудами.
- ❖ Задачи управления:
- ❖ Создание математической модели динамики многозвенного механизма.
- ❖ Формулировка оптимизационных геометрических, кинематических и динамических типовых задач.
- ❖ Формирование библиотеки стандартных поз и движений с учётом контактных и гравитационных сил, а также с учётом инерции движения звеньев.
- ❖ Создание системы опережающего расчёта нагрузок и перемещений.
- ❖ Создания библиотеки запретов поз и перемещений.
- ❖ Создание системы опережающего контроля коллизий, крушений и выработки команд для минимизации ущерба.
- ❖ Создание библиотеки типовых падений и типовых группировок.

Функции: “Следуй за мной”, “Огибание препятствия”, “Удержание равновесия” при внешнем динамическом воздействии (толчке), “Группировки” при падении, “Переворачивания на грудь”, “Вставание из положения лёжа”, “Ходьба”, “Бег”, “Передвижения на четвереньках”, “Повороты на месте”, “Повороты в движении”, “Ходьба по лестнице вверх”, “Ходьба по лестнице вниз”, “Приседание на четвереньки”, “Посадка на стул”, “Вставание со стула”, “Прыжки с ноги на ногу”, “Перемещение боком”, “Перемещение пятясь”, “Перемещение с опорой на поручни”, “Перемещение с активной стопой по уклону”, “Распределение веса на опоры”, “Нахождение статической устойчивости” и т.д.

## 6. Энергетика – хранение, генерация и рекуперация

1. **Аккумуляторы.** Занимают лидирующие позиции, ожидаемый уровень плотности энергии 3460 Вт·ч/кг. Натрий-воздушные батареи – 1600 Вт·ч/кг, литий-воздушные батареи – 3460 Вт·ч/кг), литий-ионные батареи – 200 Вт·ч/кг. Большими перспективами обладают литий-серные батареи [44].
2. **Конденсаторы.** Уровень плотности энергии в настоящее время существенно отстаёт от аккумуляторов, удобны в накопительных системах с малыми потерями. Обладают самыми высокими скоростями заряда разряда.

3. **ДВС-электрогенераторы.** Малогабаритные двигатели внутреннего сгорания в паре с электрогенераторами дают сегодня наивысшую плотность энергии. Применяются для обеспечения высокой автономности.
4. **Топливные элементы.** Интенсивно разрабатываются, обладают наивысшим КПД преобразования.

На рис. 23 показан топливный элемент АЕРОПАК производства Horizon Energy Systems (США) [45]. Блок топливного элемента производства DOE, Fuel Cell Technologies Office (США) представлен на рис. 24 [46]. На рис. 25 показаны экспериментальные разработки компании Samsung (Южная Корея) в области источников питания на основе топливных элементов прямого преобразования метанола.



**Рис. 23.** Топливные ячейки АЕРОПАК до 600-900 Вт·ч



**Рис. 24.** Блок топливного элемента, DOE, Fuel Cell Technologies Office, США



**Рис. 25.** Источник питания на топливных элементах прямого преобразования метанола (DFMC), компания Samsung. Источник массой 3,5 кг способен без подзарядки выработать 1800 Вт·ч электроэнергии

1. **Химические реакторы.** Преобразование любого вида органики в нефтепродукты. Плазменный реактор Шаха (рис. 26) предназначен для проведения процессов высокоскоростного пиролиза – получения синтетической нефти из отходов. Реактор смешивания высокоскоростного пиролиза Шаха (рис. 27) предназначен для получения синтетической нефти из твердого углеводородного сырья.



Рис. 26. Плазменный реактор Шаха



Рис. 27. Реактор смешивания высокоскоростного пиролиза Шаха

- 2. Ядерные батарейки.** Слаботочные системы непрерывной подзарядки. Могут стать лидерами энергопитания роботов. На рис. 28 представлена ядерная батарейка City Labs (США), [47]. Диапазон рабочих температур от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Срок службы 20 лет. Напряжение от 0.8 до 2.4 В и ток от 50 до 300 наноампер.



Рис. 28. Ядерная батарейка City Labs, США

- 3. Рекуператоры.** Утилизация любого бросового вида энергии с преобразованием в электрическую.

## 7. Сенсорная система

Сенсорная система состоит из сенсорных рецепторов, линий передачи и обработчиков информации. В соответствии с психофизиологической классификацией рецепторов по характеру ощущений, возникающих при их раздражении, выделяют зрительные, слуховые, обонятельные, вкусовые, осязательные, терморепцепторы, проприорецепторы, вестибулорецепторы и рецепторы боли [48, 49]. Основные функции сенсорной системы [48]:

- 1. Обнаружение сигналов.**
- 2. Различение сигналов.**
- 3. Преобразование и передача сигналов.**
- 4. Кодирование информации.**
- 5. Детектирование сигналов.**
- 6. Оpozнание образов.**

## 8. Автономный режим работы и искусственный интеллект

В основе интеллектуального управления лежат [50]:

- ❖ Концепция ситуационного управления.
- ❖ Концепция многоуровневой иерархической архитектуры систем управления.
- ❖ Концепция избирательного применения технологий обработки априорной информации.
- ❖ Концепция соответствия степени интеллектуальности системы уровню неопределённости внешней среды, в которой функционирует система.

Базовый набор интеллектуальных алгоритмов, включающий алгоритмы планирования поведения, перераспределения задач, самообучения, самодиагностики и прогнозирования, приведён в [50]. Ключевые этапы разработки искусственного интеллекта (ИИ) андроида робота перечислены в [51]. Направления развития ИИ и основные его аспекты представлены в [52].

Полное исключение человеческого присутствия из мест выполнения опасных работ за счёт замены людей роботами не возможно ввиду недостаточного уровня развития технологий ИИ. Однако промежуточным этапом на пути полной элиминации человека из опасных сред могут стать роботы-аватары, не обладающие автономной системой управления, и способные действовать только в копирующем режиме. Человек может управлять аватаром за счёт изменения относительного положения элементов копирующего устройства, взаимодействующего с человеком, получая при этом обратную связь по силе и положению. В перспективе возможно получение управляющих сигналов за счёт снятия электроэнцефалограммы головного мозга, либо нейромиографии мышц.

Роботы-аватары предоставляют ряд дополнительных преимуществ: силу, скорость, выносливость, не доступных обычному человеку. Они могут найти своё применение при глубоководных работах, ликвидации последствий аварий на атомных электростанциях. Востребованы аватары и силовыми структурами.

## 9. Архитектура систем

Задачи, поставленные роботам, могут решаться:

- ❖ *Программно*. Детерминированная последовательность действий.
- ❖ *Адаптивно*. Робот способен адаптироваться к изменениям ситуации, заранее определены основные алгоритмы поведения в той или иной ситуации.
- ❖ *Интеллектуально*. Определена лишь конечная цель. Робот самостоятельно принимает решения, направленные на достижение заданной цели.

Так как основное назначение шагающих машин – передвижение по сильно пересеченной местности, управление ими обязательно должно быть как минимум адаптивным. В системе управления при этом выделяют обычно следующие 3 уровня управления:

- ❖ *Низший*, уровень – управление силовыми приводами.
- ❖ *Средний* уровень – синтез походки, стабилизация положения в пространстве.

- ❖ **Высший** уровень – определение типа походки и параметров движения в соответствии с заданными целями.

В состав системы управления входят следующие системы [51]:

1. **Система голосового управления (СГУ)**. СГУ способны распознавать ограниченное число команд, состоящих из нескольких слов. При наличии шумов в окружающей среде возникает проблема выбора источника голосовых команд. На рис. 29 представлена функциональная схема СГУ.

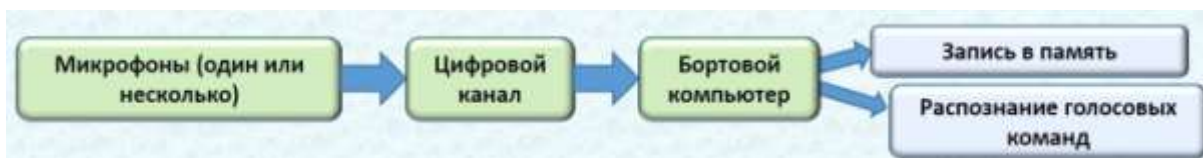


Рис. 29. Функциональная схема СГУ

На рис. 30 и 31 показаны схемы команд-ответов и простого диалога соответственно.



Рис. 30. Схема команд-ответов СГУ



Рис. 31. Схема простого диалога СГУ

2. **Система многоканального слуха** необходима для восприятия акустической информации о среде. Необходимый набор функций системы многоканального слуха приведен в [51].
3. **Система голосовых сообщений**.
4. **Система тактильного оцувствления (СТО)**. При дистанционном управлении СТО формирует сигналы обратной связи, которые позволяют оператору через тактильные симуляторы управляющего (задающего) костюма (командного аппарата) ощутить уровень нагрузок на собственном теле. На рис. 32 показана СТО ступни и схвата.



Рис. 32. СТО ступни и схвата

5. **Инерциальная система пространственной ориентации.** Необходимы совершенные алгоритмы и большие вычислительные ресурсы, что позволит обеспечить расчёт коррекций в процессе непрерывного изменения пространственной конфигурации исполнительного механизма робота.
6. **Система управления походкой и устойчивостью** использует системы тактильного очувствления и пространственной ориентации для управления походкой и обеспечения её устойчивости.
7. **Система управления стратегиями** использует приведённые выше системы для выбора и реализации стратегий поведений, обеспечивающих оптимальное соответствие текущему заданию и состоянию окружающей среды. Среди достижений системы: навигация в простой среде с препятствиями, обеспечивающая формирование маршрута к цели, манипуляция жёсткими объектами с помощью одной или двух рук, целенаправленные действия ногами (удар мячом по воротам), возможность обучения роботов путём демонстрации некоторого набора движений, которые затем они могут повторить.
8. **Система технического зрения (СТЗ).** Современные СТЗ при наличии определённым образом организованного освещения способны распознавать и определять координаты трёхцветных объектов простой геометрической формы. В наиболее совершенных СТЗ реализуется распознавание лиц людей. На рис. 33 показана функциональная схема СТЗ.



Рис. 33. Функциональная схема СТЗ

Можно выделить следующие уровни СТЗ:

- ❖ *Системы технического зрения низкого уровня.* В их задачи входит обработка информации, получаемой с датчиков очувствления.
- ❖ *Системы технического зрения среднего уровня* призваны решать задачи сегментации, описания и распознавания отдельных объектов.
- ❖ *Системы технического зрения высокого уровня* с сенсорными характеристиками, близкими к возможностям человека.

Принципы построения и обобщения структуры интеллектуальной системы управления автономным объектом приведены в [50].

## Заключение

Проведённый обзор показывает возможность революционного развития ряда ключевых направлений антропоморфной робототехники. Причём прорыв будет тем значительнее, чем сильнее влияние действующих в настоящее время сдерживающих факторов, среди которых особое место занимают проблемы обеспечения достаточной автономности (как в плане энергетики, так и в плане управления). Таким образом, в данный момент развитие антропоморфной робототехники является одним из стратегических направлений развития науки, техники и технологии.

## Список литературы

1. Raytheon XOS 2 Exoskeleton // New atlas: веб-сайт. Режим доступа: <http://newatlas.com/raytheon-significantly-progresses-exoskeleton-design/16479/> (дата обращения 13.11.15).
2. HULC. Exoskeletons Enhance Mobility and Increase Endurance // Lockheed Martin: веб-сайт. Режим доступа: <http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/mfc/pc/hulc/mfc-hulc-pc-01.pdf> (дата обращения 13.11.15).
3. Kazerooni H., Steger R. The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton // ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control. 2006. Vol. 128, № 1. Pp. 14-25. DOI: [10.1115/1.2168164](https://doi.org/10.1115/1.2168164)
4. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) // The International Journal of Robotics Research. 2006. Vol. 25, № 5-6. Pp. 561-573. DOI: [10.1177/0278364906065505](https://doi.org/10.1177/0278364906065505)
5. Экзоскелет Perseus // Военное обозрение: веб-сайт. Режим доступа: <http://topwar.ru/39839-ekzoskelet-perseus-marketingovyy-pamflet.html> (дата обращения 13.11.15).
6. Верейкин А.А. Расчёт исполнительных гидроцилиндров экзоскелета // Молодёжный научно-технический вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 5. Режим доступа <http://sntbul.bmstu.ru/doc/569290.html> (дата обращения 15.08.16).

7. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семёнов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Б.Б., Яроц В.В. Синтез кинематической схемы исполнительного механизма экзоскелета // Актуальные вопросы науки. 2014. № 8. С. 68-76.
8. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семёнов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Б.Б., Яроц В.В. Динамика исполнительного механизма экзоскелета // Техника и технология: новые перспективы развития. 2014. № 8. С. 5-16.
9. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Анализ и выбор кинематической структуры исполнительного механизма экзоскелета // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 7. Рр. 72-93.  
DOI: [10.7463/0714.0717676](https://doi.org/10.7463/0714.0717676)
10. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Каргинов Л.А. Исследование динамики исполнительного механизма экзоскелета нижних конечностей с учётом реакций опорной поверхности // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 12. С. 256-278. DOI: [10.7463/0815.9328000](https://doi.org/10.7463/0815.9328000)
11. Зельцер А.Г., Верейкин А.А., Гойхман А.В., Савченко А.Г., Жуков А.А., Демченко М.А. Концепция экзоскелета капсульного типа для аварийно-спасательных операций // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 3. С. 14-22.
12. Жуков А.А., Демченко М.А., Верейкин А.А., Савченко А.Г., Зельцер А.Г. Архитектура системы управления экзоскелета // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 2. С. 546-553.
13. Верейкин А.А., Савченко А.Г., Зельцер А.Г., Жуков А.А., Демченко М.А. Анализ некоторых факторов биомеханики человека как предварительный этап проектирования исполнительного механизма экзоскелета // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 2. С. 1-11.
14. УКТ-3 // НПО Андронидная техника: веб-сайт компании. Режим доступа: <http://npo-at.com/products/%c2%ab%d0%b0%d0%b2%d0%b0%d1%82%d0%b0%d1%80%c2%bb/> (дата обращения 13.11.15).
15. EхоHand // Festo Corporate: веб-сайт компании. Режим доступа: [http://www.festo.com/cms/en\\_corp/12713.htm](http://www.festo.com/cms/en_corp/12713.htm) (дата обращения 13.11.15).
16. Androids and Artificial Intelligence Research at the Osaka University // EXPO21XX: веб-сайт. Режим доступа: [http://expo21xx.com/automation21xx/17466\\_st3\\_university/default.htm](http://expo21xx.com/automation21xx/17466_st3_university/default.htm) (дата обращения 25.06.15).
17. MacDorman K.F., Ishiguro H. The uncanny advantage of using androids in cognitive and social science research // Interaction Studies. 2006. No.7:3. Pp. 297-337.
18. Антропоморфные роботы // Neurobotics: веб-сайт. Режим доступа: <http://neurobotics.ru/robotics/antropomorphic-robots> (дата обращения 13.11.2015).
19. Successful Development of a Robot with Appearance and Performance Similar to Humans // AIST: веб-сайт. Режим доступа:

- [http://www.aist.go.jp/aist\\_e/latest\\_research/2009/20090513/20090513.html](http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2009/20090513/20090513.html) (дата обращения 13.11.15).
20. Kaneko K., Kanehiro F., Morisawa M., Akachi K., Miyamori G., Hayashi A., Kanehira N. Humanoid robot HRP-4 – Humanoid robotics platform with lightweight and slim body // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2011, 25-30 September, San Francisco, CA, USA. Pp. 4400-4407. DOI: [10.1109/IROS.2011.6094465](https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094465)
  21. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Гидросистема с программным управлением для роботизированного манекена // Научно-технический сборник. Вопросы оборонной техники. Санкт-Петербург, 2006. Сер. 9. № 2(219)-3(220). С. 64-66.
  22. Ковальчук А.К. Разработка математической модели исполнительного механизма роботизированного манекена // Научный Вестник МГТУ ГА. 2011. № 168 (6). С. 128-131.
  23. Humanoid robotic & programmable robots // Aldebaran Robotics: веб-сайт. Режим доступа: <https://www.aldebaran.com/en> (дата обращения 13.11.15).
  24. NAO Humanoid Robot Platform // istec.org: веб-сайт. Режим доступа: [http://www.istec.org/wp-content/uploads/2013/11/Datasheet\\_H25\\_NAO\\_Next\\_Gen\\_EN.pdf](http://www.istec.org/wp-content/uploads/2013/11/Datasheet_H25_NAO_Next_Gen_EN.pdf) (дата обращения 13.11.15).
  25. Mericli C., Veloso M. Biped Walk Learning On Nao Through Playback and Real-time Corrective Demonstration // Proc. of 9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010). 2010, 10-14 May, Toronto, Canada.
  26. Chestnutt J. Lau M., Cheung G., Kuffner J., Hodgins J., Kanade T. Footstep Planning for the Honda ASIMO Humanoid // ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2005, 18-22 April. Pp. 629-634. DOI: [10.1109/ROBOT.2005.1570188](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570188)
  27. Dedicated to the Science and Art of How Things Move // Boston Dynamics: веб-сайт. Режим доступа: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_petman.html](http://www.bostondynamics.com/robot_petman.html) (дата обращения 13.11.15).
  28. SAR-400 // НПО Андроидная техника: веб-сайт компании. Режим доступа: <http://npo-at.com/products/sar-400/> (дата обращения 13.11.15).
  29. AR-600 // НПО Андроидная техника: веб-сайт компании. Режим доступа: <http://npo-at.com/products/ar-600/> (дата обращения 13.11.15).
  30. DARPA Robotics Challenge // TREC VT: веб-сайт. Режим доступа: <http://www.trecvt.com/> (дата обращения 25.06.15).
  31. Hopkins M.A., Hong D.W., Leonessa A. Compliant Locomotion Using Whole-Body Control and Divergent Component of Motion Tracking // *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2015, 26-30 May, Seattle WA, USA. Pp. 5726-5733. DOI: [10.1109/ICRA.2015.7140001](https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7140001)

32. Hopkins M.A., Hong D.W., Leonessa A. Dynamic Walking on Uneven Terrain Using the Time-Varying Divergent Component of Motion // International Journal of Humanoid Robotics. 2015. Vol. 12, no. 3. DOI: [10.1142/S0219843615500279](https://doi.org/10.1142/S0219843615500279)
33. Atlas – The Agile Anthropomorphic Robot // Boston Dynamics: веб-сайт. Режим доступа: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_Atlas.html](http://www.bostondynamics.com/robot_Atlas.html) (дата обращения 13.11.15).
34. Kuindersma S., Deits R., Fallon M., Valenzuela A., Dai H., Permenter F., Koolen T., Marion P., Tedrake R. Optimization-based Locomotion Planning, Estimation, and Control Design for the Atlas Humanoid Robot // Autonomous Robots, 2015. Vol. 40, no. 3. Pp 429–455. DOI: [10.1007/s10514-015-9479-3](https://doi.org/10.1007/s10514-015-9479-3)
35. Feng S., Whitman E., Xinjilefu X., Atkeson C.G. Optimization Based Full Body Control for the Atlas Robot // 14th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). 2014, 18-20 November, Madrid, Spain. Pp. 120-127. DOI: [10.1109/HUMANOIDS.2014.7041347](https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2014.7041347)
36. Robonaut 2 // R2: веб-сайт. Режим доступа: <http://robonaut.jsc.nasa.gov/> (дата обращения 25.06.15).
37. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Управление исполнительными системами двуногих шагающих роботов. Теория и алгоритмы. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 160 с.
38. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Формирование упрощённой траектории движения двуножного шагающего робота // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 3. С. 51-58. DOI: [10.18698/0536-1044-2011-3-51-58](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2011-3-51-58)
39. Ковальчук А.К., Кулаков Б.Б., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Яроц В.В. Основы теории исполнительных механизмов шагающих роботов. М.: Изд-во Рудомино, 2010. 170 с.
40. Ковальчук А.К. Стабилизация движения двуножного шагающего робота с управлением моментами на стопах // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 4. С. 40-45. DOI: [10.18698/0536-1044-2011-4-40-45](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2011-4-40-45)
41. Compliant Humanoid Platform (COMAN) // ИИТ: веб-сайт института. Режим доступа: <http://www.iit.it/en/advr-labs/humanoids-a-human-centred-mechatronics/advr-humanoids-projects/compliant-humanoid-platform-coman.html> (дата обращения 13.11.15).
42. Moro F.L., Tsagarakis N.G., Caldwell D.G. Walking in the resonance with the COMAN robot with trajectories based on human kinematic motion primitives (kMPs) // Autonomous Robots. 2014. Vol. 36, no. 4. Pp. 331-347.
43. Moro F.L., Gienger M., Goswami A., Tsagarakis N.G., Caldwell D.G. An Attractor-based Whole-Body Motion Control (WBMC) System for Humanoid Robots // 13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). 2013, 15-17 October, Atlanta, GA, USA. Pp. 42-49. DOI: [10.1109/HUMANOIDS.2013.7029953](https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2013.7029953)
44. Lin Z., Liu Z., Fu W., Dudney N.J., Liang C. Lithium Polysulfidophosphates: A Family of Lithium-Conducting Sulfur-Rich Compounds for Lithium–Sulfur Batteries // Angew. Chem. Int. Ed. 2013. Vol. 52, no. 29. Pp. 7460-7463. DOI: [10.1002/anie.201300680](https://doi.org/10.1002/anie.201300680)

45. Fuel Integrated FC Systems // HES Energy Systems: веб-сайт. Режим доступа: <http://www.hes.sg/#!/fuel-integrated-fc-systems/c15wk> (дата обращения 13.11.15).
46. Fuel Cells // Energy.gov: веб-сайт. Режим доступа: <http://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells> (дата обращения 13.11.15).
47. City Labs Achieves Industry's First Product Regulatory License for a Betavoltaic Battery // City labs: веб-сайт. Режим доступа: [http://www.citylabs.net/index.php?option=com\\_content&view=article&id=42:general-license&catid=8:news&Itemid=50](http://www.citylabs.net/index.php?option=com_content&view=article&id=42:general-license&catid=8:news&Itemid=50) (дата обращения 13.11.15).
48. Физиология человека: Учебник / Под ред. Покровского В.М., Коротько Г.Ф. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Медицина, 2003. 656 с.
49. Психофизиология. Учебник для ВУЗов / Под ред. Александрова Ю.И. 4-е изд. СПб.: Питер, 2014. 464 с.
50. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Александрова Р.И. Развитие технологии интеллектуального управления для создания перспективных образцов ВВТ на базе новых средств комплексной автоматизации проектирования // Известия ЮФУ университета. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 7-14.
51. Разработка искусственной нервной системы гуманоидного робота (аватара) // Россия 2045: веб-сайт. Режим доступа: <http://2045.ru/experts/28869.html> (дата обращения 13.11.15).
52. Луцан М.В. Технологии, базирующиеся на идее ИИ. Материалы 54-й ежегодной студенческой научной конференции. Таганрог, 2007. Режим доступа: <http://filosof.historic.ru/books/item/f00/s00/z0000970/st007.shtml> (дата обращения 13.11.15).

## Status and Trends of the Anthropomorphic Robotics

S.P. Hurs<sup>1</sup>, A.A. Vereikin<sup>2,\*</sup>

\* [aautres@gmail.com](mailto:aautres@gmail.com)

<sup>1</sup>Foundation for Advanced Studies, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** anthropomorphic robotics, exoskeleton, android, android platform, avatar, soldier of the future, control system, energy subsystem, artificial intelligence

---

The paper considers a number of current developments in the field of anthropomorphic robotics, namely robotic exoskeletons, android platform with copying control systems, android platform with autonomous control systems, avatars, and androids. Highlights the key subsystems of the robotic platform such as sensitization tools, tools of self-diagnostics, security and prioritization, a power subsystem, and computer system. Identifies the most important subsystem of a “future soldier” to represent an equipage as a multifunctional active exoskeleton, completed with the necessary equipment.

The paper shows the main problems the developers of anthropomorphic robotics face. For example, many degrees of the human body freedom curb a creation of the actuating mechanisms of robots, which fit the human anatomy as much as possible. For the human sizes the specific characteristics of traditional types of actuators, such as electromechanical, electro-hydraulic and electro-pneumatic are worse than those of the human muscles. Clearly, the greatest prospects in this area are associated with artificial muscles. There is also no so far a solution for the problem of creating the feedbacks in all kinds of senses to ensure that an operator has a feeling that he is in the place of the robot. There is much tension around the issue of creating a perfect remote control system that allows the operator to obtain unambiguous signals to control the robot. There is currently no completely autonomous control system with elements of artificial intelligence. Particular attention is paid to the problems of creating power sources that can provide affordable autonomy for mobile robotic systems. The most, presently, promising power sources are mentioned.

The paper considers some development aspects of the control system, which is capable to run in a copier, supervisory, combined and offline modes. Presents the most important functions of the robot sensory system. Shows some aspects of building control systems for advanced facilities of anthropomorphic robotics, including systems with elements of artificial intelligence.

Taken as a whole, the analysis conducted shows that a revolutionary development of a number of key areas of the anthropomorphic robotics is possible.

## References

1. Raytheon XOS 2 Exoskeleton. New atlas: website. Available at: <http://newatlas.com/raytheon-significantly-progresses-exoskeleton-design/16479/> (accessed 13.11.15).
2. HULC. Exoskeletons Enhance Mobility and Increase Endurance. Lockheed Martin: website. Available at: <http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/mfc/pc/hulc/mfc-hulc-pc-01.pdf> (accessed 13.11.15).
3. Kazerooni H., Steger R. The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton. *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control*. 2006, vol. 128, no.1, pp. 14-25. DOI: [10.1115/1.2168164](https://doi.org/10.1115/1.2168164)
4. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX). *The International Journal of Robotics Research*, 2006, vol. 25, no. 5-6, pp. 561-573. DOI: [10.1177/0278364906065505](https://doi.org/10.1177/0278364906065505)
5. *Ekzoskelet Perseus* [Exoskeleton Perseus]. Voennoe obozrenie: website. Available at: <http://topwar.ru/39839-ekzoskelet-perseus-marketingovyy-pamflet.html> (accessed 13.11.15). (in Russian).
6. Vereykin A.A. Exoskeleton executive cylinders design. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik. MGTU im. N.E. Baumana = Electronic periodical Youth scientific and technical bulletin*, 2013, no. 5. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/569290.html> (accessed 15.08.16). (in Russian).
7. Vereykin A.A., Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Karginov L.A., Kulakov B.B., Yarots V.V. Synthesis of the kinematic structure of the exoskeleton's actuator. *Aktual'nye voprosy nauki*, 2014, no. 8, pp. 68-76. (in Russian).
8. Vereykin A.A., Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Karginov L.A., Kulakov B.B., Yarots V.V. Exoskeleton actuator dynamics. *Tekhnika i tekhnologiya: novye perspektivy razvitiya*, 2014, no. 8, pp. 5-16. (in Russian).
9. Vereykin A.A., Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. Analysis and Choice of the Exoskeleton's Actuator Kinematic Structure. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 7, pp. 72-93. (in Russian). DOI: [10.7463/0714.0717676](https://doi.org/10.7463/0714.0717676)
10. Vereykin A.A., Koval'chuk A.K., Karginov L.A. The Lower Extremities Exoskeleton Actuator Dynamics Research Taking into Account Support Reaction. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 12, pp. 256-278. (in Russian). DOI: [10.7463/1214.0745388](https://doi.org/10.7463/1214.0745388)
11. Zel'tser A.G., Vereykin A.A., Goykhman A.V., Savchenko A.G., Zhukov A.A., Demchenko M.A. The concept of the capsular type exoskeleton for rescue operations. *Inzhenernyy vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Electronic publishing engineering bulletin*, 2015, no. 3, pp. 14-22. (in Russian).

12. Zhukov A.A., Demchenko M.A., Vereykin A.A., Savchenko A.G., Zel'tser A.G. The architecture of the exoskeleton control system. *Inzhenernyy vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Electronic publishing engineering bulletin*, 2015, no. 2, pp. 546-553. (in Russian).
13. Vereykin A.A., Savchenko A.G., Zel'tser A.G., Zhukov A.A., Demchenko M.A. Analysis of some human biomechanics factors as a preliminary stage for designing actuating mechanism of an exoskeleton. *Inzhenernyy vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Electronic publishing engineering bulletin*, 2015, no. 2, pp. 1-11. (in Russian).
14. UKT-3 [UKT-3]. NPO Androidnaya tekhnika: website. Available at: <http://npo-at.com/products/%c2%ab%d0%b0%d0%b2%d0%b0%d1%82%d0%b0%d1%80%c2%bb/> (accessed 13.11.15). (in Russian).
15. *ExoHand*. Festo Corporate: company website. Available at: [http://www.festo.com/cms/en\\_corp/12713.htm](http://www.festo.com/cms/en_corp/12713.htm) (accessed 13.11.15).
16. Androids and Artificial Intelligence Research at the Osaka University. EXPO21XX: website Available at: [http://expo21xx.com/automation21xx/17466\\_st3\\_university/default.htm](http://expo21xx.com/automation21xx/17466_st3_university/default.htm) (accessed 25.06.15).
17. MacDorman K.F., Ishiguro H. The uncanny advantage of using androids in cognitive and social science research. *Interaction Studies*, 2006, vol.7:3, pp. 297-337.
18. *Antropomorfnye roboty* [Anthropomorphic robots]. Neurobotics: website. Available at: <http://neurobotics.ru/robotics/antropomorphic-robots> (accessed 13.11.2015). (in Russian).
19. *Successful Development of a Robot with Appearance and Performance Similar to Humans*. AIST: website. Available at: [http://www.aist.go.jp/aist\\_e/latest\\_research/2009/20090513/20090513.html](http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2009/20090513/20090513.html) (accessed 13.11.15).
20. Kaneko K., Kanehiro F., Morisawa M., Akachi K., Miyamori G., Hayashi A., Kanehira N. Humanoid robot HRP-4 – Humanoid robotics platform with lightweight and slim body. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011, 25-30 September, San Francisco, CA, USA*, pp. 4400-4407. DOI: [10.1109/IROS.2011.6094465](https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094465)
21. Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. The hydraulic system with program control for robotic mannequin. *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik. Voprosy oboronnoy tekhniki = Engineering Problems. Scientific and Technical Journal*, 2006, ser. 9, no. 2(219)-3(220), pp. 64-66. (in Russian).
22. Koval'chuk A.K. Development of Mathematical Model of the Robotic Mannequin Actuating Mechanism. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of the MSTU CA*, 2011, no. 168 (6), pp. 128-131. (in Russian).
23. *Humanoid robotic & programmable robots*. Aldebaran Robotics: website. Available at: <https://www.aldebaran.com/en> (accessed 13.11.15). (in Russian).
24. *NAO Humanoid Robot Platform*. istec.org: website. Available at: [http://www.istec.org/wp-content/uploads/2013/11/Datasheet\\_H25\\_NAO\\_Next\\_Gen\\_EN.pdf](http://www.istec.org/wp-content/uploads/2013/11/Datasheet_H25_NAO_Next_Gen_EN.pdf) (accessed 13.11.15).

25. Mericli C., Veloso M. Biped Walk Learning On Nao Through Playback and Real-time Corrective Demonstration. *Proc. of 9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010)*, 2010, 10-14 May, Toronto, Canada.
26. Chestnutt J. Lau M., Cheung G., Kuffner J., Hodgins J., Kanade T. Footstep Planning for the Honda ASIMO Humanoid. *ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, 18-22 April, pp. 629-634.  
DOI: [10.1109/ROBOT.2005.1570188](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570188)
27. *Petman*. Boston Dynamics: website. Available at: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_petman.html](http://www.bostondynamics.com/robot_petman.html) (accessed 13.11.15).
28. *SAR-400*. NPO Androidnaya tekhnika: company website. Available at: <http://npo-at.com/products/sar-400/> (accessed 13.11.15). (in Russian).
29. *AR-600*. NPO Androidnaya tekhnika: company website. Available at: <http://npo-at.com/products/ar-600/> (accessed 13.11.15). (in Russian).
30. *DARPA Robotics Challenge*. TREC VT: website. Available at: <http://www.trecvt.com/> (accessed 25.06.15).
31. Hopkins M.A., Hong D.W., Leonessa A. Compliant Locomotion Using Whole-Body Control and Divergent Component of Motion Tracking. *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015, 26-30 May, Seattle WA, USA. Pp. 5726-5733. DOI: [10.1109/ICRA.2015.7140001](https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7140001)
32. Hopkins M.A., Hong D.W., Leonessa A. Dynamic Walking on Uneven Terrain Using the Time-Varying Divergent Component of Motion. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2015, vol. 12, no. 3. DOI: [10.1142/S0219843615500279](https://doi.org/10.1142/S0219843615500279)
33. *Atlas – The Agile Anthropomorphic Robot*. Boston Dynamics: website. Available at: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_Atlas.html](http://www.bostondynamics.com/robot_Atlas.html) (accessed 13.11.15).
34. Kuindersma S., Deits R., Fallon M., Valenzuela A., Dai H., Permenter F., Koolen T., Marion P., Tedrake R. Optimization-based Locomotion Planning, Estimation, and Control Design for the Atlas Humanoid Robot. *Autonomous Robots*, 2015, vol. 40, no. 3. Pp 429–455. DOI: [10.1007/s10514-015-9479-3](https://doi.org/10.1007/s10514-015-9479-3)
35. Feng S., Whitman E., Xinjilefu X., Atkeson C.G. Optimization Based Full Body Control for the Atlas Robot. *14th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2014, 18-20 November, Madrid, Spain. Pp. 120-127.  
DOI: [10.1109/HUMANOIDS.2014.7041347](https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2014.7041347)
36. *Robonaut 2. R2*: website. Available at: <http://robonaut.jsc.nasa.gov/> (accessed 25.06.15).
37. Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. *Upravlenie ispolnitel'nymi sistemami dvunogikh shagayushchikh robotov. Teoriya i algoritmy*. [Control of actuating system of biped walking robots. Theory and algorithms]. Moscow, MGOU Publ., 2007. 160 p. (in Russian).
38. Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. Forming a Simplified Motion Path of a Bipedal Walking Robot. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educa-*

- tional Institutions. Machine Building*, 2011, no. 3, pp. 51-58. (in Russian).  
DOI: [10.18698/0536-1044-2011-3-51-58](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2011-3-51-58)
39. Koval'chuk A.K., Kulakov B.B., Kulakov D.B., Semenov S.E., Yarots V.V. *Osnovy teorii ispolnitel'nykh mekhanizmov shagayushchikh robotov* [Foundations of the walking robots actuating mechanisms theory]. Moscow, Rudomino Publ., 2010. 170 p. (in Russian).
40. Koval'chuk A.K. Stabilization of movement of biped walking robot with torque on feet control. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 4, pp. 40-45. (in Russian). DOI: [10.18698/0536-1044-2011-4-40-45](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2011-4-40-45)
41. *Compliant Humanoid Platform (COMAN)*. IIT: institut website. Available at: <http://www.iit.it/en/advr-labs/humanoids-a-human-centred-mechatronics/advr-humanoids-projects/compliant-humanoid-platform-coman.html> (accessed 13.11.15).
42. Moro F.L., Tsagarakis N.G., Caldwell D.G. Walking in the resonance with the COMAN robot with trajectories based on human kinematic motion primitives (kMPs). *Autonomous Robots*, 2014, vol. 36, no. 4, pp. 331-347.
43. Moro F.L., Gienger M., Goswami A., Tsagarakis N.G., Caldwell D.G. An Attractor-based Whole-Body Motion Control (WBMC) System for Humanoid Robots. *13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). 2013, 15-17 October, Atlanta, GA, USA*, pp. 42-49. DOI: [10.1109/HUMANOIDS.2013.7029953](https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2013.7029953)
44. Lin Z., Liu Z., Fu W., Dudney N.J., Liang C. Lithium Polysulfidophosphates: A Family of Lithium-Conducting Sulfur-Rich Compounds for Lithium-Sulfur Batteries. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2013, vol. 52, no. 29, pp. 7460-7463. DOI: [10.1002/anie.201300680](https://doi.org/10.1002/anie.201300680)
45. *Fuel Integrated FC Systems*. HES Energy Systems: website. Available at: <http://www.hes.sg/#!/fuel-integrated-fc-systems/c15wk> (accessed 13.11.15).
46. *Fuel Cells*. Energy.gov: website. Available at: <http://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells> (accessed 13.11.15).
47. *City Labs Achieves Industry's First Product Regulatory License for a Betavoltaic Battery*. City labs: website. Available at: [http://www.citylabs.net/index.php?option=com\\_content&view=article&id=42:general-license&catid=8:news&Itemid=50](http://www.citylabs.net/index.php?option=com_content&view=article&id=42:general-license&catid=8:news&Itemid=50) (accessed 13.11.15).
48. Pokrovsky V.M., Korot'ko G.F., eds. *Fiziologiya cheloveka* [Human physiology]. Moscow, Meditsina Publ., 2003. 656 p. (in Russian).
49. Aleksandrov Yu.I., ed. *Psikhofiziologiya* [Psychophysiology]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2014. 464 p. (in Russian).
50. Makarov I.M., Lokhin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P., Aleksandrova R.I. Development of intelligent control technology for creation of autonomous objects on the basis of complex automation design. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences*, 2013, no. 3 (140), pp. 7-14. (in Russian).

51. *Razrabotka iskusstvennoy nervnoy sistemy gumanoidnogo robota (avatara)* [Developing artificial nervous system of humanoid robot (avatar).]. Rossiya 2045: website. Available at: <http://2045.ru/experts/28869.html> (accessed 13.11.15).
52. Lutsan M.V. Tekhnologii, baziruyushchiesya na idee II. *Materialy 54-y ezhegodnoy studencheskoy nauchnoy konferentsii. Taganrog, 2007.* Available at: <http://filosof.historic.ru/books/item/f00/s00/z0000970/st007.shtml> (accessed 13.11.15).