



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ОБОРОННОГО КОМПЛЕКСА «КОМПАС»

# АНАЛИТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

## РАЗРАБОТКА ЭКЗОСКЕЛЕТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО И СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ЗА РУБЕЖОМ



МОСКВА

# СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения.....	3
Введение .....	4
1 Разработка неавтономных силовых экзоскелетов тяжелого класса .....	5
1.1 Силовые экзоскелеты компании Atoun Panasonic .....	5
1.2 Силовой экзоскелет H-LEX компании Hyundai Rotem.....	7
1.3 Разработка силового экзоскелета Body Extender .....	8
2 Разработка автономных силовых экзоскелетов высокой грузоподъемности .....	15
2.1 Силовой экзоскелет HAL.....	15
2.2 Силовой экзоскелет специального назначения Power Assist Suit.....	19
2.3 Силовой экзоскелет Power-Assist Robot Suit .....	20
2.4 Силовой экзоскелет компании Daewoo.....	21
3 Портативные промышленные экзоскелеты пассивного типа.....	22
3.1 Экзоскелет верхних конечностей Robo-Mate .....	22
3.2 Экзоскелет Chairless Chair .....	23
3.3 Экзоскелеты компании Ottobock .....	24
3.4 Разработки компаний Франции .....	26
3.4.1 Экзоскелеты компании Exhauss.....	26
3.4.2 Экзоскелет компании Ergosante Technologie .....	26
3.5 Экзоскелет Mate компании Comau .....	27
3.6 Экзоскелеты компании Cyber Human Systems .....	28
3.7 Экзоскелет компании Laevo .....	29
3.8 Экзоскелеты компании Hyundai Rotem.....	30
3.9 Экзоскелет Fraco компании Mawashi .....	32
3.10 Разработки компаний США .....	34
3.10.1 Экзоскелеты компании Ekso Bionics.....	34
3.10.2 Модульный экзоскелет MAX компании US Bionics.....	35
3.10.3 Экзоскелет FORTIS корпорации Lockheed Martin .....	36
4 Портативные промышленные экзоскелеты активного типа.....	38
4.1 Разработки компаний Японии.....	38
4.1.1 Экзоскелеты компании Atoun Panasonic .....	38
4.1.2 Экзоскелеты компании Innophys .....	42
4.1.3 Экзоскелеты компании Cyberdyne.....	46
4.2 Разработки компаний Республики Корея .....	47
4.2.1 Экзоскелеты компании Hyundai Rotem.....	47
4.2.2 Экзоскелет CLOi SuitBot компании LG Electronics .....	47
5 Роботизированные системы с дистанционным управлением экзоскелетного типа .....	49
5.1 Роботизированный погрузчик Guardian GT - Big Arm .....	49
5.2 Аварийно-спасательный робот T-52 Enryu.....	49
5.3 Квазиэкзоскелет EXO-ONE.....	50
Заключение .....	52

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АКБ	–	аккумуляторная батарея
БЭС	–	биоэлектрический сигнал
ВМС		военно-морские силы
КПД	–	коэффициент полезного действия
МО	–	Министерство обороны
ЦБУ	–	центральный блок управления
ЭС	–	экзоскелет
CAC	–	Cybernic Autonomous Control (система автоматического управления)
CAD	–	Computer-Aided Design (система автоматизированного проектирования)
CVC	–	Cybernic Voluntary Control (система произвольного управления)
DARPA	–	Defense Advanced Research Projects Agency (Управление перспективных научных исследований и разработок МО США)
EHRA	–	Exoskeleton for Human Performance Augmentation (экзоскелет для многократного повышения физических возможностей человека)
HULC	–	Human Universal Load Carrier (универсальный экзоскелет для подъема и переноса грузов, США)
ECHORD	–	European Clearing House for Open Robotics Development (Европейский координационный центр по открытым разработкам в области робототехники)
PERCRO	–	Perceptual Robotics Laboratory (Лаборатория перцептивной робототехники)
TESBE	–	Technologies for Efficient and Safe Body Extenders (технологии эффективного и безопасного повышения физических возможностей человека)

## **ВВЕДЕНИЕ**

За рубежом создан широкий ряд экзоскелетов промышленного и специального назначения и продолжают разработки экзоскелетных конструкций, отличающихся улучшенными техническими характеристиками и расширенными функциональными возможностями. Многие из разработанных устройств применяются на промышленных и оборонных предприятиях, для ремонта и технического обслуживания военной техники, а также в логистических операциях и такелажных работах.

В обзоре представлены данные о разработках неавтономных силовых экзоскелетов тяжелого класса, автономных силовых экзоскелетов высокой грузоподъемности, включая устройства специального назначения для проведения ремонтных работ в опасных зонах атомных электростанций или операций, связанных с ликвидацией последствий техногенных аварий, а также портативных промышленных экзоскелетов пассивного и активного типов, обеспечивающих снижение травматизма и повышение производительности труда за счет поддержки опорно-двигательного аппарата и снижения мышечных усилий человека при выполнении такелажных работ, а также операций на сборочных и производственных линиях промышленных и военных предприятий.

Дополнительно приведена информация о разработке роботизированных систем, в исполнительных механизмах которых реализованы концепции робототехники, но управление осуществляется устройствами экзоскелетного типа.

# 1 РАЗРАБОТКА НЕАВТОНОМНЫХ СИЛОВЫХ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ ТЯЖЕЛОГО КЛАССА

Неавтономные силовые экзоскелеты тяжелого класса представляют собой неантропоморфные устройства, исполнительные механизмы которых имеют стержневую рамную конструкцию с минимальным числом связей с телом оператора. Это активные устройства высокой грузоподъемности, оснащенные электромеханическими или гидравлическими приводами и внешними источниками питания.

Недостатками неавтономных силовых экзоскелетов тяжелого класса являются большие габариты и масса, отсутствие бортовой силовой установки, однако наиболее существенным недостатком является неантропоморфный тип конструкции, что снижает возможности их широкого использования.

Основные области применений таких экзоскелетов включают аварийно-спасательные операции, ликвидацию последствий стихийных бедствий и катастроф, а также выполнение тяжелых работ на строительных площадках.

## 1.1 Силовые экзоскелеты компании Atoun Panasonic

На рисунке 1 показан неавтономный активный экзоскелет нижних и верхних конечностей Power Loader, разработанный в 2010 г. подразделением ActiveLink компании Panasonic (в настоящее время – Atoun Panasonic, Япония) и предназначенный для увеличения физической силы оператора при подъеме и переносе тяжелых грузов.

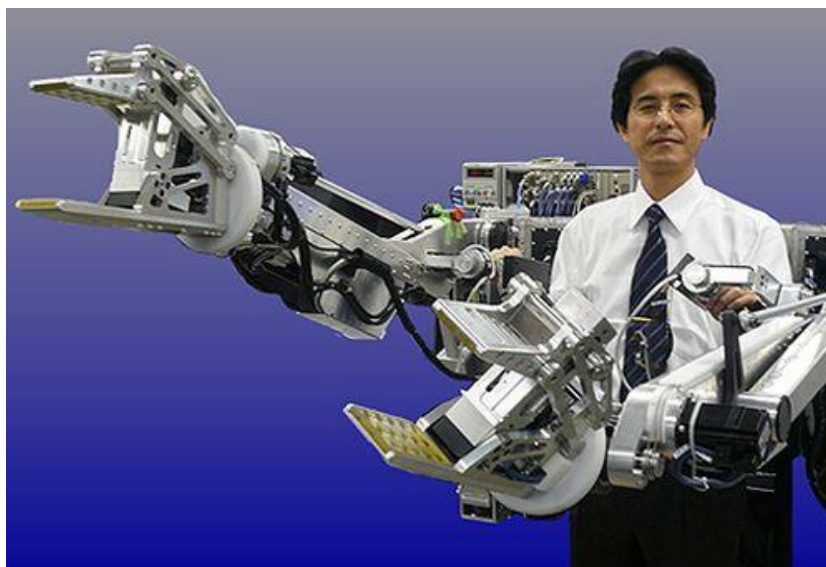
Исполнительный механизм экзоскелета оснащён электромеханическими приводами, управление которыми осуществляется на основе данных трехосных датчиков усилий, установленных в сочленениях звеньев ЭС.

На рисунке 2 показаны захватные устройства рук экзоскелета Power Loader.



*Рисунок 1. Неавтономный экзоскелет нижних и верхних конечностей Power Loader компании ActiveLink Panasonic (Япония), 2010 г.*

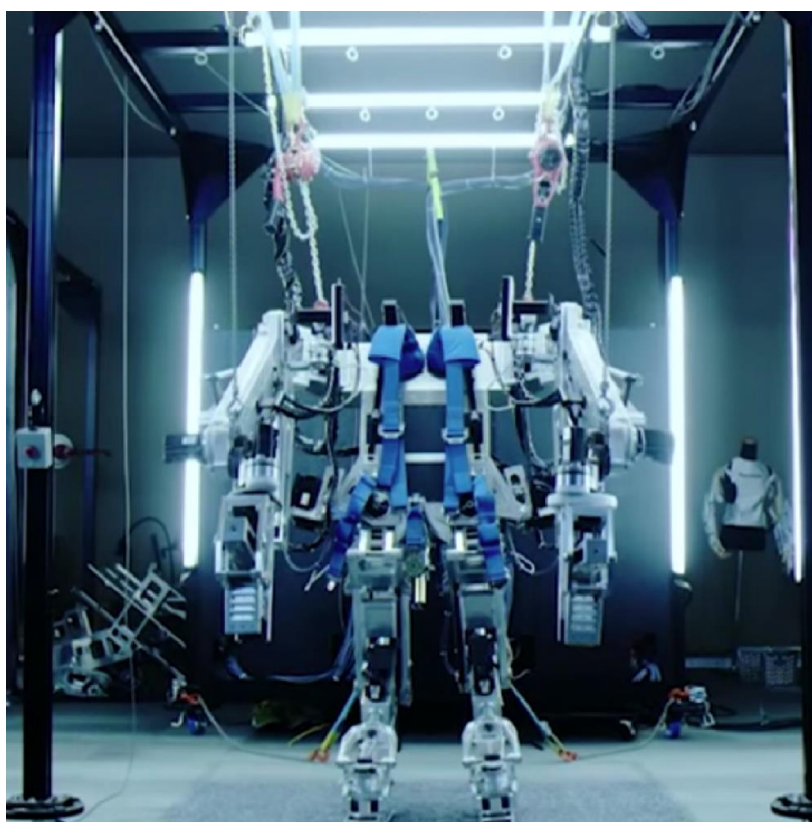




*Рисунок 2. Захватные устройства ЭС Power Loader*

После неудачных попыток применения ЭС Power Loader при ликвидации последствий аварии на ядерной электростанции Фукусима началась разработка более компактного варианта устройства грузоподъемностью 50-60 кг с шестиосными датчиками усилий, данные которых используются для управления сочленениями конечностей ЭС.

В настоящее время в разработке компании Atoun Panasonic находится активный силовой экзоскелет NIO, грузоподъемность которого должна составить не менее 100 кг (рисунок 3).



*Рисунок 3. Прототип силового экзоскелета NIO компании Atoun Panasonic (Япония), 2020 г.*

## 1.2 Силовой экзоскелет H-LEX компании Hyundai Rotem

В 2016 г. компанией Hyundai Rotem (входящей в группу компаний Hyundai Motor Group, Республика Корея) был представлен прототип тяжелого ЭС H-LEX (Hyundai Lifecaring EXoSkeleton) грузоподъемностью 80 кг для применения на предприятиях оборонно-промышленного комплекса. ЭС H-LEX оснащен гидравлическими приводами, а также системой стабилизации положения и управления синхронизацией движений рук ЭС (рисунок 4).



*Рисунок 4. Прототип тяжелого ЭС H-LEX компании Hyundai Rotem (Республика Корея), 2016 г.*

Устройство относится к классу тяжелых экзоскелетов, типичными представителями которых являются ЭС XOS 2 компании Sarcos (США), ЭС HULC (Human Universal Load Carrier), компании Lockheed Martin (США) и ЭС Body Extender Лаборатории перцептивной робототехники PERCRO (Perceptual Robotics Laboratory, Италия).

Для функционирования ЭС требуется внешний источник питания, а с целью предотвращения возможного падения оператора и обеспечения безопасной эксплуатации устройство крепится к потолку (рисунок 5).



*Рисунок 5. Применение силового экзоскелета H-LEX компании Hyundai Rotem*

### 1.3 Разработка силового экзоскелета Body Extender

Лаборатория перцептивной робототехники PERCRO, являющаяся научно-исследовательским подразделением Высшей школы Святой Анны (Scuola Superior Sant'Anna, Италия), начала разработку силового экзоскелета верхних и нижних конечностей Body Extender в 2004 г. Первая успешная демонстрация прототипа ЭС состоялась в 2009 г.

Работы по созданию экзоскелета частично финансировались МО Италии в соответствии с национальным планом военных научных исследований и Европейским союзом в рамках эксперимента по разработке технологий эффективного и безопасного повышения физических возможностей человека TESBE (Technologies for Efficient and Safe Body Extenders), являющегося частью проекта Европейского координационного центра по открытым разработкам в области робототехники ECHORD (European Clearing House for Open Robotics Development).

Неантропоморфный неавтономный активный экзоскелет Body Extender, предназначенный для использования в аварийно-спасательных операциях, промышленных, строительных, такелажных и погрузочно-разгрузочных работах, является одной из немногих функционирующих экзоскелетных конструкций с большим числом независимо активируемых степеней подвижности (рисунок 6).

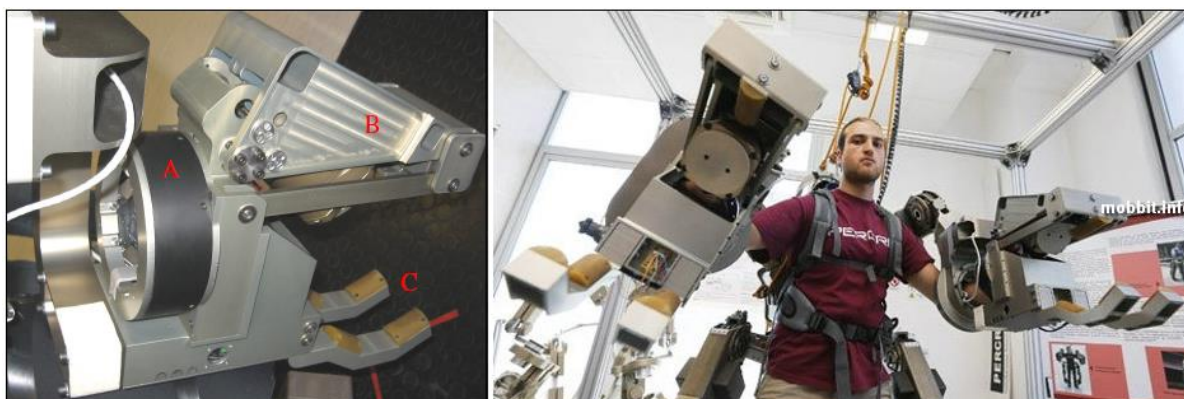
Экзоскелетная конструкция включает 4 роботизированные конечности, соединенные с центральным задним корпусом ЭС. Основным материалом структурных компонентов экзоскелета является алюминиевый анодированный сплав высокой прочности ERGAL.



*Рисунок 6. ЭС Body Extender разработки Лаборатории перцептивной робототехники PERCRO, Италия (справа – вид сзади)*



22 степени подвижности экзоскелета реализуются независимо посредством щеточных двигателей постоянного тока. Каждая роботизированная рука снабжена захватным устройством с одной степенью подвижности, перемещение которого обеспечивается сервоприводом (рисунок 7).



**Рисунок 7. Захватное устройство ЭС Body Extender: А – датчик силы, контактирующий с рукоятью, являющейся интегральной частью захватного устройства; В – подвижный схват; С – фиксирующие пальцы**

Набор датчиков, используемых в ЭС Body Extender, включает 22 инкрементальных энкодера, определяющих угловое положение роторов электродвигателей, 5 шестикомпонентных датчиков силы и крутящего момента, установленных в местах объединения конечностей и туловища оператора с руками, ногами и корпусом ЭС, 2 однокомпонентных датчика силы, интегрированных с захватными устройствами, для измерения усилий, прикладываемых оператором, и 1 трехосевой акселерометр, который интегрирован с корпусом ЭС и предназначен для оценки его положения относительно вектора гравитации.

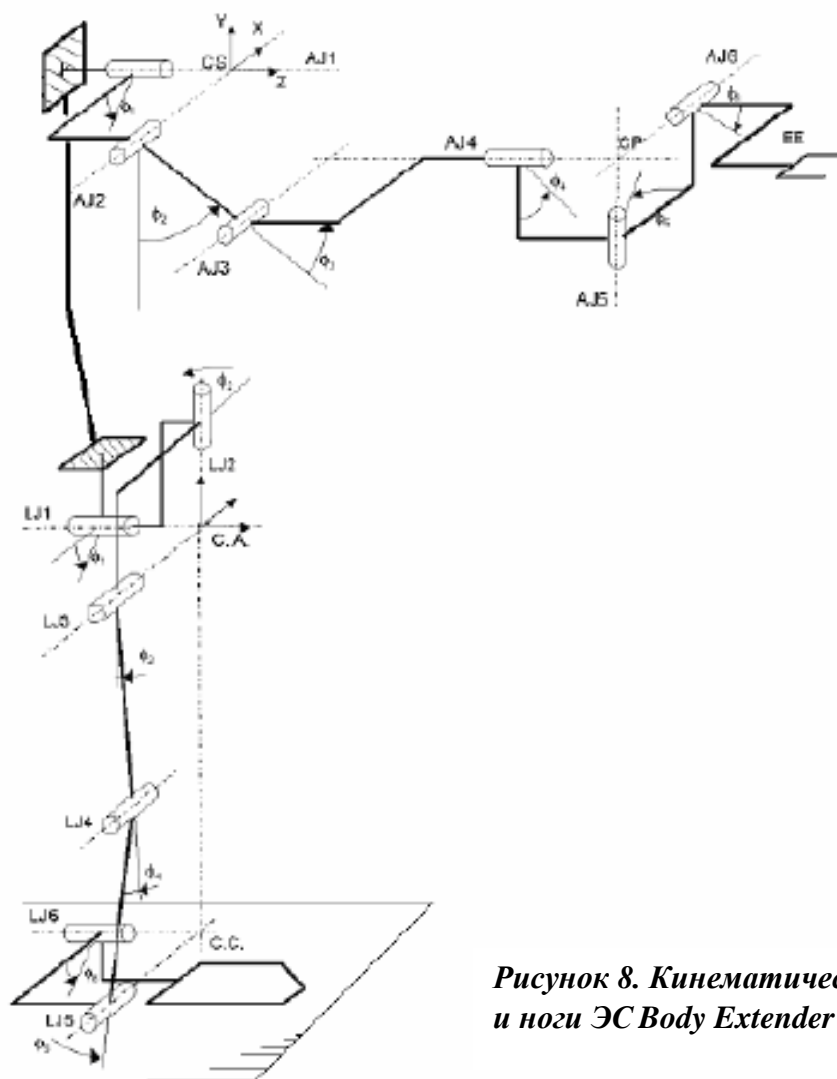
В таблице 1 представлены основные технические характеристики ЭС Body Extender.

Таблица 1.

**Основные технические характеристики ЭС Body Extender**

Характеристика	Значение
Общее число степеней подвижности ЭС	22
Число степеней подвижности каждой роботизированной руки ЭС + число степеней подвижности захватного устройства	4+1
Число степеней подвижности каждой роботизированной ноги ЭС	6
Номинальная грузоподъемность каждой руки ЭС	~ 50 кг
Номинальное усилие захвата	1700 Н
Номинальная угловая скорость сочленений ЭС	60 град/с
Диапазон повышения физических возможностей оператора	3 – 20 раз
Общая масса ЭС	160 кг
Источник питания	13 АКБ, 78 В
Время автономной работы	8 ч

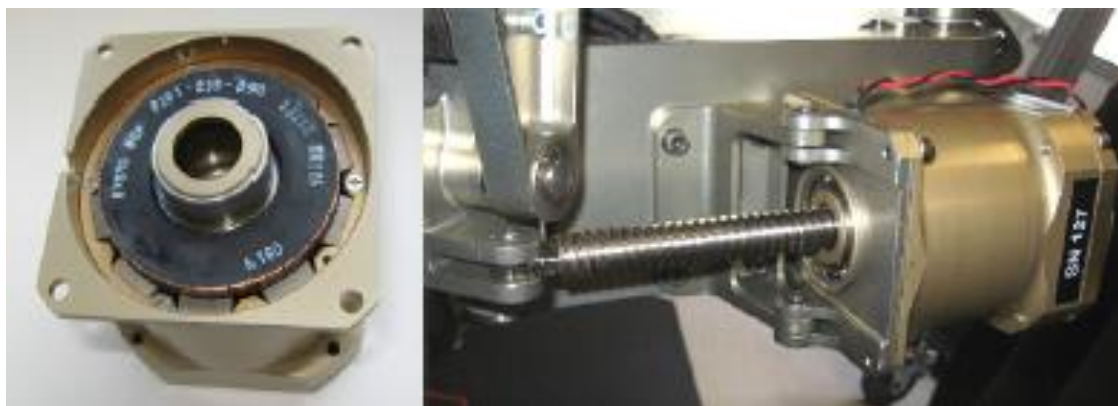
Для снижения сложности устройства была выбрана упрощенная кинематическая схема ног и рук ЭС (рисунок 8) с исключением избыточных степеней подвижности с относительно небольшим размахом движений (вращение плеча или голеностопа).



**Рисунок 8. Кинематическая схема руки и ноги ЭС Body Extender**

Оси сочленений ЭС совпадают с соответствующими осями суставов человека, т. е. кинематика роботизированной руки или ноги ЭС по существу изоморфна кинематике конечностей человека. Движения зажима-разжима захватного устройства реализуются посредством параллелограммного передаточного механизма, который обеспечивает перемещение подвижного схвата относительно фиксирующих пальцев.

Каждая из степеней подвижности ЭС, за исключением проносупинации предплечья (вращательные движения внутрь и наружу), реализуется посредством линейного электропривода, в состав которого входят коммерчески доступный бескорпусный моментный двигатель с постоянными магнитами из сплавов редкоземельных металлов и графитовыми щетками, инкрементальный энкодер, высокоточная шарико-винтовая пара и два контактных радиально-упорных шарикоподшипника (рисунок 9).



**Рисунок 9. Линейный электропривод для реализации степеней подвижности ЭС Body Extender**

Преобразование линейного перемещения, создаваемого линейным приводом, во вращение сочленений со сравнительно низкими требованиями к размаху движений и крутящему моменту достигается с помощью простой рычажной передачи, воздействующей непосредственно на активлируемое звено экзоскелета.

В таблице 2 приведены основные технические характеристики линейного электропривода, используемого в ЭС Body Extender.

Таблица 2.

**Основные технические характеристики линейного электропривода ЭС Body Extender**

Характеристика	Значение
Масса привода	2,4 кг
Максимальное усилие	8000 Н
Масса двигателя	1,4 кг
Внешний диаметр двигателя	80 мм
Длина двигателя	60 мм
Крутящий момент, пиковое значение	7 Н·м
Максимальный постоянный момент	6 Н·м
Шаг резьбы винта	4 мм
Механический КПД шарико-винтовой передачи	90%

Для сочленений с более высокими требованиями к размаху движений и крутящему моменту преобразование перемещения достигается посредством модуля активации, включающего линейный привод и механизм инновационной конструкции с пантографом, двумя металлическими тросами натяжения и выходным шкивом, соединенным с активлируемым звеном ЭС (рисунок 10).



**Рисунок 10. CAD-модель модуля активации звеньев ЭС Body Extender (без внешнего корпуса)**

Модуль активации разработан в двух размерах (А и В) и используется для активации сочленений конечностей ЭС, ось которых ортогональна продольной оси звена ЭС (рисунок 11).



**Рисунок 11. Три сочленения правой ноги ЭС Body Extender, ось которых ортогональна звеньям ЭС**

В таблице 3 представлены данные об основных технических характеристиках модуля активации звеньев ЭС Body Extender.

Таблица 3.

**Основные технические характеристики модуля активации звеньев ЭС Body Extender**

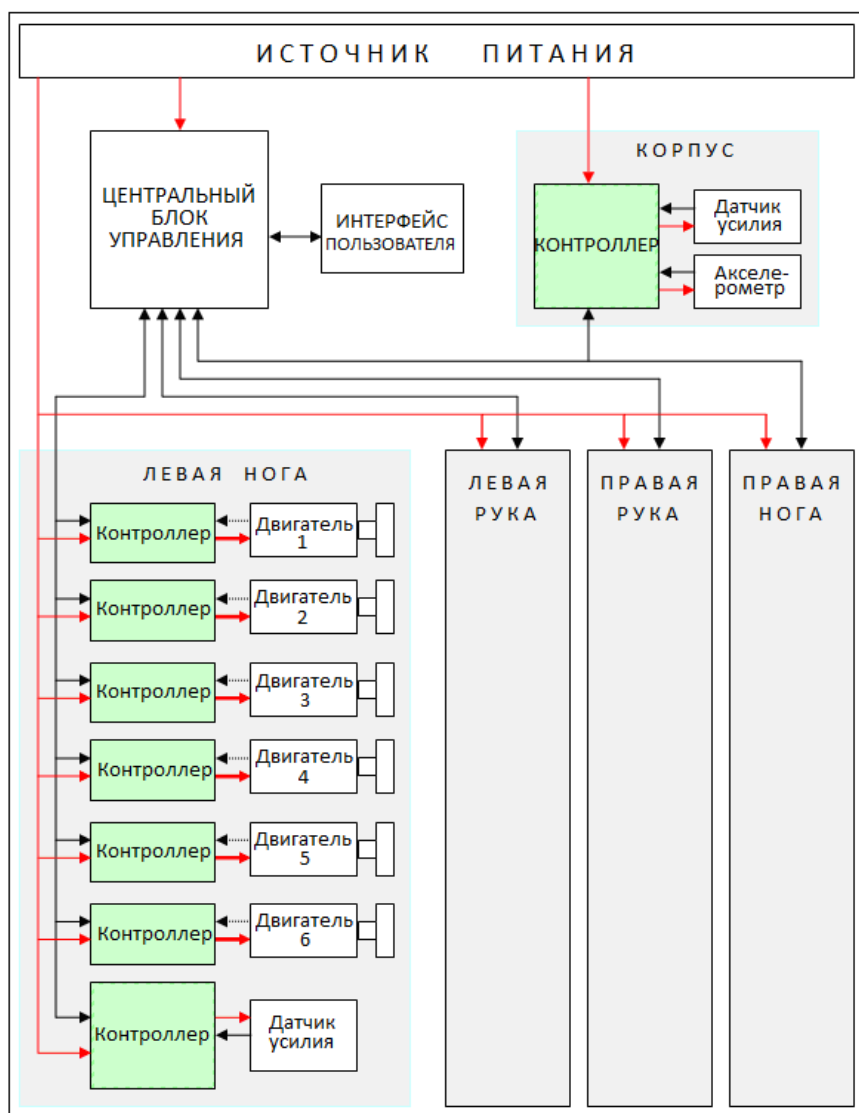
Характеристика	Модуль активации А	Модуль активации В
Размах движений	110 град	90 град
Максимальный постоянный крутящий момент	500 Н·м	270 Н·м
Общее передаточное число (между валом двигателя и сочленением)	102	58
Общая масса модуля	6 кг	5 кг
Механический КПД	85%	н/д
Максимальная жесткость на кручение выходного шкива	25000 Н·м/рад	н/д



Для управления экзоскелетом используются 16 локальных контроллеров, установленных вдоль роботизированных рук и ног ЭС и связанных с центральным блоком управления посредством высокоскоростной шины передачи данных (рисунок 12).

Центральный блок управления (ЦБУ), расположенный в корпусной части ЭС позади оператора, выполняет функцию глобального контроля состояния устройства: вычисляет значения скорости вращения и компенсирующих моментов для контроллеров двигателей каждой из рук и ног экзоскелета. Связь ЦБУ с системами ЭС осуществляется посредством высокоскоростной шины по отдельным линиям для каждой из рук и ног экзоскелета.

Контроллеры обеспечивают вычисления управляющих напряжений, подаваемых на электродвигатели, на основе данных, поступающих от ЦБУ, осуществляют сбор данных всех датчиков и взаимодействуют с ЦБУ посредством шины передачи данных.



**Рисунок 12. Упрощенная архитектура системы управления ЭС Body Extender**

Функционирование контроллеров и электродвигателей экзоскелета обеспечивается внешним источником электропитания на основе 13 последовательно соединенных аккумуляторов с общим выходным номинальным напряжением 78 В и зарядного устройства для подзарядки аккумуляторов, постоянно подключенного к магистральной сети электроснабжения. В случае отсутствия энергии в магистральной сети внешний источник электропитания гарантирует непрерывную автономную работу экзоскелета в течение 8 ч.

Система распределенного управления реализована с помощью промышленной шины передачи данных на базе стандарта EtherCAT, что обуславливает высокую производительность, значительное снижение сложности конфигурации и повышение надежности системы.

Оценка способности ненагруженного ЭС отслеживать перемещения оператора при фиксированных к опорной поверхности стопах показала, что возникающие в сочленениях ЭС силы сопротивления с максимальным значением порядка 30 Н воспринимаются оператором толерантно.

Также было продемонстрировано хорошее распределение масс, создающее приемлемые условия равновесия, позволяющие оператору сохранять естественное положение. Вместе с тем наблюдалось снижение максимальной угловой скорости, а также избыточные силы сопротивления в сочленениях, возникающие во время отслеживания перемещений стоп оператора, что приводило к нарушению естественной походки. В результате оператор вынужден был передвигаться с меньшей, чем обычно, скоростью, что приводило к большему, чем в естественных условиях, смещению центра тяжести экзоскелета в боковом направлении. При этом гарантированное равновесие ЭС наблюдалось только на опорных стадиях ходьбы.

Оценка характеристик захватного устройства показала соответствие номинальной грузоподъемности (50 кг), однако в ходе испытаний была выявлена высокая критичность для оператора сохранения равновесия экзоскелетной конструкции во время работы с грузами массой, близкой к номинальной нагрузке, что объясняется значительным смещением точки нулевого момента системы в случае работы с объектами, масса которых сравнима с массой экзоскелета.

Обеспечение равновесия ЭС является очень сложной задачей: оператор должен значительно менять свое положение и, следовательно, положение ЭС, чтобы точка нулевого момента оказалась внутри опорного многоугольника.

Указанные проблемы требуют дальнейшего исследования и решения. Результирующая команда на изменение положения ЭС вырабатывается на основе данных о намерениях оператора совершить перемещение с учетом условий равновесия ЭС, чтобы гарантировать равновесие в системе «человек-экзоскелет».

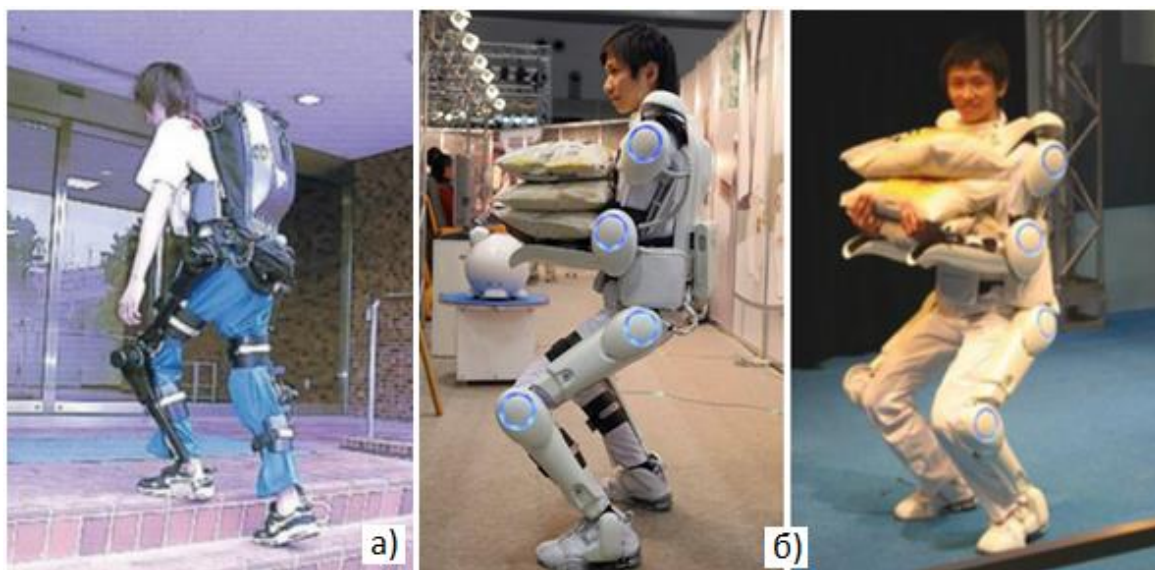
## 2 РАЗРАБОТКА АВТОНОМНЫХ СИЛОВЫХ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ ВЫСОКОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ

Автономные силовые экзоскелеты высокой грузоподъемности представляют собой активные устройства, оснащенные электромеханическими или гидравлическими приводами и бортовыми источниками питания.

### 2.1 Силовой экзоскелет HAL

Первый прототип автономного активного экзоскелета HAL (Hybrid Asistive Limb) был разработан рядом сотрудников Университета Цукуба (Tsukuba University) во главе с профессором Yoshiyuki Sankai в рамках проекта Управления перспективных научных исследований и разработок МО США (DARPA), целью которого было создание экзоскелета для многократного повышения физических возможностей человека – ЕНРА (Exoskeleton for Human Performance Augmentation). В 2004 г. в целях маркетингового продвижения экзоскелета была учреждена компания Cyberdyne Systems Corp.

Наиболее известными модификациями ЭС HAL являются экзоскелет нижних конечностей HAL-3 и экзоскелет верхних и нижних конечностей HAL-5 (рисунок 13).

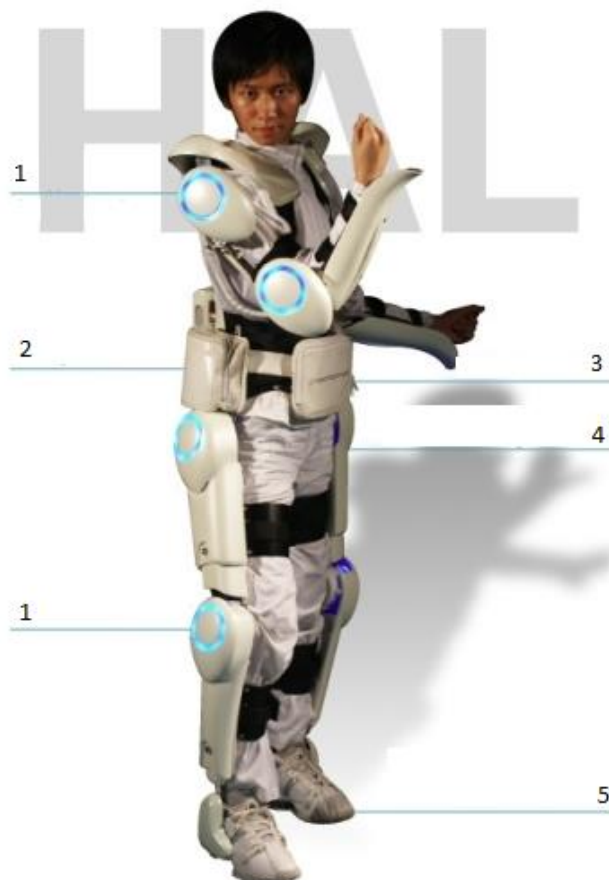


*Рисунок 13 – Автономные активные экзоскелеты: ЭС HAL-3 разработки Университета Цукуба (Tsukuba University), 2004 г. (а); ЭС HAL-5 компании Cyberdyne Systems Corporation, 2012 г. (б)*

Устройства, разработанные первоначально для медицинской реабилитации, представляют собой ЭС силового типа и могут применяться для такелажных и аварийно-спасательных работ (рисунок 13, б).

ЭС HAL-5, основные компоненты которого показаны на рисунке 14, отличается широкой функциональностью и высокой грузоподъемностью, однако представляет собой

технически сложную конструкцию с большим числом степеней подвижности, повышенным энергопотреблением, большой массой, что в значительной мере ограничивает подвижность оператора.



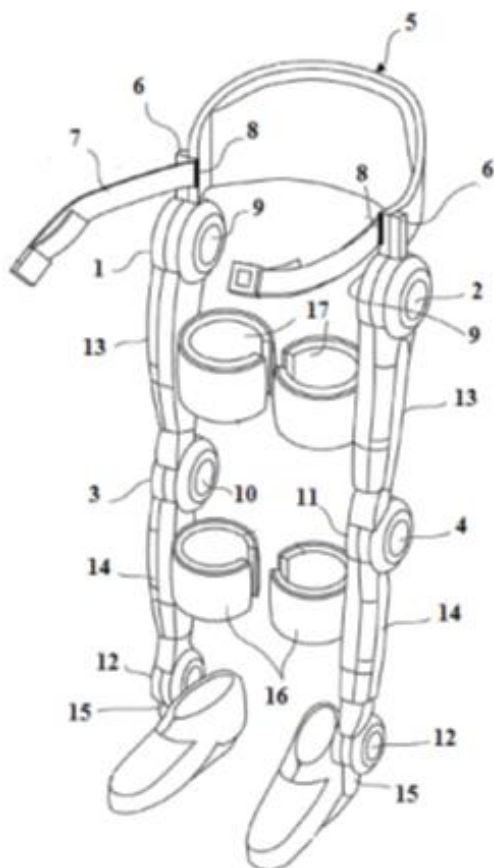
**Рисунок 14. Основные компоненты ЭС HAL-5: 1 – электродвигатель и датчик угла поворота (на основе потенциометра); 2 – блок АКБ; 3 – блок управления (сзади); 4 – датчик биоэлектрических сигналов (на основе электромиографических электродов); 5 – датчик силы реакции опоры**

В состав экзоскелетной конструкции входят звенья рук и ног ЭС, задняя рама, блок управления, встроенный компьютер, портативная система энергоснабжения (АКБ), электродвигатели, рюкзак, ботинки специальной конструкции, крепления в области бедер, голеней и рук, а также поясной ремень. Управление и контроль осуществляются с использованием беспроводной локальной сети.

Электродвигатели постоянного тока установлены непосредственно в шарниры соединений звеньев ЭС, что позволяет упростить и облегчить конструкцию, а также обеспечить более точное согласование кинематических характеристик ЭС и человека.

На рисунке 15 показана конструктивно-компоновочная схема нижней части экзоскелета HAL-5.





**Рисунок 15 – Конструктивно-компоновочная схема нижней части экзоскелета HAL-5: 1, 2, 3, 4 – электродвигатели; 5 – крепежный элемент; 6 – кронштейн; 7 – пояс; 8 – петля; 9, 10, 11, 12 – шарниры; 13, 14 – тазобедренные и голеностопные звенья; 15 – стопы ЭС; 16, 17 – крепления**

Управление ЭС HAL осуществляется посредством электромиографических электродов, расположенных на теле оператора и позволяющих считывать поступающие от мозга биоэлектрические сигналы (БЭС).

Положение туловища человека в пространстве определяется с помощью датчиков угла (потенциометров), установленных в сочленениях ЭС, датчиков силы реакции опоры, установленных в подошвах ботинок, гироскопов и акселерометров, установленных на задней раме ЭС.

Общая масса ЭС HAL составляет 23 кг (масса нижней части – 15 кг), однако конструкция устройства не только обеспечивает компенсацию воздействия нагрузки от самого ЭС, но и увеличение физических возможностей оператора от 2 до 10 раз. Грузоподъемность верхней части ЭС HAL составляет 40 кг, грузоподъемность полного экзоскелета – от 100 до 180 кг.

Принцип работы ЭС состоит в следующем:

1) Мозг оператора ЭС принимает решение о начале движения и транслирует посредством нервных окончаний требуемые сигналы соответствующим мышцам со скоростью 40-110 м/с.

2) Посланные мышцам импульсы проявляются на поверхности кожи как очень слабые биоэлектрические сигналы (биотоки).

3) ЭС HAL считывает поступающие от человеческого мозга БЭС с помощью расположенных на теле оператора специальных датчиков – электромиографических электродов. На основе результатов анализа поступающих данных осуществляется моментальное распознавание типов движений, которые намеревается выполнить оператор.

4) Поддержка мышечных усилий оператора в соответствии с распознанными движениями осуществляется путем совместного использования двух типов систем управления:

- системы произвольного управления (CVC – Cybernic Voluntary Control), с помощью которой на основе анализа БЭС приводится в движение исполнительный механизм ЭС;

- системы автоматического управления (CAC – Cybernic Autonomous Control), с помощью которой ЭС воспроизводит движения оператора на основе библиотеки моделей основных движений при отсутствии БЭС.

Основные преимущества ЭС HAL включают снижение энергозатрат оператора на выполнение действий, высокое совершенство системы управления, модульность и универсальность конструкции, возможность использования более легких и компактных источников питания, обеспечивающих несколько часов автономной работы. Все перемещения экзоскелета осуществляются синхронно с движениями оператора.

Недостатки ЭС HAL включают следующие аспекты:

- сложное конструктивное исполнение ЭС;
- невысокие значения биопотенциалов приводят к сильной зашумлённости сигналов, на основе которых происходит управление;
- высокая сложность системы управления за счёт сложных алгоритмов распознавания управляющих сигналов и определения однозначного соответствия управляющего сигнала и сигналов управления для конкретных исполнительных двигателей;
- невозможность получить значения биотоков со всех мышц;
- длительное время калибровки под конкретного пользователя;
- отсутствие возможности транспортировки грузов (реализована только поддержка груза в статическом состоянии).

## 2.2 Силовой экзоскелет специального назначения Power Assist Suit

Прототип экзоскелета Power Assist Suit, являющегося совместной разработкой компаний Mitsubishi Heavy Industries и Japan Atomic Power Company, был впервые представлен в Токио на международной выставке робототехники IREX 2015 (Japanese International Robotic Exhibition).

Экзоскелет Power Assist Suit (рисунок 16) предназначен для использования в опасных зонах атомных электростанций с целью проведения ремонтных работ или операций, связанных с ликвидацией последствий техногенных аварий.



*Рисунок 16. Экзоскелет Power Assist Suit компаний Mitsubishi Heavy Industries и Japan Atomic Power Company (Япония)*

Основными функциями экзоскелета являются:

- защита оператора от радиоактивного излучения;
- снятие нагрузки с оператора при манипуляциях с тяжелыми предметами, например при переносе роботов с дистанционным управлением или аварийных систем энергоснабжения.

Конструкция ЭС включает два основных компонента: звенья нижних конечностей и корпусную часть, конфигурация которой может выбираться в зависимости от требуемых применений.

ЭС Power Assist Suit оснащен приводами тазобедренных, коленных и голеностопных сочленений с небольшими мощными электродвигателями и миниатюрными контроллерами, а также датчиками давления, встроенными в подошву обуви оператора, данные которых используются для управления приводами ЭС. ЭС крепится к телу оператора только в области бедер и стоп, что позволяет оперативно надевать и снимать устройство. Испытания ЭС Power Assist Suit проводились с участием компании Activelink Panasonic.

В таблице 4 представлены основные технические характеристики экзоскелета Power Assist Suit.

Основные технические характеристики ЭС Power Assist Suit

Характеристика	Значение или описание
Масса ЭС	39 кг
Габариты (длина x ширина x высота)	399 мм x 618 мм x 1498,5 мм
Источник питания	Li-ion АКБ
Грузоподъемность	40 кг
Время автономной работы	2 ч
Скорость передвижения оператора в ЭС с максимальной нагрузкой / без нагрузки	3,0 км/ч / 4,5 км/ч

Компания Mitsubishi Heavy Industries занимается также разработкой версий экзоскелетов на основе ЭС Power Assist Suit, предназначенных для широкого ряда применений.

### 2.3 Силовой экзоскелет Power-Assist Robot Suit

Компания Kawasaki разрабатывает автономный экзоскелет Power-Assist Robot Suit грузоподъемностью 30-40 кг (рисунок 17).



*Рисунок 17. Прототип ЭС Power-Assist Robot Suit компании Kawasaki (Япония)*



ЭС оснащен 4 электроприводами тазобедренных и коленных сочленений. Блок управления и литий-ионная АКБ установлены на раме в поясничной области оператора. ЭС допускает регулировку длины звеньев в соответствии с антропометрическими параметрами пользователя.

#### **2.4 Силовой экзоскелет компании Daewoo**

В 2013 г. компания Daewoo (Республика Корея) разработала автономный экзоскелет нижних конечностей (рисунок 18), ориентированный на применение в судостроении и машиностроении. Грузоподъемность исполнительного механизма составляет 30 кг, рабочим органом для подъёма груза является электромагнит. В экзоскелете используются силовые приводы электрогидравлического типа, в качестве источника энергии – аккумуляторные батареи. Разработчик намерен в дальнейшем совершенствовать технические характеристики устройства.



*Рисунок 18. Автономный экзоскелет нижних конечностей компании Daewoo (Республика Корея)*

### 3 ПОРТАТИВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЭКСОСКЕЛЕТЫ ПАССИВНОГО ТИПА

Принцип действия экзоскелетов пассивного типа, не оснащенных силовыми приводами, основан на разгрузке скелетно-мышечной системы пользователя за счет перераспределения воздействующих сил в специально создаваемой конструкции.

#### 3.1 Экзоскелет верхних конечностей Robo-Mate

Разработка экзоскелета верхних конечностей Robo-Mate промышленного назначения началась в 2013 г. консорциумом из 12 научно-исследовательских институтов и коммерческих предприятий 7 европейских стран.

Основным функциональным назначением ЭС Robo-Mate является поддержка позвоночника оператора, снижение нагрузок при поднятии тяжёлых грузов.

В 2015 г. был создан первый прототип ЭС Robo-Mate (рисунок 19).



*Рисунок 19. Пассивный экзоскелет верхних конечностей Robo-Mate (Европейский союз)*

ЭС увеличивает физические возможности человека в 10 раз, т.е. для поднятия груза массой 10 кг требуется усилие, равное 1 кг·с. Специальная конструкция заднего модуля экзоскелета обеспечивает разгрузку позвоночника (рисунок 20).



*Рисунок 20. Задний модуль ЭС Robo-Mate обеспечивает разгрузку позвоночника оператора*

### 3.2 Экзоскелет Chairless Chair

Пассивный экзоскелет Chairless Chair (рисунок 21) является совместной разработкой компаний Noonee (Швейцария) и Audi (Германия) и предназначен для использования в промышленности, в частности рабочими сборочных и производственных линий.



*Рисунок 21. Промышленный экзоскелет нижних конечностей Chairless Chair совместной разработки компаний Noonee (Швейцария) и Audi (Германия)*

ЭС позволяет выбирать и фиксировать положение тела оператора с помощью гидравлического устройства, что помогает поддерживать правильную осанку при выполнении сборочных операций и существенно снижает физические усилия, необходимые для сохранения выбранного положения.

Исполнительный механизм ЭС первого поколения крепится к бёдрам, коленям и лодыжкам оператора. Силовые элементы каркаса изготовлены из углеродного волокна. Масса ЭС составляет 2,4 кг.

В феврале 2015 г. первые три прототипа экзоскелета прошли испытания на заводе компании Audi в Неккарзульме (Neckarsulm).

В 2018 г. компания Noonee представила экзоскелет 2-го поколения Chairless Chair 2.0 (рисунок 22).



*Рисунок 22. Экзоскелет 2-го поколения Chairless Chair 2.0 компании Noonee (Швейцария)*

Экзоскелет Chairless Chair 2.0 отличается следующими характеристиками:

- подходит для пользователей весом до 130 кг и ростом от 150 м до 195 м;
- большая гибкость конструкции позволяет регулировать высоту сидения и оперативно переходить к режимам сидения, стояния и ходьбы, а также позволяет поднимать предметы с пола;
- не ухудшает мобильность пользователя;
- снижает воздействие нагрузки на 25%;
- снижает давление на колени и стопы пользователя на 65%;
- более эргономичная и комфортная конструкция обеспечивает поддержку правильной осанки;
- применены новые материалы для текстильных элементов ЭС – жилета, пояса, ремней и подушек сидения;
- облегченные соединители ЭС с ботинками пользователя снабжены резиновыми элементами для более гибкого и надежного соединения;
- доступны 2 размера жилета с 4 точками фиксации с поясом ЭС;
- достигнута более высокая прочность и надежность ЭС;
- время надевания и снятия ЭС без посторонней помощи составляет менее 1 мин;
- масса ЭС без текстильных элементов составляет 3,3 кг.

Перечисленные характеристики ЭС обеспечивают повышение производительности труда за счет снижения нагрузки на ноги и спину операторов.

ЭС не позволяет передвигаться по лестницам и становиться на колени.

В настоящее время ЭС применяется более чем в 100 компаниях.

### **3.3 Экзоскелеты компании Ottobock**

Компанией Ottobock (Германия) разработан ряд пассивных экзоскелетов серии Раехо, включая ЭС Раехо Shoulder и ЭС Раехо Back, которые предназначены для поддержки плечевого пояса и спины пользователя (рисунок 23).



*Рисунок 23. ЭС Раехо Shoulder (слева)  
и ЭС Раехо Back (справа) компании Ottobock (Германия)*



ЭС Раехо Shoulder обеспечивает поддержку плечевого пояса и верхних конечностей оператора, выполняющего работы с поднятыми руками, например на сборочных линиях предприятий или в строительстве. Анализ характеристик экзоскелета, проведенный в ряде научных исследований, показал эффективность его применения.

Масса ЭС Раехо Shoulder составляет 1,9 кг. ЭС не ограничивает диапазон движений оператора, позволяет свободно перемещаться или сидеть, а также поднимать предметы. Время надевания или снятия ЭС Раехо Shoulder составляет менее 20 с.

ЭС Раехо Back, разработанный в тесном сотрудничестве с экспертами и работниками логистических компаний, снимает нагрузку с плечевого пояса, перенося ее на бедра пользователя, облегчает выполнение такелажных работ, связанных с подъемом и переносом грузов (рисунок 24).



*Рисунок 24. ЭС Раехо Back компании Ottobock*

В бедренном звене ЭС использована система механического контроля, способная идентифицировать режим наклона пользователя и автоматически отключаться в режиме ходьбы для обеспечения полной свободы передвижения.

Уровень поддержки может регулироваться в зависимости от вида выполняемых работ. Экзоскелетная конструкция способна снимать нагрузку массой до 25 кг.

Масса ЭС Раехо Back составляет 4 кг, время надевания или снятия экзоскелета – менее 20 с.

### **3.4 Разработки компаний Франции**

#### **3.4.1 Экзоскелеты компании Exhauss**

Компания Exhauss (Франция) занимается разработкой, производством и продажей экзоскелетных конструкций промышленно-строительного назначения двух серий: Exhauss System (рисунок 25) и Exhauss Picker (рисунок 26).



*Рисунок 25. Экзоскелеты серии Exhauss System компании Exhauss (Франция)*



*Рисунок 26. Экзоскелеты серии Exhauss Picker компании Exhauss (Франция)*

Экзоскелеты отличаются модульной конструкцией, могут создаваться в соответствии с требованиями заказчика и предназначены для снижения мышечных усилий пользователя при подъеме или удержании объектов на уровне груди или с поднятыми вверх руками и выполнении различных манипуляций. Уровень поддержки зависит от положения рук пользователя.

#### **3.4.2 Экзоскелет компании Ergosante Technologie**

Компания Ergosante Technologie производит экзоскелет ShivaExo (рисунок 27), предназначенный для предотвращения травм опорно-двигательного аппарата рабочих производственных и сборочных линий промышленных предприятий. ЭС является пассивным полностью механическим устройством, в котором используются стекловолоконные пружины, более легкие и прочные, чем их аналоги из стали, что создает равномерное тяговое усилие в руке ЭС.

ЭС адаптируется в соответствии с антропометрическими параметрами пользователей и подходит для любых типов сложения. Конструкция экзоскелета переносит массу нагрузки с плечевого пояса и спины на бедра пользователя. Модульность конструкции

дает возможность использовать только руки, корпусную часть или всю систему в целом. В ЭС предусмотрены два диапазона амплитуд движений рук экзоскелета: для горизонтальных манипуляций с объектами и для работы с поднятыми вверх руками.



*Рисунок 27. Экзоскелет ShivaExo компании Ergosante Technologie (Франция)*

### **3.5 Экзоскелет Mate компании Comau**

Промышленный пассивный экзоскелет Mate компании Comau (Италия) является коммерчески доступным устройством, обеспечивающим 7 уровней поддержки для разгрузки плечевого пояса и рук рабочих, выполняющих повторяющиеся операции. Масса ЭС составляет 4 кг. В ЭС используется комбинация сочленений вращательного и скользящего типа для достижения точного согласования движений рук и плеч пользователя (рисунок 28).

Разработчики предусмотрели возможность регулировки размера ЭС в области плечевого пояса в соответствии с антропометрическими параметрами пользователей.



*Рисунок 28. Пассивный экзоскелет Mate компании Comau (Италия)*

Применение ЭС позволяет снизить мышечные усилия в области плечевого пояса на 30%.



### 3.6 Экзоскелеты компании Cyber Human Systems

Компания Cyber Human Systems (Испания) производит ряд пассивных портативных экзоскелетов промышленного и строительного назначения.

Экзоскелет верхних конечностей Besk B обеспечивает поддержку предплечий оператора, сохранение правильной осанки, снижение нагрузок и усталости при продолжительном выполнении повторяющихся работ руками в горизонтальном положении или операций по горизонтальному перемещению грузов (рисунок 29).



*Рисунок 29. ЭС Besk B разработки компании Cyber Human Systems (Испания)*

Экзоскелет верхних конечностей Besk G обеспечивает поддержку предплечий оператора, сохранение правильной осанки, снижение нагрузок и усталости при продолжительном выполнении статичных работ с поднятыми руками или операций по горизонтальному перемещению грузов (рисунок 30).



*Рисунок 30. ЭС Besk G разработки компании Cyber Human Systems (Испания)*

Экзоскелеты обеих модификаций имеют массу 3 кг, характеризуются независимой регулировкой звеньев, имеют съемные фиксаторы, регулируемые в соответствии с размерами текстильной части ЭС, и снимают нагрузку массой от 3 кг до 12 кг.

Экзоскелет Aldak (рисунок 31) применяется для снижения нагрузок и вероятности травм скелетно-мышечной системы пользователя при выполнении повторяющихся работ по подъему тяжелых грузов или удержанию заданных положений. ЭС снимает нагрузку массой от 5 кг до 15 кг.



*Рисунок 31. ЭС Aldak разработки компании Cyber Human Systems (Испания)*

Время надевания ЭС без посторонней помощи составляет менее 1 мин. ЭС имеет съемные фиксаторы, регулируемые вручную в соответствии с размерами текстильной части экзоскелета.

### **3.7 Экзоскелет компании Laevo**

Компания Laevo (Нидерланды) производит пассивные экзоскелеты для широкого ряда применений в промышленности, строительстве, логистике и других областях, где выполняются повторяющиеся работы с наклонами корпуса или в наклонном положении. ЭС модификации Laevo 2, прошедший многочисленные испытания и отработку в различных условиях, обеспечивает предотвращение травм спины за счет переноса части нагрузки с грудного отдела на бедра пользователя при выполнении наклонов вперед, удержании наклонного положения и возврате в вертикальное положение, а также при подъеме грузов (рисунок 32).



*Рисунок 32. ЭС Laevo 2 компании Laevo (Нидерланды)*

Экзоскелет позволяет или частично поддерживает возможность становиться на колени, приседать, ходить, выполнять скручивающие движения, тянуться вверх и в стороны. ЭС Laevo 2 легко надевается и снимается, регулируется с помощью ремней в соответствии с антропометрическими параметрами пользователей. Масса ЭС составляет 2,8 кг. ЭС изготовлен с применением гелевых материалов, синтетических тканей, полипропилена. Одним из компонентов ЭС являются газовые пружины.



### 3.8 Экзоскелеты компании Hyundai Rotem

В 2018 г. компанией Hyundai Rotem (входит в группу компаний Hyundai Motor Group, Республика Корея) были разработаны пассивные экзоскелеты промышленного назначения H-VEX (Hyundai Vest EXoskeleton) и H-CEX (Hyundai Chairless Exoskeleton), использование которых предотвращает травмы скелетно-мышечной системы операторов сборочных линий автомобилестроительных предприятий, повышает выносливость и производительность труда.

ЭС H-VEX массой 2,5 кг обеспечивает поддержку плечевого пояса и шеи оператора, снижая энергозатраты на 30% и существенно облегчая выполнение монотонных сборочных операций с поднятыми руками (рисунок 33).



*Рисунок 33. Промышленный экзоскелет H-VEX компании Hyundai Rotem (Республика Корея)*

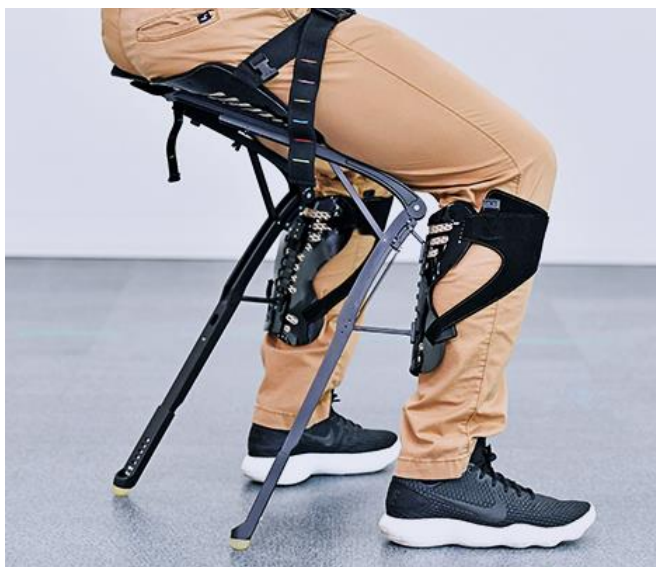
ЭС регулируется по длине задней вертикальной секции в диапазоне 18 см и задней горизонтальной секции в соответствии с антропометрическими параметрами пользователя, а также по углам поворота плечевых секций в диапазоне  $-100^{\circ} - 70^{\circ}$  (рисунок 34).



*Рисунок 34. Регулировка промышленного экзоскелета H-VEX по длине задней вертикальной и горизонтальной секций, а также углам поворота плечевых секций*

Экзоскелет отличается полицентрической конструкцией плечевого сочленения, имитирующей движения в плече при подъеме рук пользователя. В аналогичных экзоскелетах других производителей применяется одноосная конструкция плечевого сочленения, значительно уступающая полицентрической конструкции ЭС Н-VEX с несколькими центрами вращения и четырехзвенной поддержкой плечевого пояса, регулируемой по шести уровням в соответствии с требованиями рабочего процесса до максимального значения 5,5 кг·с. Оператор весом 80 кг в ЭС Н-VEX поднимает груз массой 3 кг без каких-либо усилий.

Промышленный экзоскелет Н-СЕХ массой 1,8 кг дает возможность выполнения работы в сидячем положении без использования табурета или стула, обеспечивая поддержку спины, таза и нижних конечностей оператора весом до 150 кг, а также снижение мышечных энергозатрат на 40% (рисунок 35).



*Рисунок 35. Промышленный экзоскелет Н-СЕХ компании Hyundai Rotem (Республика Корея)*

Экзоскелет может регулироваться по высоте и углу наклона сидения ( $85^{\circ}/70^{\circ}/55^{\circ}$ ). Успешные испытания ЭС Н-СЕХ были проведены в 2018 г.

На рисунке 36 показаны операторы сборочной линии в экзоскелетах Н-VEX и Н-СЕХ.



*Рисунок 36. Операторы сборочной линии: в экзоскелете Н-VEX (слева) и в экзоскелетах Н-VEX и Н-СЕХ (справа)*

Экзоскелеты предназначены для применения не только в автомобилестроительной отрасли, в частности на сборочных линиях компаний Hyundai Motor Group, но и в других областях, например строительстве, а также на ремонтных и производственных предприятиях оборонной промышленности.

В 2019 г. началась эксплуатация пилотных образцов ЭС VEX на американских предприятиях компании Hyundai Motor Manufacturing в шт. Алабама и компании Hyundai Kia в шт. Джорджия (США), коммерческое производство началось в конце 2019 г. на предприятии компании Hyundai Rotem. Разработчики ЭС VEX провели сравнение характеристик разработанного устройства с аналогичными характеристиками ЭС EksoVest компании Ekso Bionics (США) и ЭС Airframe компании Lavitate Tech. (США).

Полученные данные представлены в таблице 5.

Таблица 5.

**Сравнительные характеристики промышленных экзоскелетов для поддержки плечевого пояса VEX, EksoVest и Airframe (данные 2019 г.)**

Характеристика	Экзоскелеты		
	VEX (Hyundai Kia)	Airframe (Lavitate Tech.)	EksoVest (Ekso Bionics)
Масса	2,5 кг	3,2 кг	4,3 кг
Диапазон регулировки длины задней секции	18 см	16 см	12 см
Уровень поддержки (создаваемый момент силы)	1-6 (Уровень 3: 6,5 Н·м)	1-5 (Уровень 3: 5,5 Н·м)	1-4 (Уровень 3: 4,0-5,4 Н·м)
Диапазон регулировки углов поворота	-100° ~ 70°	-90° ~ 45°	-90° ~ 45°
Механизм плечевого сочленения	Полицентрический	Одноосный	С избыточными степенями подвижности
Цена	3000 \$ (расчётная)	4000 \$	5000 \$

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что по всем характеристикам экзоскелет VEX превосходит экзоскелеты-аналоги EksoVest и Airframe. Цена ЭС будет снижаться по мере роста объемов их производства.

### 3.9 Экзоскелет Fraco компании Mawashi

Экзоскелет Fraco компании Mawashi (Канада), разработавшей пассивный ЭС военного назначения Uprise, предназначен для использования в строительстве и промышленности.

Впервые ЭС Fraco был продемонстрирован на Международной строительной выставке «Мир бетона» (World of Concrete), проходившей в Лас-Вегасе (США) в 2020 г. (рисунок 37).



***Рисунок 37. Экзоскелет Fraco компании Mawashi (Канада), представленный на выставке «Мир бетона» в 2020 г.***

ЭС Fraco оснащен гибридной системой пассивных и квазипассивных механизмов поддержки верхних конечностей, что снижает мышечное напряжение и усталость, не ограничивая при этом диапазон движений рук при использовании инструментов и строительных материалов.

Основными функциональными и техническими характеристиками квазипассивного механизма поддержки верхних конечностей (рисунок 38) являются:

- быстрая блокировка или разъединение плечевых и локтевых сочленений ЭС;
- поддержка веса строительных блоков, инструментов и рук пользователя за счет компенсации силы тяжести;
- создание моментов силы до 1 Н·м в плечевых и локтевых сочленениях экзоскелета;
- поддержка грузов массой до 6,8 кг в каждой полностью вытянутой руке;
- поддержка грузов массой до 11,8 кг в каждой руке, согнутой в локтевом суставе;
- низкое энергопотребление;
- автономная работа в течение нескольких дней при выполнении стандартных задач по укладке строительных блоков;
- совместимость с Li-ion АКБ.



***Рисунок 38. Поддержка рук пользователя в ЭС Fraco компании Mawashi (Канада)***



Основными функциональными и техническими характеристиками пассивного механизма поддержки верхних конечностей в ЭС Fraso являются:

- использование оптимизированного пружинно-кулачкового механизма;
- создание моментов силы до 27,5 Н·м в плечевом сочленении и 17,5 Н·м в локтевом сочленении при подъеме строительных материалов и инструментов;
- поддержка грузов массой до 4,8 кг в каждой полностью вытянутой руке;
- поддержка грузов массой до 4,8 кг в руке, согнутой в локтевом суставе.

Экзоскелет Fraso компании Mawashi является одним из примеров использования в гражданской сфере технологий экзоскелетных конструкций, разработанных изначально по заказу военных ведомств для оборонных применений.

### 3.10 Разработки компаний США

#### 3.10.1 Экзоскелеты компании Ekso Bionics

Компания Ekso Bionics (ранее – компании Berkeley Bionics, Berkeley ExoWorks) разработала ряд экзоскелетов, ориентированных на промышленное применение, но представляющих интерес для военного использования в качестве такелажных устройств.

На рисунке 39 (слева) показан пассивный промышленный экзоскелет нижних конечностей Ekso Works, представленный компанией в 2015 г. Одной из ключевых особенностей исполнительного механизма ЭС является блокировка коленных сочленений при стационарном положении оператора, что позволяет уменьшить нагрузку в процессе выполнения работ. Расчёты экономической эффективности подтвердили целесообразность применения экзоскелета, что во многом объясняется большим размером установленных американским законодательством выплат работнику, получившему производственную травму.



*Рисунок 39. ЭС нижних конечностей Ekso Works (слева)*

*и ЭС верхних конечностей EksoVest (справа) компании Ekso Bionics*



На рисунке 39 (справа) показан промышленный экзоскелет верхних конечностей EksoVest. Компания Ekso Bionics приступила к его испытаниям на заводах автомобильного концерна Ford в 2017 г. Устройство, предназначенное для операторов ростом от 152 см до 195 см, облегчает труд мастеров на сборочных линиях, а также способствует поддержке рук и плечевого пояса при работе с грузами массой от 2,3 кг до 6,8 кг в каждой руке. При длительной работе с поднятыми руками экзоскелет может фиксироваться, поддерживая на весу верхние конечности. Масса EksoVest составляет 4,3 кг.

### ***3.10.2 Модульный экзоскелет MAX компании US Bionics***

В ноябре 2016 г. компания US Bionics, Inc. (торговая марка SuitX) представила пассивный модульный экзоскелет промышленного назначения MAX (Module Agile eXoskeleton), обеспечивающий поддержку спины, верхнего плечевого пояса и нижних конечностей оператора при выполнении повторяющихся или тяжелых физических работ (рисунок 40).



***Рисунок 40. Экзоскелет MAX компании US Bionics, Inc. (SuitX)***

Экзоскелет состоит из трех модулей – BackX, ShoulderX и LegX, каждый из которых может применяться отдельно или в любых комбинациях в зависимости от выполняемых задач.

Результаты интенсивных испытаний и оценок характеристик экзоскелета MAX, проведенных в Калифорнийском университете, показали значительное снижение мышечных усилий оператора при выполнении различных энергозатратных работ.

Модуль поддержки спины (BackX) снижает нагрузку на позвоночник и поясницу, облегчает подъем тяжелых грузов, снижает мышечные усилия и повышает выносливость, обеспечивая в среднем уменьшение нагрузки на 60 %.

Модуль поддержки верхнего плечевого пояса ShoulderX V3 является усовершенствованной экзоскелетной конструкцией 3-го поколения, автоматически адаптирующейся в соответствии с антропометрическими параметрами пользователя. Масса модуля ShoulderX V3 уменьшилась на 40% сравнительно с устройством предыдущего поколения. Модуль облегчает выполнение работ с поднятыми руками, имеет одну или две регулируемые подставки под плечи, которые можно использовать как упоры.

Модуль поддержки нижних конечностей LegX снижает нагрузку на коленные суставы пользователя и также адаптируется к его антропометрическим параметрам. Интеллектуальная система управления с помощью встроенных датчиков распознает тип движений оператора и создает требуемый уровень поддержки.

Масса полного комплекта MAX составляет от 10,9 кг до 12,9 кг в зависимости от установленных на модули дополнительных приспособлений. В пассивном экзоскелете MAX не применяются силовые приводы и электромоторы, однако встроенные микроконтроллеры позволяют определять вид нагрузки и обеспечивать ее равномерное распределение.

Экзоскелет MAX является коммерчески доступным продуктом. В военной сфере экзоскелет может использоваться для такелажных работ.

### ***3.10.3 Экзоскелет FORTIS корпорации Lockheed Martin***

Экзоскелет FORTIS (FORTIS® – зарегистрированный товарный знак) представляет собой легкую пассивную конструкцию, снижающую энергозатраты оператора при переносе тяжелых грузов на большие дистанции или использовании тяжелых инструментов. Подвижный жесткий каркас равномерно распределяет нагрузку и оснащается «рукой-манипулятором», позволяющим удерживать тяжелые инструменты (рисунок 41).



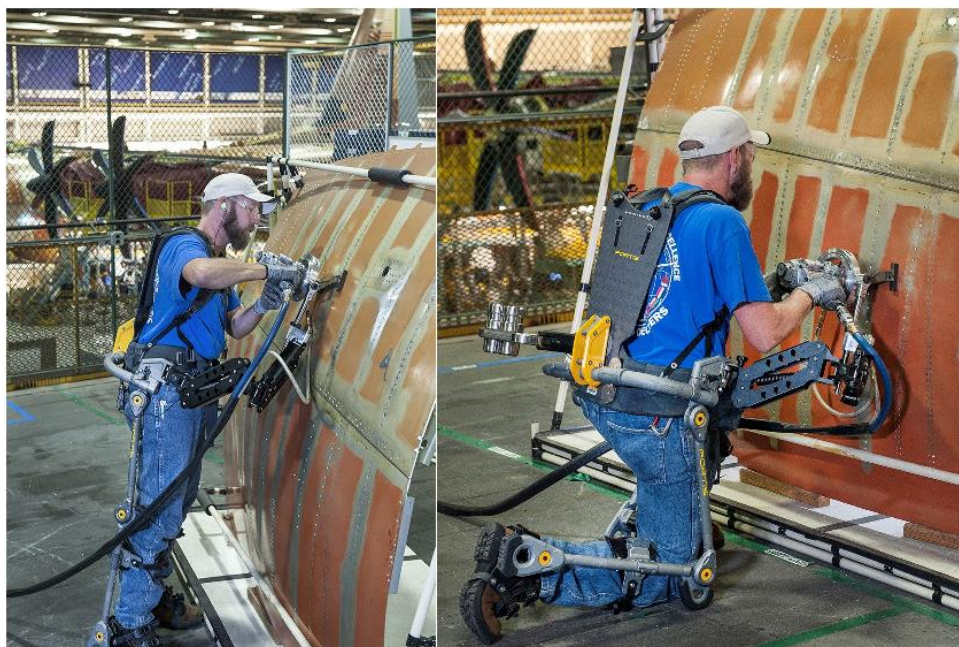
***Рисунок 41 – Оператор в экзоскелете FORTIS корпорации Lockheed Martin (слева); рука-манипулятор (справа)***

В настоящее время ЭС FORTIS доступны для применения в промышленности, строительстве и аварийно-спасательных работах (рисунок 42).



*Рисунок 42. Применение ЭС FORTIS в аварийно-спасательных работах*

ВМС США были приобретены два ЭС FORTIS для ремонта и технического обслуживания кораблей. Экзоскелет используется также на производственной линии компании Lockheed Martin Aeronautics по созданию военно-транспортного самолета С-130J в Мариетте, шт. Джорджия, США (рисунок 43). Рассматривается также возможность его применения на других предприятиях корпорации.



*Рисунок 43 – Применение ЭС FORTIS  
на предприятии компании Lockheed Martin Aeronautics*



## 4 ПОРТАТИВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЭКЗОСКЕЛЕТЫ АКТИВНОГО ТИПА

Активные экзоскелеты оказывают поддержку и усиливают движения операторов при выполнении физических работ за счет использования силовых приводов различного типа.

### 4.1 Разработки компаний Японии

#### 4.1.1 Экзоскелеты компании *Atoun Panasonic*

Компания *Atoun Panasonic* (ранее – *ActiveLink Panasonic*) – известный разработчик и производитель промышленных экзоскелетов. Для строителей и рабочих складских подразделений компанией *ActiveLink Panasonic* в 2015 г. был разработан автономный экзоскелет AWN-02 (рисунок 44), обеспечивающий поддержку при сгибании и разгибании оператора с грузом в руках.



**Рисунок 44 – Автономный экзоскелет спины AWN-02 компании *ActiveLink Panasonic* (Япония)**

Масса ЭС AWN-02 без АКБ немного превышает 7 кг, грузоподъемность составляет 15 кг, время автономной работы от одной литий-ионной батареи – 2,5 ч.

Позднее была разработана более совершенная модель экзоскелета AWN-03 (рисунок 45), снижающего нагрузку при подъеме или опускании тяжелых грузов за счет генерации крутящего момента в области бедренных сочленений и разгрузки спины пользователя.



**Рисунок 45. Автономный ЭС AWN-03 компании ActiveLink Panasonic (Япония)**

Масса ЭС была уменьшена на 1 кг за счёт применения в конструкции исполнительного механизма углеродного волокна, а время автономной работы увеличилось до 8 ч (таблица 6).

Таблица 6.

### **Основные технические характеристики ЭС AWN-03**

<b>Характеристика</b>	<b>Значение или описание</b>
Масса (без АКБ и ремней)	6 кг
Внешние габариты (высота x ширина x глубина)	80 см x 48 см x 27 см
Режимы работы	Подъем и перенос грузов
Двигатель	2 двигателя переменного тока с большим крутящим моментом
Максимальное усилие (двух двигателей)	15 кг·с
Источник питания	1 литий-ионная АКБ напряжением 48,1 В
Время работы	8 ч

Созданная позднее модификация ЭС AWN-03В отличалась более компактными габаритами, повышенной пыле- и влагозащищенностью (IP55), более точным отслеживанием движений оператора, способностью к изменению формы для доступа оператора в узкие пространства, усовершенствованной системой ремней, однако в июне 2019 г. эта модель была снята с производства.



В настоящее время компания Atoun Panasonic производит ЭС AWN-12, который снижает нагрузку на пользователя при подъеме тяжелых грузов за счет использования мощных двигателей, а также датчиков, снимающих данные о параметрах движения пользователя (рисунок 46).



**Рисунок 46. Автономный ЭС AWN-12 (модель Y) компании Atoun Panasonic (Япония)**

Рама ЭС выполнена из легкого и прочного углепластика.

В ЭС осуществляется автоматическое переключение между 3 режимами в зависимости от положения пользователя: режим поддержки при переходе из наклонного положения пользователя с грузом в вертикальное положение, режим отключения двигателей в режиме ходьбы, режим поддержки при переходе в наклонное положение. Кроме того, в устройстве реализовано независимое управление двигателями, установленными в правой и левой частях ЭС.

В таблице 7 представлены основные технические характеристики ЭС AWN-12.

Таблица 7.

Основные технические характеристики ЭС AWN-12 (модель Y)

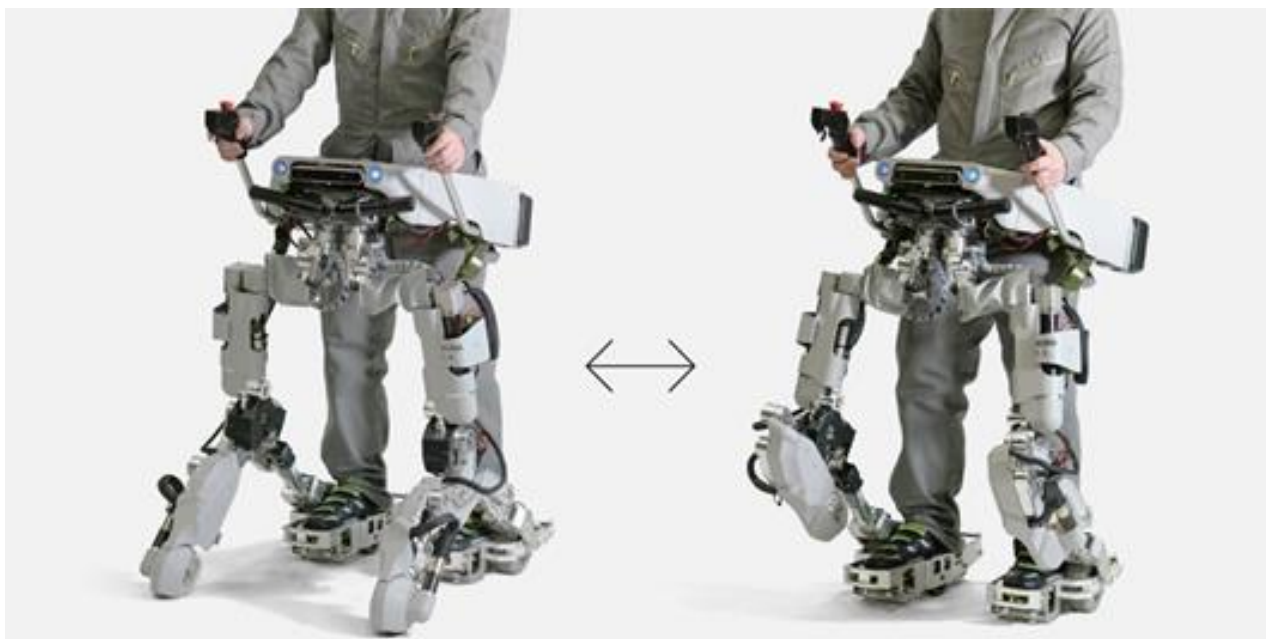
Характеристика	Значение или описание
Масса (включая АКБ)	4,5 кг
Внешние габариты (высота x ширина x глубина)	81 см x 48,4 см x 28 см
Режимы работы	Подъем и перенос грузов
Двигатель	2 двигателя переменного тока
Максимальное усилие (двух двигателей)	10 кг·с
Диапазон рабочих температур	0°C – 40°C
Степень пыле- и влагозащиты	IP55
Время работы	4 ч
Рост пользователя	150 см – 190 см

В настоящее время в разработке компании находятся следующие экзоскелетные конструкции:

- ЭС Atoun модели Y, дополненный защитными перчатками, который предназначен для поддержки поясничной области и рук пользователя (рисунок 47, слева);
- ЭС HIMICO, предназначенный для поддержки пользователя в режиме ходьбы (рисунок 47, справа);
- ЭС Koma 1.5, предназначенный для преодоления препятствий (рисунок 48);
- ЭС Tabito 3.0, предназначенный для передвижения на местности любых типов (рисунок 49).



**Рисунок 47. Прототипы ЭС Atoun Y (слева) и ЭС HIMICO (справа) компании Atoun Panasonic (Япония)**



**Рисунок 48. Прототип ЭС Koma 1.5 компании Atoun Panasonic (Япония)**



*Рисунок 49. Прототип ЭС Tabito 3.0 компании Atoun Panasonic (Япония)*

#### **4.1.2 Экзоскелеты компании Innophys**

Коммерчески доступный активный экзоскелет Muscle Upper компании Innophys (Япония) обеспечивает поддержку спины и рук оператора при подъеме и переносе грузов за счет использования искусственных мышц (мышц Маккибена), активируемых сжатым воздухом (рисунок 50).



*Рисунок 50. Активный экзоскелет Muscle Upper компании Innophys (Япония)*

В таблице 8 приведены основные технические характеристики ЭС Muscle Upper.

Основные технические характеристики ЭС Muscle Upper

Характеристика	Значение или описание
Габариты (высота x ширина x глубина)	920 мм x 830 мм x 310 мм
Масса	8,1 кг
Привод	Пневматический привод с искусственными мышцами Маккибена
Метод подачи сжатого воздуха	Внешний источник с 2 компрессорами (функционирует при давлении 0,5 МПа; рекомендуемый уровень давления – 0,8 МПа)
Уровень шума	не более 70 dBA
Развиваемые усилия	до 35,7 кг·с (140 Н·м)
Диапазон рабочих температур	5-35°C
Область поддержки	Руки и спина
Рост пользователя	160-185 см

Коммерчески доступный экзоскелет Muscle suite (рисунок 51) представляет собой активное устройство для снижения мышечных усилий пользователя при поднятии грузов. Активация приводов осуществляется с помощью сжатого воздуха (баллон высокого давления устанавливается в задней части экзоскелета). Возможно также использование внешней компрессорной установки.



Рисунок 51. Активный экзоскелет Muscle Suit компании Innophys (Япония)

В настоящее время компания Innophys производит три версии экзоскелета Muscle Suit, обеспечивающих различные уровни поддержки: Muscle Suit Every (рисунок 52), Muscle Suit Power (рисунок 53) и Muscle Suit Edge (рисунок 54).



*Рисунок 52. Активный экзоскелет Muscle Suit Every компании Innophys (Япония)*



*Рисунок 53. Активный экзоскелет Muscle Suit Power компании Innophys (Япония)*



*Рисунок 54. Активный экзоскелет Muscle Suit Edge компании Innophys (Япония)*



В таблицах 9, 10, 11 приведены основные технические характеристики ЭС Muscle Suit Every, Muscle Suit Power и Muscle Suit Edge.

Таблица 9.

**Основные технические характеристики ЭС Muscle Every**

Характеристика	Значение или описание
Габариты (высота x ширина x глубина)	805 мм x 465 мм x 170 мм 840 мм x 465 мм x 170 мм
Масса	3,8 кг
Привод	Пневматический привод с искусственными мышцами Маккибена
Метод подачи сжатого воздуха	Ручной пневматический насос
Развиваемые усилия	25,5 кг·с (100 Н·м)
Диапазон рабочих температур	-30°C – 50°C
Степень пыле- и влагозащиты	IP56
Рост пользователя (для двух размеров ЭС)	150 см – 165 см; 160 см – 185 см

Таблица 10.

**Основные технические характеристики ЭС Muscle Suit Power**

Характеристика	Значение или описание
Габариты (высота × ширина × глубина)	810×450×200 мм 900×500×220 мм
Масса	6,6 кг
Привод	Пневматический привод с искусственными мышцами Маккибена
Метод подачи сжатого воздуха	Внешний компрессор (функционирует при давлении 0,5 МПа; рекомендуемый уровень давления – 0,8 МПа) или ручной пневматический насос
Уровень шума (при использовании компрессора)	не более 70 dBA
Развиваемые усилия	25,5 кг·с (100 Н·м)
Диапазон рабочих температур	5°C – 35°C
Область поддержки	Спина
Рост пользователя (для двух размеров ЭС)	150-165 см; 160-185 см

Таблица 11.

**Основные технические характеристики ЭС Muscle Edge**

Характеристика	Значение или описание
Габариты (высота × ширина × глубина)	780×450×175 мм 900×500×195 мм
Масса	4,3 кг
Привод	Пневматический привод с искусственными мышцами Маккибена
Метод подачи сжатого воздуха	Ручной пневматический насос
Развиваемые усилия	25,5 кг·с (100 Н·м)
Диапазон рабочих температур	-30°C – 50°C
Область поддержки	Спина
Рост пользователя (для двух размеров ЭС)	150-165 см; 160-185 см

#### 4.1.3 Экзоскелеты компании Cyberdyne

Компания Cyberdyne производит портативные экзоскелеты серии HAL-LB03, предназначенные для снижения мышечного напряжения в поясничном отделе пользователя при подъеме и переносе грузов (рисунок 55).



*Рисунок 55. Портативный экзоскелет HAL-LB03  
компании Cyberdyne (Япония)*

В ЭС HAL-LB03, аналогично силовому ЭС HAL-5, используются датчики биоэлектрических сигналов мышц пользователя и предусмотрено 5 уровней поддержки в зависимости от выполняемых задач.

В таблице 12 приведены данные об основных характеристиках экзоскелета.

Таблица 12.

**Основные технические характеристики ЭС HAL-LB03**

Характеристика	Значение или описание
Габариты (высота x ширина x глубина)	522 мм x 450 мм x 292 мм
Масса (включая АКБ)	3 кг
Источник питания	АКБ
Время зарядки	2 ч
Время автономной работы	4,5 ч
Диапазон рабочих температур	0-40°C
Область поддержки	Поясничный отдел
Степень пыле- и влагозащиты	IP54
Рост и вес пользователя	140-180 см; 40-80 кг

## **4.2 Разработки компаний Республики Корея**

### **4.2.1 Экзоскелеты компании Hyundai Rotem**

В 2017 г. на международной выставке потребительской электроники (CES – International Consumer Electronics Show) в Лас-Вегасе (США) компания Hyundai Rotem представила легкий портативный активный экзоскелет Hyundai Waist EXoskeleton (H-WEX), оснащенный одним двигателем, который поддерживает мышцы спины, плечевого пояса, тазобедренных суставов и бедер рабочих, выполняющих монотонные работы, связанные с ручным подъемом и переносом грузов.

ЭС допускает сгибание до углов в  $180^\circ$  за 1 с, оснащен встроенным алгоритмом управления, обеспечивающим безопасность пользователя, а также интеграцию с мобильным телефоном для контроля режимов двигателя (рисунок 56).



*Рисунок 56. Экзоскелет H-WEX компании Hyundai Rotem (Республика Корея)*

### **4.2.2 Экзоскелет CLOi SuitBot компании LG Electronics**

Корейская компания LG Electronics разработала экзоскелет нижних конечностей и поясничного отдела CLOi SuitBot, предназначенный для снятия нагрузки при подъеме, переносе и опускании тяжелых грузов, снижения усталости и рисков получения травм скелетно-мышечной системы.

Отличительными особенностями экзоскелета являются использование специальной обуви и наличие функции автоматической регулировки, что упрощает надевание и снятие устройства.

ЭС оснащен системой обмена данными с другими роботизированными устройствами, способен к самообучению на основе анализа биометрических данных и параметров окружающей среды, измерения и анализа параметров движений оператора (рисунок 57).



***Рисунок 57. ЭС CLOi SuitBot компании LG Electronics (Республика Корея)***

В 2018 г. была разработана обновленная версия экзоскелета, который стал более компактным за счет исключения звеньев для поддержки ног пользователя (рисунок 58). ЭС надевается на поясничный отдел пользователя для создания дополнительной поддержки при переносе грузов. Данная модификация ЭС оснащена более гибкой системой ременных креплений, что упрощает надевание и эксплуатацию экзоскелета.

При наклоне туловища оператора на угол  $64^\circ$  ЭС SuitBot автоматически активируется для создания дополнительной поддержки разгибания на  $50^\circ$  или сгибания на  $90^\circ$ . При возврате оператора в вертикальное положение система автоматически отключается. Время автономной работы ЭС SuitBot составляет 4 ч. В качестве источника питания используются АКБ.



***Рисунок 58 – Модифицированная версия ЭС CLOi SuitBot компании LG Electronics (Республика Корея)***



## 5 РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ С ДИСТАНЦИОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ЭКЗОСКЕЛЕТНОГО ТИПА

Отдельным классом устройств, условно называемых квазиэкзоскелетами, являются роботизированные системы (РС) на базе гусеничных или колесных шасси, в исполнительных механизмах которых реализованы концепции робототехники, но управление осуществляется дистанционно устройствами экзоскелетного типа, основанными на биомеханике оператора и реализующими параллельные связи с исполнительными механизмами.

Использование таких систем не только повышает физические возможности человека, но и обеспечивает возможность выполнения операций высокой сложности в труднодоступных или опасных средах, так как оператор может располагаться на значительном удалении от места проведения работ.

### 5.1 Роботизированный погрузчик Guardian GT - Big Arm

Роботизированный погрузчик Guardian GT - Big Arm, разработанный компанией Raytheon-Sarcos (США) в 2011 г. на базе гусеничного шасси компании Ditch Witch, имеет в своём составе копирующую установку в виде квазиэкзоскелета верхних конечностей (рисунок 59).



*Рисунок 59.  
Guardian GT - Big Arm  
– роботизированный  
погрузчик компании  
Raytheon-Sarcos  
(США) на базе гусе-  
ничного шасси с управ-  
лением экзоскелетного  
типа*

Погрузчик может применяться не только в строительстве и промышленности, но и для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, а также при манипуляциях с опасными объектами, так как оператор может располагаться на значительном удалении от места проведения работ.

Guardian GT - Big Arm отличается высокими техническими характеристиками:

- реализовано силовое очувствление;
- грузоподъемность достигает 180 кг (в качестве силовых приводов использованы электрогидравлические приводы);
- скорость передвижения шасси робота превышает 6 км/ч.

## 5.2 Аварийно-спасательный робот T-52 Enryu

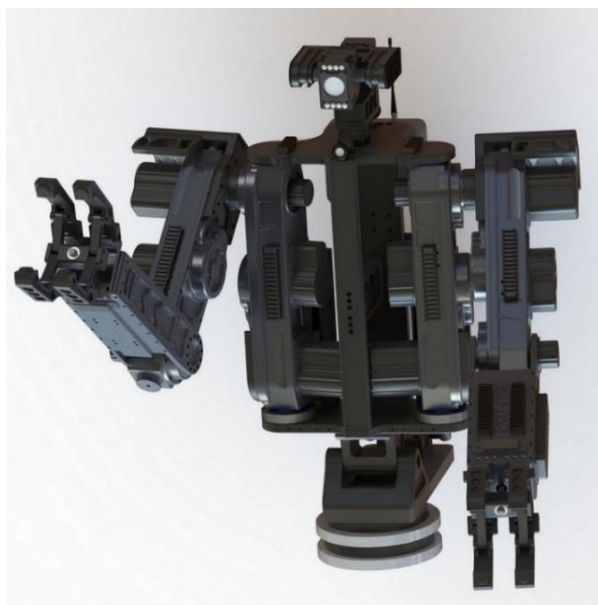
Аварийно-спасательный робот T-52 Enryu с управлением экзоскелетного типа (рисунок 60) разработан японской компанией Tmsuk Co., Ltd. при сотрудничестве с Университетом Киото (Kyoto University) и рядом государственных организаций. Робот может управляться как из кабины, так и удалённо, благодаря наличию системы видеонаблюдения и элементам управления экзоскелетного типа.



*Рисунок 60 – Аварийно-спасательный робот T-52 Enryu с управлением экзоскелетного типа компании Tmsuk (Япония)*

## 5.3 Квазиэкзоскелет EXO-ONE

На 19-й международной выставке систем безопасности Milipol, состоявшейся в 2015 г. в Париже, компанией Tecdrop (Франция) был представлен квазиэкзоскелет EXO-ONE, который может устанавливаться на роботизированной платформе SCARAB TX (рисунки 61, 62).



*Рисунок 61. Квазиэкзоскелет EXO-ONE компании Tecdrop (Франция)*



***Рисунок 62. Квазиэкзоскелет EXO-ONE,  
установленный на роботизированной платформе SCARAB TX***

Квазиэкзоскелет EXO-ONE оснащен двумя артикулированными роботизированными руками грузоподъемностью от 50 кг до 100 кг, управление которыми осуществляется дистанционно посредством уникальной системы бионической активации BIONIC DRIVE, также разработанной компанией Tecdron, обеспечивающей воспроизведение всех движений оператора экзоскелета. В устройстве предусмотрена возможность выбора между режимом управления квазиэкзоскелетом для передачи команд роботизированным рукам и режимом управления роботизированной платформой SCARAB TX.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее важными характеристиками экзоскелетов промышленного и специального назначения являются высокая грузоподъемность, эргономичность конструкции, приемлемые показатели массогабаритных характеристик, времени автономной работы и средней потребляемой мощности.

Следует отметить, что несмотря на сложные проблемы, которые необходимо решать при создании неавтономных неантропоморфных силовых ЭС тяжелого класса, связанные, в частности, с обеспечением равновесия в системе «человек-экзоскелет», разработки конструкций такого типа продолжают. В настоящее время японской компанией Atoun Panasonic ведется разработка неавтономного силового экзоскелета NIO, грузоподъемность которого должна составить не менее 100 кг.

В Республике Корея разработками неавтономных силовых ЭС тяжелого класса занимается компания Hyundai Rotem. В исполнительном механизме ЭС H-LEX грузоподъемностью 80 кг используются гидравлические приводы, а также система стабилизации положения и синхронизации движений рук ЭС.

Среди автономных силовых ЭС высокой грузоподъемности можно отметить такие японские разработки, как ЭС HAL-5, ЭС Power Assist Suit и ЭС Power-Assist Robot Suit, исполнительные механизмы которых оснащены электромеханическими приводами.

Особенностью ЭС HAL-5 компании Cyberdyne является способ управления на основе электромиографических сигналов. Грузоподъемность верхней части ЭС HAL-5 составляет 40 кг, грузоподъемность полного экзоскелета – от 100 до 180 кг.

Силовой экзоскелет специального назначения Power Assist Suit компаний Mitsubishi Heavy Industries и Japan Atomic Power Company грузоподъемностью 40 кг обеспечивает не только снятие нагрузки с оператора при манипуляциях с тяжелыми предметами, например при переносе роботов с дистанционным управлением или аварийных систем энергоснабжения, но и защиту оператора от радиоактивного излучения при проведении ремонтных работ в опасных зонах атомных электростанций или операций, связанных с ликвидацией последствий техногенных аварий.

В странах НАТО, Европейского союза, Восточной и Юго-Восточной Азии создан широкий ряд коммерчески доступных портативных экзоскелетов пассивного и активного типов, поддерживающих опорно-двигательный аппарат и снижающих мышечные усилия человека при выполнении такелажных работ, а также операций на сборочных и производственных линиях промышленных и военных предприятий.

Использование пассивных портативных ЭС может значительно снизить энергозатраты человека (например, ЭС H-VEX южно-корейской компании Hyundai Rotem массой 2,5 кг обеспечивает поддержку плечевого пояса и шейного отдела позвоночника оператора, снижая энергозатраты на 30%).



В США созданы пассивные экзоскелеты промышленного назначения, которые нашли применение на предприятиях военной отрасли. Например, ЭС FORTIS используется для ремонта и технического обслуживания кораблей ВМС США, а также на производственной линии компании Lockheed Martin Aeronautics по созданию военнотранспортного самолета C-130J.

Обратным примером является применение в гражданской сфере технологий экзоскелетных конструкций, разработанных изначально по заказу военных ведомств для решения оборонных задач (экзоскелет Fraco канадской компании Mawashi).

Среди активных устройств следует отметить разработку серии портативных ЭС японской компании Innophys грузоподъемностью до 35 кг, в которых поддержка спины и рук оператора при подъеме и переносе грузов обеспечивается за счет использования пневматических приводов с искусственными мускулами (мышцами Маккибена), активируемыми сжатым воздухом.