

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЭКСОСКЕЛЕТНЫХ УСТРОЙСТВ И ИХ НАИБОЛЕЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ

Е. А. Лынный

lunnikea@icloud.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** В статье представлена обзорно теоретическая работа, рассмотрено применение экзоскелетных устройств, проведена классификация экзоскелетов по сфере использования, рассмотрены особенности конструкций аппаратов. Проведен анализ схемных решений экзоскелетных устройств, выбрано наиболее перспективное схемное решение в части поддержки физиологического движения и расширения функциональных возможностей человека.

**Ключевые слова:** экзоскелет; взаимодействие роботизированных систем с организмом человека; реабилитация; функциональные особенности; многорежимные аппараты.

### ВВЕДЕНИЕ

Экзоскелетные устройства (ЭСУ) – это устройства, которые используются для увеличения силы мышц человека, расширения амплитуды движений и восполнения утраченных функций за счет внешнего каркаса и приводных элементов. Экзоскелет воспроизводит биомеханику человека с обеспечением пропорционального увеличения усилий при использовании ЭСУ.

Утрата функций опорно-двигательного аппарата человека часто связана с неврологическими (например, инсультом) или скелетно-мышечными заболеваниями (например, травматическими повреждениями или мышечными нарушениями). Статистика по указанным выше заболеваниям предопределяет актуальность работ, направленных на разработку перспективных схемных и компоновочных решений ЭСУ, расширение их функциональных возможностей, технических параметров и характеристик. Успешность и востребованность работ в данной области во многом определяется достижениями в области создания новых конструкционных материалов, источников накопления энергии, использования систем искусственного интеллекта при разработке и реализации управляющих алгоритмов в человеко-машинных комплексах.

В настоящее время существует ряд проблем, требующих решения в части конструирования ЭСУ, таких как вес устройства с емкостными источниками питания, обеспечение подвижности голеностопного сустава в системе ЭСУ, что позволит использовать их на наклонных и ступенчатых поверхностях, повышение удельной емкости источников питания в активных экзоскелетах и т.п. Обзору и возможному решению указанных проблем будет посвящен материал, представленный в данной статье.

### КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ПРИНЦИПУ РЕАБИЛИТАЦИИ

Технические средства реабилитации, а ЭСУ относится непременно именно к ним – это устройства, общее название средств для облегчения повседневной жизни людей с инвалидностью и другими ограничениями жизнедеятельности. Реабилитационные мероприятия проводятся по трем основным направлениям:

- 1) Медицинская реабилитация – призвана устранить медико-биологические последствия заболевания, вернуть первоначальное физическое здоровье больного.
- 2) Трудовая – возвращает человеку его трудовые способности.
- 3) Социальная – активно борется с изоляцией и дезадаптацией человека, восстанавливая утраченный жизненный статус

Обратим особое внимание на физическое здоровье больного, а именно на медицинскую реабилитацию техническими средствами. На сайте Фонда социального страхования Российской Федерации в разделе «Обеспечение граждан льготной категории» представлен перечень - Классификация технических средств реабилитации (изделий), предоставляемых инвалиду. Средства, относящиеся к числу ТСР представлены в виде схемы на рис. 1.



Рис. 1. Классификация технических средств реабилитации (изделий), предоставляемых инвалиду

Специальное тренажерное и спортивное оборудование для реабилитации после травм и операций помогает создать такие условия, чтобы нарушенные физиологические механизмы снова «заработали»: восстановить нервную проходимость, укрепить мышечные волокна, вернуть подвижность конечностям.

В медицинской области экзоскелеты выделенных групп применяются в практическом здравоохранении для пациентов с синдромами пареза и паралича, для реабилитации и абилитации инвалидов, однако отсутствие специальных программ и целевого финансирования, необходимость дальнейшей разработки и дополнительных длительных исследований, высокая стоимость моделей (в особенности с активным принципом работы) – не способствуют широкому созданию аналогов и отечественных моделей, а следовательно, и к широкому использованию в реабилитации и абилитации, внедрению в практическое здравоохранение.

Разработка роботизированных экзоскелетов связана с включением технологий для выполнения функций каждого модуля. Одним из важных аспектов при разработке экзоскелетов являются: измерение сил взаимодействия между устройством и конечностями пользователя, которые могут использоваться для оценки производительности пользователя при выполнении задачи (например, уровня усилий, затрачиваемых пациентом на выполнение задачи), также важно учитывать физиологические особенности конкретного пользователя, рассмотреть внедрение дополнительных функциональных узлов в систему для улучшения двигательных функций и динамических показателей. В следующей части статьи, будут рассмотрены наиболее перспективные конструктивно-компоновочные схемные решения и их применение, выделены преимущества, отмечены недостатки, определены тенденции развития.

#### ЭКЗОСКЕЛЕТ ПРОИЗВОДСТВА США – УСТРОЙСТВО INDEGO THERAPY

На рис. 2 представлено схемное решение *Устройства Indego Therapy* нового поколения для использования в реабилитационных центрах. Indego Therapy быстро регулируется, может быть индивидуализирован по размеру и адаптирован к пациентам. Пакет программного обеспечения Therapy +, входящий в состав каждого устройства Indego Therapy, включает алгоритмы управления, основанные на проверенных принципах моторного обучения, и обеспе-

чивает индивидуальный подход к обучению, ориентированный на пациента, при котором устройство реагирует на движения пациента и помогает в походке только при необходимости. Кроме того, у врача есть ряд настраиваемых параметров в программном пакете Therapy +, которые позволяют им дополнительно адаптировать поведение системы к конкретным нарушениям и потребностям походки.



**Рис. 2.** Экзоскелет Parker Hannifin Corporation, Indego Therapy:

1 – компактная аккумуляторная батарея в набедренном блоке; 2 – точки подключения функциональной электростимуляции; 3 – светодиодные индикаторы передают информацию о состоянии и работе системы; 4 – взаимозаменяемые короткие и высокие обхваты туловища обеспечивают поддержку, подходят для различных уровней травматизма; 5 – защелка для отсоединения верхней части ноги от бедра; 6 – регулируемая набедренная подушка из воздушной пены для равномерного распределения давления и оптимальной посадки; 7 – эргономичный контур для оптимального распределения давления и избегание критических точек напряжения; 8 – крепление и натяжение регулируемого ремня одной рукой; 9 – автоматические безотказные коленные замки. 10 – возможность отсоединения части голени по нажатию кнопки; 11 – рычаг для встроенной регулировки длины ортеза голенистопа; 12 – встроенный ортез для голенистопа обеспечивает стабильность голенистопа

Indego можно использовать в терапии в качестве инструмента для тренировки ходьбы. Indego Personal также можно использовать в качестве дополнительного средства передвижения для инвалидной коляски. Положительные эффекты включают, помимо прочего, улучшенный контроль кишечника, увеличение плотности костей и уменьшение пролежней.

Технические характеристики Indego:

- Экзоскелет с приводом от бедра и колена;
- Литий-ионные аккумуляторы;
- Общий вес устройства в сборе 12 кг;
- Возможность экспорта данных с помощью приложения для iOS;
- Подключение по Bluetooth;
- Цветной светодиод и обратная связь с вибрацией от пользователя (примечание: недавнее независимое исследование показало, что тактильная обратная связь играет важную роль в некоторых случаях восстановления походки);

- Встроенный интерфейс функциональной электростимуляции (FES) (на некоторых моделях);
- Вибрационная обратная связь информирует пользователя о балансе и состоянии устройства;
- Модульная конструкция обеспечивает легкую транспортировку;
- Облегченный дизайн позволяет самостоятельно надевать и снимать устройство даже сидя в инвалидном кресле.

*Требования пользователя:*

- Рост: от 155 до 191 см;
- Максимальный вес: 113 кг;
- Максимальная ширина бедра: 42,2 см;
- Длина бедра: от 35 до 47 см.

Клинический специалист выбирает высоту, длину и скорость шага на выбор (иные значения вышеназванных характеристик не позволят подстраивать под пациента размер корсета).

Недостатки экзоскелета Parker Hannifin Corporation, Indego Therapy: при ходьбе необходимо использование костылей, что вредно сказывается на плечевых суставах.

### **ЭКЗОСКЕЛЕТ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА EXOMED KURSK - ЭКЗОСКЕЛЕТ EXOATLET**

ExoAtlet (ЭкзоАтлет) – экзоскелет для медицинской и социальной реабилитации.

#### **1. Возможности**

Способствует ускорению процесса реабилитации и улучшению качества жизни пациентов, переживших инсульт и травмы спинного мозга, страдающих от церебрального паралича, рассеянного склероза и других нозологий. Методика реабилитации включает в себя дополнительные укрепляющие упражнения на тренажерах для укрепления и пластичности мышц.

Экзоскелет ExoAtlet можно использовать у пациентов с последствиями инсульта, со спинномозговой травмой, с рассеянным склерозом, с ЧМТ, с ДЦП, после эндопротезирования

#### **2. Преимущества**

ЭкзоАтлет позволяет пациенту самостоятельно подниматься в вертикальное положение из положения сидя, садиться, удерживать равновесие, ходить на месте и прямо, подниматься и спускаться по лестнице с поручнем. При этом повороты могут осуществляться как на месте, так и в движении. Экзоскелет формирует естественный паттерн ходьбы с перекатом стопы и снабжен модулем, защищающим от спастичности.

#### **3. Положительные эффекты**

Применение экзоскелета увеличивает объем движений в суставах, улучшает статодинамическое равновесие во время ходьбы, управление пациентом мышцами спины после тренировки и показатели электромиографического профиля. У пациентов с ExoAtlet значительно повышается уровень самообслуживания и мобильности, повышается толерантность к физическим нагрузкам, уменьшаются энергозатраты в вертикальном положении. Использование экзоскелета значительно повышает мотивацию и качество жизни пользователя.

#### **4. Принцип работы**

Движения экзоскелета формируются электродвигателями, расположенными в коленных и бедренных модулях конструкции, управление которыми осуществляет центральная плата, расположенная в рюкзаке аппарата.

Интерфейсом системы можно пользоваться, как с пульта на костыле для пациента, так и с планшета и со страховочных ручек для сопровождающего.

Удобство пользователя обеспечивается настраиваемыми параметрами устройства: размер стельки, длина и обхват голени, ширина и глубина таза, а также размер корсета.



Рис. 3. Экзоскелет ExoAtlet в работе

#### 5. Ключевые характеристики

– Рост пациента – от 160 до 190;

– Вес пациента до 100 кг;

(иные значения вышеназванных характеристик не позволят подстраивать под пациента размер стельки, длину и обхват голени, ширину и глубину таза, а также размер корсета)

– Вес экзоскелета – 23 кг;

– Время непрерывной работы – до 7 часов;

– Естественный паттерн ходьбы с перекатом стопы (индивидуальная настройка под параметры пациента);

– ExoCloud: Облачный сервис для хранения, управления и анализа тренировок пациентов;

– Возможность аварийного отключения;

– Возможность ходьбы по лестнице и другим неровным поверхностям;

– Натуральная походка, устойчивость при ходьбе;

– Настройка экзоскелета под пациента менее чем за 10 минут: не требуется специальных инструментов.

#### 6. Недостатки экзоскелетов ExoAtlet

Необходимость использования костылей, что вредно сказывается на плечевых суставах, длительная подготовка к одиночному использованию, тренировочное использование в раме, ходунках и т.д.

В сравнении двух экзоскелетных устройств выделен общий недостаток – это использование костылей для дополнительной опоры и равновесия, что негативно сказывается на плечевом поясе и дает дополнительную нагрузку на позвоночник. В экзоскелетном устройстве *Indego Therapy* предусмотрен встроенный ортез для голеностопного сустава обеспечивает стабильность голеностопного сустава. ЭкзоАтлет позволяет пациенту самостоятельно подниматься и спускаться по лестнице с поручнем.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье проведен анализ наиболее перспективных схемных решений, выделены их преимущества и недостатки. Рассмотрено взаимодействие ЭСУ с организмом человека. На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что основным недостатком выбранных схемных решений – является использование костылей. Также необходимо выделить проблему, связанную с весом экзоскелета российского производства, для увеличения времени непрерывной работы, производителю был вынужден увеличить объем аккумуляторов, тем самым увеличив энергоэффективность – увеличилась и масса устройства. Тяжелое ЭСУ отрицательно влияет на итак слабый мышечный корсет и позвоночник пациента с нарушением опорно-двигательного аппарата. Преимуществом обоих устройств можно считать возможность клиническим специалистом выбирать высоту, длину и параметры ЭСУ по физиологическим характеристикам пациента, произвести настройку под конкретного человека за короткое время, однако иные значения характеристик заранее не заложенные диапазон изменений – не позволят подстраивать под пациента размер корсета и использовать его для реабилитации.

Решению этих проблем будет способствовать совершенствование существующих схемных решений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная государственная информационная система. Федеральный реестр инвалидов [Электронный ресурс] – URL: <https://sfri.ru/>
2. Поезжаева, Е. В. Развитие конструктивных схем экзоскелетов / Е. В. Поезжаева, Д. А. Соколов, В. К. Курочкина. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2018. – № 1 (187). – С. 21-23. – URL: <https://moluch.ru/archive/187/47607/>
3. Илья Хель, Сообщество робототехников/ Текст не посредственный – URL: <https://robhunter.ru/news/kak-rabotayt-ekzoskeleti> © robo-hunter.com
4. Konstantinos Sirlantzis, Paul Oprea. Robotic exoskeletons involve sensors, actuators, mechanical structures, algorithms, and control strategies capable of acquiring information to execute a motor function. Handbook of Electronic Assistive Technology, 2019.
5. Manuel Andrés Vélez-Guerrero, Mauro Callejas-Cuervo, Stefano Mazzoleni. «Artificial Intelligence-Based Wearable Robotic Exoskeletons for Upper Limb Rehabilitation: A Review» Journal List Sensors, Volume 21(6); 2021 Mar
6. Ван К., Маркопулос П., Ю. Б., Чен В., Тиммерманс А. Интерактивные носимые системы для восстановления верхней части тела: систематический обзор. J. Neuroeng. Rehabil. 2017; 14 : 1–21. DOI: 10.1186 / s12984-017-0229-y

### ОБ АВТОРЕ

**ЛЫННИК Екатерина Андреевна**, магистрант 2-го курса ФАВИЭТ.

### METADATA

**Title:** Classification of exoskeletal devices and their most promising circuit solutions.

**Author:** E. A. Lynnik

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** lunnikea@icloud.com

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (26), pp. 53-58, 2022. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract.** The article presents an overview of theoretical work, the use of exoskeletal devices is considered, the classification of exoskeletons by the sphere of use is carried out, the features of the apparatus designs are considered. The analysis of circuit solutions of exoskeletal devices was carried out, the most promising circuit solution was selected in terms of supporting physiological movement and expanding human functionality.

**Key words:** exoskeleton; interaction of robotic systems with the human body; rehabilitation; functional features; multimode devices.

**About author:**

**LYNNIK, Ekaterina Andreevna**, postgraduate student 2 year, Ufa State Aviation Technical University.