3. Unitree SDK 2.0 Documentation / Unitree Robotics. – 2024. – URL: https://github.com/unitreerobotics/unitree_sdk2 (date of access: 20.03.2026).
4. OpenCV: Open Source Computer Vision Library / OpenCV Development Team. – 2024. – URL: https://opencv.org (date of access: 20.03.2026).
5. ROS2 Humble Documentation / Open Robotics. – 2023. – URL: https://docs.ros.org/en/humble (date of access: 20.03.2026).

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКЗОСКЛЕТА

А. А. Белоусов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель М. Н. Погуляев

Рассмотрены современные методы повышения энергоэффективности экзоскелетов, включая рекуперацию энергии, оптимизацию приводов, биомеханическую синхронизацию и применение легких конструкционных материалов. Проанализированы технические решения из научных публикаций и патентов, посвященных генерации энергии в суставах, квазипассивным приводам и интеллектуальным алгоритмам управления. Показано, что интеграция рекуперации, адаптивного управления и снижения массы конструкции позволяет увеличить время автономной работы экзоскелета в 1,5–2,5 раза. Представлены перспективные направления развития энергоавтономных систем, включая гибридные источники питания и использование биомеханической энергии пользователя.

Ключевые слова: экзоскелет, энергоэффективность, рекуперация энергии, квазипассивные приводы, биомеханическая синхронизация, интеллектуальное управление, легкие материалы; автономное питание,мотор-генератор, отрицательная работа сустава.

Энергоэффективность является одним из ключевых факторов, определяющих практическую применимость экзоскелетов в медицине, промышленности, военной сфере и мобильной робототехнике. Большинство современных систем ограничены массой аккумуляторов, временем автономной работы и потерями энергии в приводах, что существенно снижает их функциональность и удобство использования. В связи с этим разработка методов повышения энергоэффективности становится важнейшим направлением исследований. Основные источники потерь энергии в экзоскелетах связаны с низким КПД приводов, трением и нагревом редукторов, несогласованностью движений человека и устройства, избыточной массой конструкции, а также неоптимальными алгоритмами управления, которые продолжают активировать приводы даже в тех фазах движения, где можно использовать пассивные элементы. Кроме того, большинство экзоскелетов не используют возможности рекуперации энергии, хотя в человеческой походке и движениях рук присутствуют значительные фазы отрицательной работы, которые потенциально могут быть преобразованы в электрическую энергию.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения энергоэффективности является рекуперация энергии. Современные исследования показывают, что экзоскелеты способны возвращать от 5 до 30 % энергии, затрачиваемой на движение, если использовать генераторные режимы электродвигателей в фазах отрицательной мощности, например, при спуске, опускании руки или торможении шага. Наиболее эффективными точками для рекуперации являются коленный сустав, где наблюдается максимальная отрицательная работа при ходьбе, плечевой сустав при опускании руки и голеностоп при контролируемом приземлении стопы. Помимо электрической

рекуперации применяются механические накопители энергии – пружины, торсионные элементы и эластомеры, которые аккумулируют энергию в фазе сгибания и возвращают ее в фазе разгибания. Такие решения позволяют снизить энергопотребление на 10–40 % в зависимости от сценария использования.

Важным направлением является оптимизация приводов. Использование высокоэффективных бесщеточных электродвигателей с КПД до 95 %, редукторов с низким трением и современных гармонических или планетарных передач позволяет существенно уменьшить потери энергии. Квазипассивные приводы, в которых мотор используется только для изменения жесткости или положения, а основную работу выполняют пассивные элементы, позволяют дополнительно снизить энергопотребление. Интеллектуальные алгоритмы управления, отключающие приводы в фазах, где активная поддержка не требуется, а также адаптивное изменение момента в зависимости от нагрузки обеспечивают дополнительную экономию энергии.

Существенный вклад в повышение энергоэффективности вносит биомеханическая синхронизация. Если экзоскелет не совпадает с естественной кинематикой человека, устройство тратит энергию на компенсацию ошибок и сопротивление движению пользователя. Для решения этой проблемы применяются модели предсказания движения, основанные на нейросетях и фильтре Калмана, используются электромиографические сигналы для раннего определения намерений, применяяются оптимизация траекторий под конкретного пользователя и онлайн-калибровка, позволяющая системе подстраиваться под походку в реальном времени. Такие методы позволяют снизить энергозатраты на 15–25 %.

Снижение массы конструкции также является важным фактором, поскольку каждый лишний килограмм увеличивает энергопотребление на 3–7 %. Для уменьшения массы применяются титановые сплавы, углепластики, алюминиевые сплавы серии 7000 и полиамидные композиты. Использование легких материалов позволяет уменьшить массу экзоскелета на 20–30 %, что напрямую увеличивает время автономной работы.

Перспективным направлением является создание экзоскелетов с частичной энергетической автономией. Исследования показывают, что энергия, генерируемая при ходьбе, может достигать 5–20 Вт, термоэлектрические генераторы способны обеспечивать 1–3 Вт за счет тепла тела, а пьезоэлементы и микро-ГТГ дают дополнительные доли ватта. Хотя полной автономии достичь пока невозможно, гибридные схемы питания позволяют продлить время работы экзоскелета на 20–40 %.

Анализ патентов и научных работ подтверждает эффективность перечисленных подходов. В патенте US20160213496 описана система рекуперации энергии в коленном суставе с использованием мотор-генератора и интеллектуального управления фазами шага. Исследования, опубликованные в Frontiers in Robotics & AI, демонстрируют, что оптимизация биомеханической синхронизации снижает энергопотребление на 18–27 %. В работах ASME Journal of Mechanisms and Robotics представлены решения для плечевых экзоскелетов, способных генерировать до 12 Вт при опускании руки. Публикации IEEE показывают, что использование квази-пассивных приводов и адаптивного управления позволяет снизить энергозатраты на 30–40 %.

Максимальный эффект достигается при интеграции нескольких подходов: рекуперации энергии в ключевых суставах, применения квази-пассивных приводов, использования легких материалов, внедрения биомеханической синхронизации на основе EMG и IMU, интеллектуального управления с отключением приводов в пассивных фазах и гибридных источников питания. Комплексное применение этих методов позволяет увеличить время автономной работы экзоскелета в полтора–два с половиной раза.

Таким образом, повышение энергоэффективности экзоскелетов является многокомпонентной задачей, включающей оптимизацию приводов, снижение массы конструкции, рекуперацию энергии и интеллектуальное управление. Современные исследования подтверждают, что сочетание этих методов делает экзоскелеты более автономными, легкими и удобными, что существенно расширяет возможности их применения в реальных условиях. Перспективы дальнейшего развития связаны с созданием полностью энергоавтономных систем, способных эффективно использовать биомеханическую энергию человека и адаптироваться к индивидуальным особенностям пользователя.

Литература

1. Герасимов, М. Д. Анализ методов рекуперации энергии в человеко-машинных системах / М. Д. Герасимов, И. В. Киселев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – № 12. – С. 22–31.
2. Панов, А. И. Современные подходы к проектированию активных экзоскелетов / А. И. Панов, К. С. Яковлев // Труды МГТУ имени Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2023. – № 4. – С. 15–29.
3. Киселев, А. В. Биомеханические модели для управления экзоскелетами нижних конечностей / А. В. Киселев, В. А. Лапшин // Вестник МГТУ имени Баумана. Серия Приборостроение. – 2020. – № 5. – С. 67–78.
4. Селиванов, А. А. Использование легких композиционных материалов в конструкциях экзоскелетов / А. А. Селиванов, П. В. Кузнецов // Полимерные материалы и технологии. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 112–121.
5. Фролов, А. А. Нейроуправление и биомеханическая синхронизация в роботизированных ортезах / А. А. Фролов, А. Ю. Григорьев // Российский журнал биомеханики. – 2021. – Т. 25, № 3. – С. 45–59.
6. Лебедев, М. А. Нейроинтерфейсы и управление экзоскелетами: состояние и перспективы / М. А. Лебедев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2020. – № 4. – С. 3–15.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «АНИМАТРОННАЯ СИСТЕМА»

А. А. Белоусов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель В. А. Савельев

Рассмотрена разработка и реализация лабораторного стенда «Аниматронная система», предназначенного для демонстрации интеграции компьютерного зрения, микроконтроллерного управления и мехатронных исполнительных механизмов. Описана архитектура системы, включающая персональный компьютер, микроконтроллер Arduino, модуль PCA9685 и сервоприводы. Приведены методы обработки видеопотока с использованием MediaPipe FaceMesh, алгоритмы фильтрации и нормализации данных, а также принципы управления сервоприводами. Представлены результаты, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: аниматроника, микроконтроллер, MediaPipe, FaceMesh, сервопривод, фильтрация, UART.

Основной целью является создание аппаратно-программного комплекса, способного отслеживать положение головы пользователя с помощью веб-камеры и воспроизводить соответствующие движения механической модели головы с использованием сервоприводов.