

УДК 007.51

АНАЛИЗ КОНКУРЕНТНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКЗОСКЕЛЕТОМ С ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ МЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Г.С. Шишков, Тверской государственный университет, г. Тверь, Россия

Статья посвящена анализу современного состояния автоматизированных систем управления экзоскелетами и механизмам обработки управляющих сигналов от тела человека. В статье выявлены основные преимущества и недостатки различных способов реализации активных модулей экзоскелета с точки зрения конкурентных преимуществ децентрализованной системы управления с электромиографическими преобразователями биопотенциалов пользователя. Проанализированы преимущества развития экзоскелетов данного типа в России.

Ключевые слова: экзоскелет, децентрализованное управление, электромиография, биопотенциалы.

Начиная с шестидесятых годов прошлого столетия, инженеры по всему миру приступили к созданию устройства, которое сделает человека быстрее, сильнее и выносливее без изнурительных тренировок и анаболических препаратов. В русскоязычных странах его название не переводится, а пишется и произносится согласно фонетической транскрипции английского слова «exoskeleton» – экзоскелетон (экзоскелет). Дословный перевод лаконично объясняет суть устройства – внешний скелет. Предполагается, что экзоскелет повторяет анатомические параметры и биомеханику человека за счет подвижного каркаса и приводных механизмов, тем самым усиливая физические показатели пользователя. В зависимости от типа экзоскелета, могут встречаться устройства полностью автономные, без элементов питания – пассивные, и использующие дополнительные мощностные агрегаты – активные. Первые работают в качестве эргономичных распределителей веса, которые уменьшают физические нагрузки пользователя. Вторые, в свою очередь, представляют больший интерес, поскольку способны не только снять нагрузку, но и прибавить сил человеку. Активные экзоскелеты имеют несколько классификаций по типу автономности, весовой прочности, локализации на теле человека, способу программирования, технологии работы, структуре приводов и т.д.

Область применения у экзоскелета широкая: медицинская реабилитация, спасательные службы, военные действия, космические исследования, добывающая промышленность, производственные центры и т.д. Несмотря на достаточно продолжительную историю развития, сейчас экзоскелеты являются дорогостоящими, узкоразвитыми и малораспространенными разработками [1]. Причиной тому стали технические ограничения, с которыми приходится считаться инженерам, а именно: вес устройства, количество степеней свободы, коэффициент пропорциональности приложенных усилий к совершённой работе, время автономной работы и надёжность. Глобально все эти проблемы были частично решены с появлением новых и, в том числе, композитных материалов.

Таким образом, имея легкий, прочный скелет с хорошими усилителями остается решить проблемы времени работы и качества дублирования движений пользователя.

Время автономного использования экзоскелета будет определяться типом источника питания, типом приводов, механизмом приема сигналов от пользователя и устройством обработки данных. Анализируя опыт конструкторов наиболее популярных на сегодняшний день экзоскелетов, таких как HAL-3 [2], Nurse-Assisting Exoskeleton [3], ExoAtlet [4] и т.п., можно сделать вывод об эффективности сервоприводных и электрогидравлических приводов, по сравнению с гидро- и пневмоусилителями. Они легче, прочнее, проще и надежнее, хотя и потребляют больше энергии. Соответственно электрические аккумуляторы, несмотря на все свои недостатки, практичнее, нежели альтернативные источники питания на жидком, твердом и газообразном топливе.

На сегодняшний день в меньшей степени проработаны способы приема и обработки сигналов от пользователя. Популярность набирают электромиографические (ЭМГ) датчики мышечной активности и электроэнцефалографические (ЭЭГ) сенсоры нейронной активности головного мозга [5]. В общем случае экзоскелет можно представить в виде модели, состоящей из трех элементов: пользователь (нервная система, органы чувств, сознание, мышечные группы и т.д.), механическая система с исполнительными механизмами, система управления.

Преимуществами ЭМГ с поверхности кожи пользователя являются: скорость приема сигнала, его величина, возможность обработки конкретной мышечной группы, индивидуальная калибровка, наглядный контроль над работой системы. По сути, экзоскелет реагирует на напряжение в том или ином мышечном волокне и в считанные микросекунды дает команду исполнительному сервоприводу повернуться на заданный угол.

Недостатками такой системы будут большая шумовая наводка бытовой сети на частоте 50/60 Гц и громоздкость датчиков. Каждый провод работает как антенна-приемник и вносит ощутимые помехи в снимаемый сигнал биопотенциала, поскольку его амплитуда находится в промежутке от 20 мкВ до 2 мВ при максимальном сокращении мышцы [6].

ЭЭГ головного мозга, в свою очередь, обладает еще большей скоростью приема сигнала, занимает меньше места на теле человека (только на голове) и может быть легко экранирована от помех окружающего мира. Пользователю достаточно закрепить на голове принимающее устройство и подумать о том, какую мышцу напрячь, а система обработает возмущения нейронов головного мозга и подаст управляющую команду экзоскелету.

Существенным недостатком стала ограниченность системы по числу распознаваемых мышечных групп, ЭЭГ не позволяет четко фиксировать мелкую моторику и работу небольших мышц. Также требуются тренировки для начала работы, сосредоточенность пользователя на выполнении каждого действия, тонкая настройка оборудования, сложная математическая обработка и замедленные реакции в процессе агрегирования входящих данных.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что за счет большей универсальности ЭМГ сейчас является предпочтительной системой для использования в активных модулях экзоскелета. Существуют различные способы борьбы с недостатками электромиографии, такие как экранирование, изменение формы и места крепления принимающих электродов и т.д. Важными факторами являются возможность аппаратной и программной фильтрации шумовых наводок, а также стабильность системы при долгом использовании.

Финальный шаг конструирования экзоскелета состоит в выборе системы управления: неавтономная, автономная с центральным управляющим компьютером, автономная с децентрализованным управлением. Первая представляет меньший интерес с точки зрения универсальности, поскольку радиус действия устройства ограничивается длиной силовых и управляющих проводов от стационарного компьютера.

Автономные экзоскелеты с центральным управлением подобны человеческому телу: компьютер в качестве головного мозга считывает показатели периферийных датчиков, обрабатывает информацию, моделирует движение и посылает сигналы к мышцам скелета – приводам. Скорость работы данного устройства полностью коррелирует с вычислительной мощностью процессора. Преимущества очевидны: управление локализовано в одном месте, его легче экранировать от внешних воздействий, удобно проводить настройку и комплексное обслуживание, проще организовать систему энергоснабжения.

Тем не менее, недостатки в данной системе куда значительнее: выход из строя центрального компьютера означает неисправность всей системы, что в свою очередь крайне опасно для пользователя; стоимость процессора и его периферии сопоставима со стоимостью всего устройства; управляющая программа требует качественной проработки, поскольку система должна максимально эффективно задействовать возможности процессора без сбоев и задержек. Использование центрального управления имеет высокую вероятность выхода из строя, что может привести к травматизму пользователя.

Последние годы ведутся разработки принципиально новой системы управления экзоскелетом – децентрализованной. Стоит отметить, что в России эта область активно прорабатывается, появляются перспективные разработки, способные в недалеком будущем выйти на мировой уровень. Так, уже сейчас построены экспериментальные образцы, демонстрирующие работу децентрализованного управления экзоскелетом верхних конечностей [7]. Суть технологии в распределении вычислительной нагрузки на несколько процессоров или микроконтроллеров, которые в свою очередь связаны друг с другом определенными протоколами. Группе мышц выделяется свой вычислительный компьютер, который настраивается и работает только с ней, обрабатывает сигналы с датчиков биоэлектрической активности, сглаживает сигнал, моделирует движение, дает запрос на некоторое количество параметров рядом стоящих компьютеров и двигает искусственными мышцами экзоскелета.

Преимуществами децентрализованной системы являются: постоянная скорость обработки данных во всей сети, повторяемость компьютерных модулей, дешевизна микроконтроллеров в сравнении с мощными процессорами, надежность системы, простота управляющей программы, а самое главное – уменьшение расстояния от точек приема сигнала с поверхности кожи до обрабатываемого устройства. Последнее обстоятельство положительно сказывается на качестве электромиографического сигнала, т.к. уменьшаются шумовые наводки на более короткие провода. Выход из строя одного модуля не сильно повлияет на работу оставшихся, а, значит, пользователь сохранит контроль над экзоскелетом.

К недостаткам такого решения подходит громоздкость и избыточный вес защитных устройств для каждого отдельно взятого модуля, а также проблемы с энергопитанием всех узлов системы.

Таким образом, можно определить основные конкурентные преимущества децентрализованной системы управления экзоскелетом в связке с анализатором мышечной активности пользователя:

- 1) снижаются требования к уровню вычислительной мощности управляющего компьютера, что уменьшает затраты на аппаратное обеспечение;
- 2) увеличивается надежность системы, поскольку вес ответственности пропорционально распределен на сеть связанных компьютерных модулей;
- 3) становится проще сборка, отладка и ремонт системы, каждый модуль легко реконфигурируется под различные задачи;
- 4) упрощается программная часть и как следствие – повышается надежность системы;
- 5) облегчается взаимодействие между экзоскелетом и пользователем за счет повторяемости естественных движений человека и приводов механизированной системы, что увеличивает скорость обучения оператора;
- 6) расширяется возможность применения различных алгоритмов обработки сигналов для крупных и малых мышечных групп;
- 7) повышается качество принимаемых биоэлектрических сигналов с защитой от внешних наводок;
- 8) конечная стоимость готового устройства пропорционально коррелирует с его комплектацией, т.к. отсутствует весомый по стоимости единый процессор.

Вышеперечисленные факторы в большей степени относятся к технико-экономическим. С точки зрения прикладного использования, экзоскелеты с децентрализованным управлением имеют хорошие перспективы в обеспечении активного экономического развития России.

Во-первых, это добыча полезных ископаемых и производство. Не секрет, что многие задачи не способна решить ни одна техника, только человек. Там, где машины выходят из строя или не могут пройти, труд остается ручным, тяжелым, медленным, дорогостоящим и очень опасным. Не имеет смысла вкладывать деньги в разработку самоходной техники, которая всегда будет функционировать на грани возможного, увеличивая риски предприятия. Проще и эффективнее за-

щитить рабочих, увеличить их физическую силу, повысить выносливость. Экзоскелет станет достойной заменой большим силовым агрегатам, сделает бригады рабочих более мобильными и функциональными, что положительно повлияет на скорость и качество работы в экстремальных условиях. Применение же децентрализованного управления и интуитивно понятного биоэлектрического интерфейса обеспечит безопасность рабочих на протяжении долгого времени.

Во-вторых, важно позаботиться о качественной и быстрой реабилитации тех, кто в результате несчастного случая стал временно недееспособным. Сюда можно отнести переломы, повреждения мягких тканей, растяжения, травмы связок, сухожилий и т.д. Кости срастаются за несколько недель, однако этого недостаточно, мышечная атрофия увеличивает срок больничного листа. Имея на вооружении модульный экзоскелет, который восполнит временно потерянные функции той или иной конечности, врачи смогут проводить реабилитацию больных без физиотерапевтических процедур. Достаточно надеть защищающие от травм и усиливающие «костыли» на поврежденную часть тела, после чего в повседневной работе мышцы восстановятся и необходимость в «умной» лонгете отпадет. В результате человек быстрее пройдет курс лечения и намного раньше вольется в рабочий процесс.

В-третьих, остается острая проблема в удержании военной безопасности государства без ущерба для рядовых солдат. Техника развивается, вооружение эволюционирует, но без человека эта структура не может функционировать. Экзоскелет позволит защитить суставы и кости бойцов от излишних нагрузок, а в сочетании с защитными пластинами, и мягкие ткани от мелких осколков, которые наносят наибольший вред. Такие инновации в военной отрасли могут позволить создать качественно новые подразделения солдат, которым будут под силу крупные операции с минимальными потерями. Экзоскелеты с простым и безотказным управлением являются обязательным условием.

В-четвертых – развитие космической отрасли. Уже сейчас конструкторы внедряют экзоскелеты в скафандры космонавтов для компенсации перегрузок и внешнего воздействия открытого космоса. Любые подвижки в увеличении прочности, эргономики и силовой выносливости агрегатов защитных костюмов могут поспособствовать развитию прорывных научных исследований в области астрономии. Как вариант – изучение ближнего космоса и ремонт низкоорбитальных спутников.

И, пожалуй, самый значительный вклад – модернизация различных отраслей промышленности: легкая, швейная, топливная, пищевая и т.д. Экзоскелет позволит заменить устаревшие манипуляторы, системы транспортировки и прочие технологические узлы простоя, тем самым увеличив производительность, качество работы и безопасность персонала.

Как итог следует отметить, что разработка и производство экзоскелетов с децентрализованным управлением на электромиографических преобразователях является перспективной и экономически рентабельной идеей. Более того,

научно-техническая база отечественных ученых позволяет создавать конкурентоспособные экзоскелеты высокого качества.

Список использованных источников

1. Экзоскелеты: История разработок, виды, классификация [Электронный ресурс] // URL: <http://www.str-t.ru/reports/18/> (дата обращения: 18.05.2018).
2. Kawamoto H., Sankai Y. «Power assist system HAL-3 for gait disorder person» in Proc. Int. Conf. Comput. Helping People Special Needs (ICCHP) (Lecture Notes on Computer Science), vol. 2398, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002.
3. Dollar A.M., Herr H. Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art // IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, 2008. Vol. 24, No. 1. P. 144-158.
4. Российский экзоскелет «ЕхоАтлет» [Электронный ресурс] // URL: <http://topwar.ru/51446-rossiyskiy-ekzoskelet-ekzoatlet-echoatlet.html> (дата обращения: 12.06.2018).
5. Roy S.H. Electro-Mechanical stability of surface EMG sensors / S.H. Roy, G.De Luca, S. Cheng, A. Johansson, L.D. Gilmore, C.J. De Luca // Medical and biological engineering and computing. 2007. № 45.
6. Гурфинкель В.С. Биоэлектрическое управление / В.С. Гурфинкель, В.Б. Малкин, М.Л. Цетлин, А.Е. Шнейдер. - М.: Наука, 1972. – 245 с.
7. Ермолов И.Л., Князьков М.М., Суханов А.Н., Крюкова А.А. Разработка активного модуля экзоскелетного устройства верхних конечностей человека с биоуправлением // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. №10 (171). С. 228-241. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-aktivnogo-modulya-ekzoskeletnogo-ustroystva-verhnih-konechnostey-cheloveka-s-bioupravleniem> (дата обращения: 12.06.2018).

ANALYSIS OF COMPETITIVE ADVANTAGES OF A DECENTRALIZED SYSTEM OF AUTOMATED CONTROL OF THE EXOSKELETON WITH ELECTROMYOGRAPHIC TRANSMITTERS OF MUSCLE ACTIVITY

G.S. Shishkov, Tver state University, Tver, Russia

This article is devoted to the analysis of the current state of automated control systems of exoskeletons and mechanisms of processing of control signals from the human body. The article reveals the main advantages and disadvantages of different ways of implementing active exoskeleton modules from the point of view of competitive advantages of decentralized control system with electromyographic converters of user biopotentials. The advantages of this type of exoskeleton development in Russia are analyzed.

Keywords: exoskeleton, decentralized control, electromyography, bioelectricity.

Об авторе:

Шишков Григорий Сергеевич, магистрант Тверского государственного университета, физико-технического факультета, направления 03.04.03 радиофизика, программы «Физическое материаловедение», г. Тверь, Россия, e-mail: grigoriyshishkov@yandex.ru.