

Концепция экзоскелета капсульного типа для аварийно-спасательных операций

03, март 2015

Зельцер А. Г.¹, Верейкин А. А.^{1,*}, Гойхман А. В.¹,
Савченко А. Г.¹, Жуков А. А.¹, Демченко М. А.¹

УДК: 21.865.8, 623.445.1, 623.445.2

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

*aaautres@gmail.com

Введение

Существующие на данный момент модели экзоскелетов [1-4] представляют собой конструкцию рамного типа, имеющую минимум связей с телом человека. Так экзоскелет нижних конечностей BLEEX [2, 3] ремнями закрепляется на стопах, голених и спине человека-оператора, причём жёстко он крепится лишь к стопам.

Предлагается принципиально новая концепция исполнительного механизма (ИМ) экзоскелета, в основе которой лежит идея о том, что ИМ помимо увеличения физических возможностей человека должен обеспечивать и защиту его тела, что вполне обосновано в недетерминированных условиях проведения аварийно-спасательных операций. Поставлена задача обеспечить создание универсальной конструкции ИМ, которая позволит при необходимости создать линейку экзоскелетов, в число которых будет входить и вариант, предназначенный для ведения боевых действий. В этом случае силовой каркас заменяется бронекорпусом.

1. Определение взаимного расположения сочленений

В качестве предварительного этапа синтеза древовидной кинематической схемы ИМ экзоскелета были намечены активные и пассивные степени подвижности. Под активными понимают управляемые степени подвижности, а под пассивными – неуправляемые. Была получена предварительная схема размещения сочленений ИМ (рис. 1) и выбраны диапазоны изменения обобщённых координат в сочленениях, которые требуется уточнить в дальнейшем, ориентируясь на предыдущие работы [5, 6] и антропометрические данные (в том числе предлагаемые модулем эргономического проектирования программного комплекса САТИА). Также определены предварительные размеры экзоскелета и расположение

узлов друг относительно друга. На данном этапе конструкция каркаса не прорабатывалась.

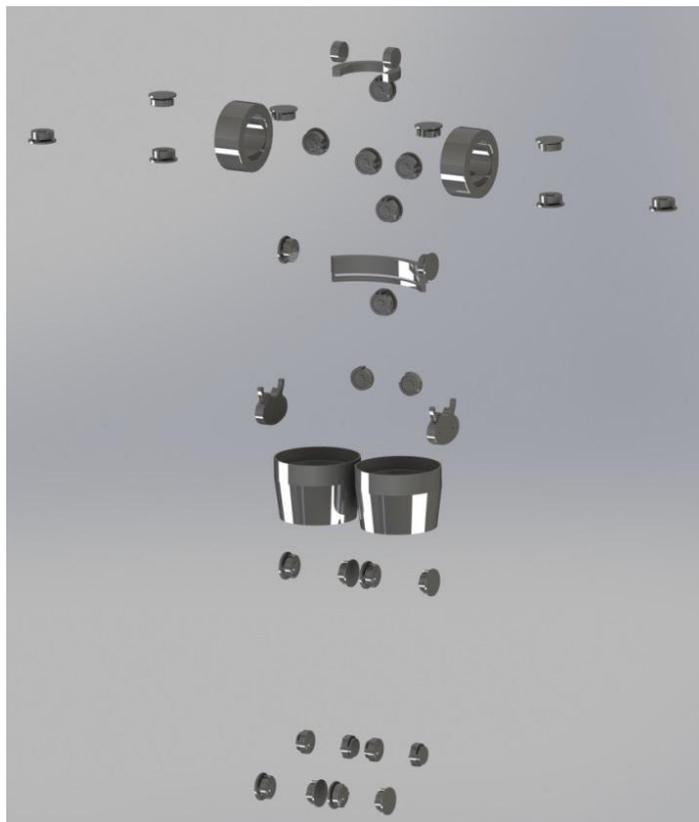


Рис. 1. Предварительная схема размещения сочленений ИМ экзоскелета

2. Проработка общей концепции исполнительного механизма

При проработке взаимного расположения основных узлов были выявлены проблемы, сопутствующие выбранной капсульной конструкции, связанные с жёсткой привязкой движений конструкции к движениям человека. Так для степени подвижности бедренного звена экзоскелета движение типа приведение-отведение (изменение крена), реализованное за счёт цилиндрического шарнира на основе стандартного подшипникового узла, приводит к проникновению звена ИМ в тело человека, что совершенно недопустимо. В современных образцах экзоскелетов проблемы такого рода решаются:

- удалением звена ИМ от тела человека в направлении, перпендикулярном к сагитальной плоскости;
- назначением диапазона изменения обобщённой координаты сочленения, значительно меньше допустимого, определённого из антропометрических параметров;
- сильным разнесением в пространстве осей поворота сочленений, обеспечивающих изменение положения бедра по крену и тангажу.

Принятая ранее концепция не позволяет решать проблемы вышеперечисленными способами. Предложено решение, заключающееся в применении шарниров с виртуальными

ми осями поворота, совпадающими с осями поворота соответствующих сочленений человека. Разработаны принципиальные схемы узлов, соответствующих принятой концепции. Остановимся подробнее на спине и бедре ИМ экзоскелета.

2.1 Степени подвижности спины

Спина человека обладает высокой подвижностью, однако концепция, положенная в основу современных образцов экзоскелетов, не позволяет в полной мере реализовать её подвижность. ИМ значительно ограничивает движения человека-оператора, соответствующие изменению положения спины по рысканию.

Размещение за спиной простого цилиндрического шарнира не решает проблемы (рис. 2). Позвоночник в данном случае является осью поворота, потому при размещении пары вращения вне тела, получим вторую, не совпадающую с первой ось, что может привести к повреждениям позвоночника и тела оператора.

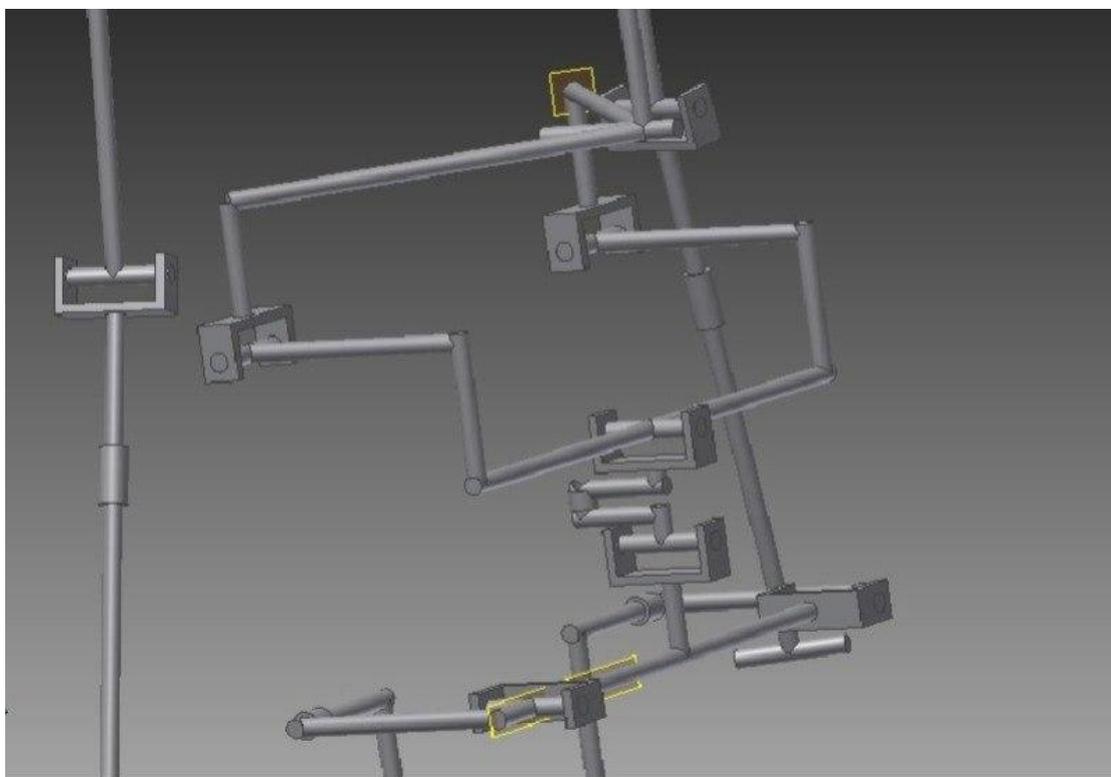


Рис. 2. Кинематическая схема спины исполнительного механизма экзоскелета

Выходом из создавшейся ситуации является применение сочленения с виртуальной осью поворота, совпадающей с осью поворота спины человека, каковой является позвонок. На рис. 3 приведено схематическое устройство спинного узла, представляющего собой направляющую качения, изогнутую по некоторому радиусу, соответствующему расстоянию до виртуальной оси поворота (поз. 1).

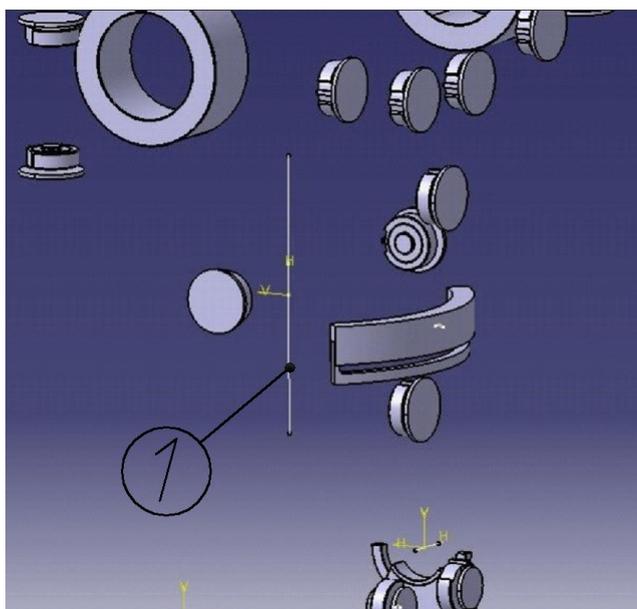


Рис. 3. Конструктивная схема реализации сочленения, обеспечивающего изменение рыскания спины человека оператора на основе цилиндрического шарнира с виртуальной осью вращения

2.2 Степени подвижности бедра

Сочленение, отвечающее за реализацию движения, обеспечивающего изменение положения бедра человека-оператора по тангажу, при изменении положения ноги человека по крену проникает в тело человека, тем самым, повреждая его. Решением данной проблемы является применение цилиндрического шарнира с виртуальной осью поворота (поз. 1, 2 на рис. 4).

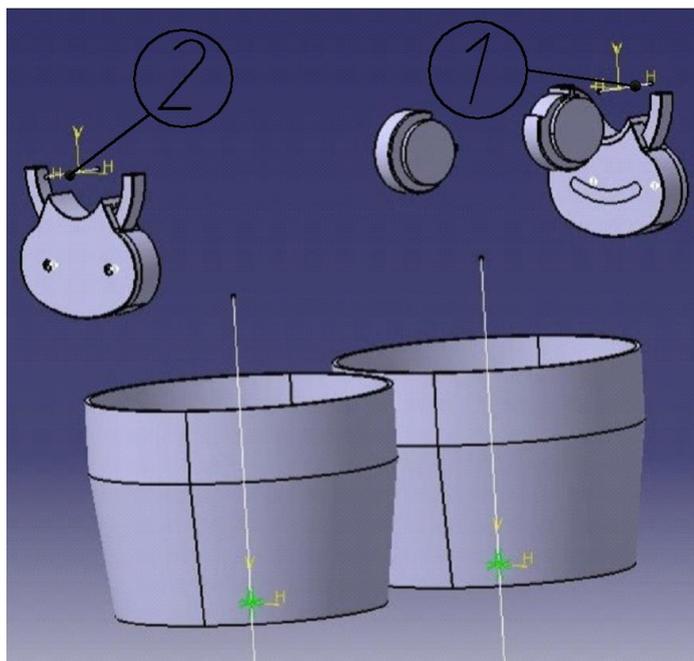


Рис. 4. Конструктивная схема реализации сочленения, обеспечивающего изменение рыскания спины человека оператора

3. Достоинства и недостатки предложенной концепции

Предложенная общая концепция ИМ экзоскелета обладает рядом достоинств:

- уменьшенные габариты за счёт плотного прилегания ИМ к телу человека-оператора;
- в отношении основных движений человека удаётся реализовать принцип одно движение оператора – одно движение экзоскелета, т.е. изменение обобщённой координаты в сочленении ИМ адекватно изменению обобщённой координаты соответствующего сочленения человека. В современных же вариантах экзоскелетов изменению обобщённой координаты одного сочленения человека соответствует некоторая совокупность изменений обобщённых координат сочленений экзоскелета. Однако необходимо отметить, что данный принцип выполняется не для всех движений человека, в противном случае пришлось бы сильно усложнить конструкцию ИМ и довести число степеней подвижности экзоскелета до числа степеней подвижности человека, что на данном этапе развития техники не представляется возможным;
- некоторое упрощение системы управления за счёт реализации принципа одно движение оператора – одно движение экзоскелета;
- упрощённое освоение ИМ человеком-оператором;
- улучшенная эргономика;
- возможность модифицировать каркас во внешнюю несущую бронеконструкцию, предназначенную для защиты от различных ударных нагрузок;
- относительно облегчение конструкции за счет того что броня и каркас представляют собой единое целое;
- высокая жёсткость конструкции.
- Среди недостатков концепции можно отметить:
 - увеличение степеней подвижности ИМ;
 - усложнение конструкции сочленений;
 - повышенное энергопотребление.

4. Разработанный исполнительный механизм экзоскелета нижних конечностей

Следующим этапом после принятия решения о применении виртуальных осей и проработки конструктивных схем сочленений ИМ является разработка кинематической схемы с учётом реальных и виртуальных осей вращения. Для получения точных геометрических размеров кинематической схемы ИМ экзоскелета было рассмотрено несколько способов решения:

- полный рентгеновский снимок тела оператора;
- сборка макета кинематической модели для её экспериментального уточнения.

Окончательно был выбран второй способ. При этом было решено совместить этапы разработки каркаса и сборки экспериментального макета. На рис. 5 представлен предварительный вариант ИМ экзоскелета нижних конечностей капсульного типа.

Преимущества предлагаемого исполнения ИМ экзоскелета:

- простое и удобное расположение сочленений, в том числе с виртуальной осью вращения;
- подходит для изготовления экспериментального макета кинематической схемы ИМ с целью уточнения геометрических размеров и размещения степеней подвижности;
- снятие с исполнительных двигателей, в качестве которых на данный момент рассматриваются пневмо- и гидродвигатели с поступательным перемещением выходного звена, всех нагрузок кроме осевой, за счёт перемещения выходного звена по направляющей;
- исполнительный двигатель надёжно защищён от внешних механических воздействий кожухом, что особенно ценно при использовании в качестве исполнительных двигателей пневмомускулов. Это достигается за счёт введения дополнительного рычага, связывающего выходное звено исполнительного двигателя с ИМ (рис. 5);
- достигается повышение ресурса пневмомускулов за счёт того, что в процессе работы они не изгибаются.



Рис. 5. Предварительный вариант исполнительного механизма экзоскелета нижних конечностей капсульного типа

5. Силовая установка

Современные экзоскелеты могут обладать достаточной автономностью только лишь в случае низкой суммарной мощности исполнительных приводов, что сказывается, с одной стороны, на грузоподъёмности и скорости перемещения в пространстве, и на количестве управляемых степеней подвижности – с другой. Во многом в силу последнего фактора существующие на данный момент автономные ИМ представляют собой экзоскелеты только лишь нижних конечностей. Экзоскелет нижних конечностей BLEEX, [2, 3] использует в качестве основного источника энергии двигатель внутреннего сгорания (ДВС), вырабатывающий гидравлическую и электрическую энергии.

В настоящее время прорабатывается возможность использования ДВС, совмещённого с гидро- или пневмонагнетателем. Это должно значительно уменьшить массогабаритные характеристики силового агрегата.

В современных образцах автономных экзоскелетов, оснащённых ДВС, двигатели располагаются за спиной оператора в крупногабаритных ранцах, что снижает подвижность поясничного отдела, но, в то же время, позволяет использовать более габаритный двигатель, попутно обеспечивая защиту спины. Возможно использовать принцип, который применяется на танках израильской армии “Меркава” [7]. Двигатель располагается спереди, являясь дополнительной защитой экипажу. Для уменьшения габаритов костюма можно применить двигатель V-образной конфигурации с сильно увеличенным углом развала. Такая конфигурация позволит буквально распластать двигатель на поверхности груди или спины, тем самым значительно снизив габариты.

Заключение

Все высокоразвитые страны мира работают над проектами роботизированных экзоскелетов, оснащённых мощными исполнительными двигателями, предназначенных для использования, главным образом, в зонах ведения боевых действий и проведения аварийно-спасательных операций. В РФ также ведутся разработки в этом направлении [8, 9], однако на данный момент перспектива отечественных разработок представляется весьма туманной. Таким образом, существует острая необходимость проведения научных исследований и реализации технических проектов по данному направлению.

К настоящему времени определена концепция ИМ экзоскелета, проработаны некоторые конструкторские решения. Представлен метод, позволяющий произвести расчёт динамики ИМ [10-13] с учётом реакций опорной поверхности, а в дальнейшем построить систему управления комплексом человек-экзоскелет. В качестве приоритетных направлений развития настоящего проекта выбрано параллельное проектирование двух вариантов ИМ, имеющих универсальную конструкцию каркаса, но отличающихся в части исполнительных приводов: гидроцилиндры [14, 15] и пневмомускулы. В настоящее время также идёт работа над экспериментальным макетом, который позволит дать оценку выбранным решениям.

Список литературы

1. Hanlon M. Raytheon XOS 2 Exoskeleton, Second-Generation Robotics Suit, United States of America. September, 2010. Режим доступа: www.gizmag.com/raytheon-significantly-progresses-exoskeleton-design/16479 (дата обращения 16.03.15).
2. Kazerooni H., Steger R. The Berkeley Lower Extremity Exoskeletons // ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control, Vol. 128, no. 1, pp. 14-25, March 2006. DOI: 10.1115/1.2168164. Режим доступа: <http://bleex.me.berkeley.edu/publications/> (дата обращения 16.03.15).
3. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) // The International Journal of Robotics Research, Vol. 25, № 5-6, May-June 2006, pp. 561-573. DOI: 10.1177/0278364906065505. Режим доступа: <http://bleex.me.berkeley.edu/publications/> (дата обращения 16.03.15).
4. Sankai Y. Hal: Hybrid Assistive Limb based on Cybernics. // Global COE Cybernics, System and Information Engineering, University of Tsukuba. Режим доступа: http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/sonota/ISSR_Sankai.pdf (дата обращения 16.03.15).
5. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семёнов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Б.Б., Яроц В.В. Синтез кинематической схемы исполнительного механизма экзоскелета // Актуальные вопросы науки. –2014. – № XIII. – С. 68-76.
6. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Анализ и выбор кинематической структуры исполнительного механизма экзоскелета // Наука и образование: электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. – №7. С. 72-93. DOI: 10.7463/0714.0717676. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/717676.html> (дата обращения 16.03.15).
7. Merkava Mk. 4. Main battle tank. // Military-today. Режим доступа: http://www.military-today.com/tanks/merkava_mk4.htm (дата обращения 16.03.15).
8. “Боец-21” обгонит конкурентов? // Военное обозрение. Апрель, 2011. Режим доступа: <http://topwar.ru/4198-boec-21-obgonit-konkurentov.html> (дата обращения 16.03.15).
9. Лавровский Э.К., Письменная Е.В. О регулярной ходьбе экзоскелетона нижних конечностей при дефиците управляющих воздействий // Российский журнал биомеханики. – 2014. – Т. 18, №2. – С. 208-225. Режим доступа: http://vestnik.pstu.ru/biomech/archives/?id=&folder_id=3883 (дата обращения 16.03.15).
10. Основы теории исполнительных механизмов шагающих роботов // Ковальчук А.К., Кулаков Б.Б., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Яроц В.В. – М.: Изд-во Рудомино, 2010. – 167 с.
11. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Яроц В.В., Верейкин А.А., Кулаков Б.Б., Каргинов Л.А. Метод проектирования пространственных древовидных исполнительных механизмов шагающих роботов // Инженерный вестник МГТУ Н.Э. Баумана. –

2014. – №11. – С. 6-10. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/736600.html> (дата обращения 16.03.15).
12. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Каргинов Л.А. Исследование динамики исполнительного механизма экзоскелета нижних конечностей с учётом реакций опорной поверхности // Наука и образование: электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 12. – С. 256-278. DOI: 10.7463/0815.9328000. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/745388.html> (дата обращения 16.03.15).
13. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семёнов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Б.Б, Яроц В.В. Динамика исполнительного механизма экзоскелета // Техника и технология: новые перспективы развития. – 2014. – № XIII. – С. 5-16.
14. Верейкин А.А. Расчёт исполнительных гидроцилиндров экзоскелета // Молодёжный научно-технический вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. – 2013. – № 5. – С. 11. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/569290.html> (дата обращения 16.03.15).
15. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов Д.Б. Концепция построения системы электрогидравлических следящих приводов двуногого шагающего робота // Наука и образование: электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – №1. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/137051.html> (дата обращения 16.03.15).