

ТЕХНОЛОГИИ БИОУПРАВЛЯЕМЫХ ПРОТЕЗОВ СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

Завьялов Сергей Александрович¹, Мейгал Александр Юрьевич²

¹ Региональный центр научно-информационных технологий, ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск, Россия

² Институт высоких биомедицинских технологий, ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск, Россия

Завьялов С.А.

185910 Россия, Республика Карелия, Петрозаводск, пр. Ленина, 33

E-mail: sza123@list.ru

Аннотация. В статье проведён обзор современных подходов к созданию биоуправляемых протезов. Представлена классификация биоуправляемых протезов по системе управления. Рассмотрен механизм распознавания движения, лежащий в основе интерфейса «человек – протез». Предложен вариант развития технологий биоуправляемых протезов в будущем.

Ключевые слова: робототехника, протезирование, электромиография, нейроуправление, паттерн, интерфейс, движение.

THE BIO-CONTROLLED PROSTHESIS TECHNOLOGIES TODAY AND TOMORROW

Sergey A. Zav'yalov¹, Alexander Yu. Meigal²

¹Regional Center for New Information Technologies, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

²Institute of High-Tech Biomedicine, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

S.A. Zav'yalov
33 Lenin str., Petrozavodsk, Russia 185910
E-mail: sza123@list.ru

Abstract. The article reviews modern approaches to creation of bio-controlled prostheses. Classification of bio-controlled prostheses based on their operating system is described. The mechanism of movement recognition underlying «man – prosthesis» interface is also considered. Possible scenario of future development of bio-controlled prosthesis technologies is discussed as well.

Keywords: robotics, prosthetics, electromyography, neurocontrol, pattern, interface, motion.

Нет необходимости объяснять всю важность протезирования. Эта важная область знаний сегодня претерпевает бурный рост. Средства массовой информации всё чаще сообщают о появлении того или иного революционного решения в данной области, и большинство представленных решений лежат в сфере бионики. Бионика – это раздел кибернетики, занимающийся изучением строения и жизнедеятельности организмов в целях постановки и решения новых инженерных задач (<http://www.vedu.ru/expdic>). Основной инженерной задачей в сфере протезирования является создание устройств и механизмов, способных наилучшим образом заменить утраченные части тела человека. Протезы должны восстанавливать их функциональные возможности, такие, как подвижность, управляемость и чувствительность.

В полном объёме перечисленные задачи довольно долго не имели своего конечного решения. Прогресс обозначился относительно недавно и для этого существует ряд объективных причин. К таковым смело можно отнести появление новых конструкционных материалов, специализированных систем проектирования, передовых элементов питания, электродвигателей, микроэлектроники и вычислительных систем. Действительно, удобный и лёгкий протез крайне трудно произвести из традиционных материалов. Появление титановых сплавов, композитных материалов и развитие сопутствующих технологий обработки в наши дни позволили создавать протезы, которые легче и прочнее протезируемых конечностей. Электрические моторы, используемые в любых электромеханических протезах, с каждым годом становятся мощнее, меньше и легче. Появление литий-полимерных батарей стало революцией в области источников энергии, которая позволила снабдить электромеханические устройства источниками питания, существенно превосходящими предшественников по ёмкости и другим техническим характеристикам.

Таким образом, современные достижения позволили создавать механическую часть протезов лёгкой, прочной, компактной, энергонезависимой и максимально энерговооружённой. Влиянию прогресса подверглись и системы управления протезами, которые должны выполнять свои функции в полном соответствии с желаниями и потребностями человека. Сегодня появилось приемлемое решение ряда сложнейших задач, в число которых входят получение управляющего воздействия от человека, распознавание этого управляющего воздействия, трансформирование его в последовательность команд для электромеханических систем протеза. Все эти операции сегодня невозможны без микроэлектронных вычислительных систем. Благодаря бурному развитию данной области, ежегодно увеличивается плотность транзисторов в чипах, что приводит к их миниатюризации, повышению универсализма и производительности. Ещё в 1965 году один из создателей корпорации Intel Гордон Мур высказал предположение, которое впоследствии назвали законом Мура: число транзисторов на кристалле будет удваиваться каждые полтора-два года, а их размеры – с той же скоростью уменьшаться. Если в 1971 году проектные нормы производства микросхем, выполняемых как системы на кристалле, составляли 10 мкм, то сейчас речь идет о размерах меньше 20 и даже 10 нм (Механик, 2012). Уже в этом году корпорация IBM объявила, что она освоила технологию, позволяющую размещать компоненты на кремниевой пластине, сократив расстояние между ними до 7 нм (Силонов, 2015). Миниатюризация даёт возможность создавать мощные вычислительные системы с низким энергопотреблением, размеры которых позволяют размещать их непосредственно в протезах.

Микроэлектронные устройства в современных протезах решают задачи получения управляющей информации и её интерпретации в последовательность команд исполнительных механизмов. Управляющая информация является зашифрованным образом желаемого движения. Она может поступать как от внешних устройств, так и опосредованно – от организма человека. Внешние устройства обычно применяются на этапе отладки или как дополнение, позволяющее изменять реакцию систем управления протеза в зависимости от внешних условий. Если же управляющая информация поступает от тела человека, протезы

называются биоуправляемыми. Сегодня это самый распространённый и перспективный тип подобного рода устройств. По способу получения управляющих воздействий биоуправляемые протезы можно разделить на биоэлектрические, миотонические и нейроуправляемые (Сафин, 2009). В биоэлектрических и миотонических системах в качестве управляющих воздействий используются электрическая активность и тонус мышц, а нейроуправляемые используют электроэнцефалограмму мозга.

Задачу управления протезом следует рассмотреть отдельно. В дальнейшем, человек, пользующийся, а, по сути, управляющий протезом, будет называться оператором. Оператор должен частично или полностью реализовывать функции утраченных частей тела посредством электромеханического устройства. Для этого на уровне сознания оператор формирует представление о желаемом действии и определённым образом обозначает его. В центральную нервную систему поступают соответствующие нервные импульсы, которые могут быть считаны на разных уровнях центральной нервной системы. Эти импульсы поступают в электронный блок обработки, который посредством сложных алгоритмов распознаёт желаемое действие. Затем система управления формирует управляющие сигналы для исполнительных механизмов, и протез реализует желаемое действие.

Осуществление описанной последовательности действий зависит от множества взаимосвязанных аспектов. Одним из таких аспектов является количество степеней свободы, присущих протезу. Чем ближе количество степеней свободы к количеству степеней свободы заменяемой части тела, тем больше утраченных функций способен восполнить протез. Исполнительный механизм может представлять собой двупалую клешню и выполнять только захват и вращение. Такое устройство в определённой степени может восполнить функционал утраченной кисти руки. В то же время, существуют протезы, практически полностью соответствующие по строению кисти руки, которые могут воспроизвести до 80% производимых ею действий. В случае с клешнёй система управления должна чётко распознать поступившие от человека три команды: сжатие, ослабление и вращение. Это гораздо проще, чем распознавать команды на формирование десятков и сотен положений пальцев бионической кисти руки. Но бионическая кисть удобнее, лучше выглядит и, как ни странно, проще в управлении.

Для осуществления устойчивого управления протезом очень важно, каким образом и на каком уровне центральной нервной системы считывается управляющее воздействие. Этот процесс может происходить на уровне мышц (электромиографическое управление), на уровне нервных волокон, ранее иннервировавших конечность, или даже на уровне мозга человека (электроэнцефалографическое управление) (Шукин, 2011). Примером протезов с электромиографическим управлением могут служить устройства, разработанные профессором Оскаром Асцманном из Венского Медицинского университета и инженерами из Медицинского центра при Геттингенском университете (Германия). Эти устройства заменяют конечности, ампутированные ниже локтя. Используемые в них сенсоры способны распознавать электрические импульсы, поступающие от мышц уцелевшей части руки (Aszmann, 2015). Оператор напрягает мышцы культи, как если бы рука была цела и здорова, электрическая активность мышц регистрируется специальными датчиками, показания которых сводятся в единую миограмму, поступающую в систему распознавания желаемого действия. По той же схеме работают системы, получающие управляющие воздействия на уровне нервных волокон, ранее иннервировавших конечность. В обоих случаях могут применяться инвазивные датчики, дающие, в отличие от неинвазивных, более точную информацию.

Пожалуй, лучшей на сегодня технологией беспроводных инвазивных биоэлектрических датчиков является Implanted MyoElectric Sensor (IMES). Датчики, произведённые по этой технологии, имплантируются в течение 15 минут, могут работать до 80 лет, питаются от катушки, встроенной в протез, и передают данные на радиочастоте (<http://neural.iit.edu/research/imes>). Благодаря технологии IMES оператор может управлять протезом ноги Proprio Foot исландской компании Ossur на уровне рефлексов, как

собственной ногой. У этого изделия практически отсутствует задержка между подачей управляющего воздействия и движением исполнительного механизма, которая имеет место в большинстве уже существующих бионических протезов (Чуб, 2015). Отсутствие проводов питания и передачи данных делают IMES датчики крайне удобными, но их использование возможно только в том случае, когда в мышцы приходят нервные импульсы. Если же человек парализован, наилучшим вариантом для него будет протез с электроэнцефалографическим управлением. Данные электроэнцефалографической активности изначально являются отражением работы функциональных систем мозга, в том числе – связанных с той или иной командой телу. Для снятия электроэнцефалограммы на голове закрепляются от 8 до 32 наружных или вживлённых электродов. Полученные с электродов данные направляются в вычислительную систему, где обрабатываются и интерпретируются (Шеппард, 2007).

Если не углубляться в детали, схема обработки управляющих воздействий в случае с электромиограммой и электроэнцефалограммой примерно одинакова. Считывающее устройство представляет собой набор датчиков, каждый из которых регистрирует активность мышцы или участка мозга. Число таких датчиков обычно варьируется от восьми до тридцати двух. Полученные одновременно со всех сенсоров данные представляют собой массив, протяжённый во времени. В тот момент, когда оператор продумывает движение или производит его на уровне культуры, регистрируемые датчиками параметры меняются, и в массиве данных возникает уникальная устойчивая картина, называемая шаблоном или паттерном движения. Задача распознавания задуманных движений может быть решена только при условии, что каждому определённому движению соответствует уникальный паттерн. Выявить устойчивые однозначные состояния в массивах данных крайне сложно, но если эта работа проведена успешно, по её результатам формируется библиотека паттернов, которая в дальнейшем используется системой распознавания движений. Поскольку возможности протеза по понятным причинам уступают возможностям оригиналов, необходимо паттерны движения протеза привести в соответствие паттернам движения оригинала. Так формируется интерфейс «человек – протез», который позволяет транслировать паттерн электрической мышечной или мозговой активности в паттерн механических движений биоуправляемого протеза.

Безусловно, наиболее сложным интерфейсом сейчас обладают протезы с электроэнцефалографическим управлением, поскольку крайне трудно формализовать мыслительную деятельность. Особые проблемы возникают, когда оператором оказывается человек, парализованный ниже шеи. Был описан случай, когда парализованная женщина обучалась в течение 13 недель управлению роботизированной рукой. После имплантации в мозг двух микросхем, размером 4×4 мм по 96 электродов в каждой, компьютерная система начала регистрировать нейронную активность в моторной коре мозга пациентки. Затем к системе была подключена роботизированная рука, которой женщина пыталась мысленно управлять, чётко реагируя на верные и ошибочные движения протеза. Благодаря наличию обратной связи, интерфейс, анализируя реакции пациентки, постепенно приспособился к её манере управления. Таким же образом женщина адаптировалась к возможностям электромеханической руки, снабжённой 17 двигателями и 26 суставами. Спустя 13 недель она смогла перемещать небольшие предметы, поднимать камни весом до килограмма и даже «собственноручно» отправить себе в рот кусочек шоколада (Целиков, 2012).

Нейроинтерфейс постепенно входит в нашу жизнь. На рынок выходят системы управления смартфонами посредством нейрошлемов, появились компьютерные игры с нейроуправлением. Есть все основания утверждать, что этот тип управления имеет большое будущее. Современные биоуправляемые протезы вполне способны восстановить двигательные функции заменяемых биологических аналогов, но остаётся потребность человека в ощущениях. Мы привыкли ощущать тепло, давление, состояние поверхности. Работы по обеспечению «чувствительности» протезов сегодня идут полным ходом. Группа учёных из Стэнфордского университета разработала искусственный заменитель кожи,

который способен «ощущать» прикосновения, определять их силу и передавать эту информацию нервной системе человека. Заменитель кожи состоит из двух слоёв прорезиненного пластика с нанесённой на них гибкой электрической цепью. Между этими слоями находятся карбоновые нанотрубки, проводящие электричество при сжатии. Чем сильнее давление, тем больше тока проходит через них. Таким образом, заменитель кожи может определять давление и его силу (Барабаш, 2015).

В 2013 году группа хирургов и неврологов под руководством Паоло Мария Россини имплантировала в локтевой и срединный нервы левой руки пациента ультратонкие трансневральные электроды, позволяющие ретранслировать даже чрезвычайно слабые электрические сигналы в нервную систему человека в режиме реального времени. Через 19 дней после операции пациент обрёл полную сенсорную чувствительность кончиков всех пальцев, ладони и запястья подключённого к нему прототипа бионической руки (Rasporovic, 2014).

Таким образом, уже сегодня существуют все условия для создания биоуправляемых протезов, способных восстановить двигательную и сенсорную функцию утраченных частей тела. Учёные и конструкторы находятся в самом начале этого сложного пути, а сопутствующие и новые технологии продолжают стремительно развиваться. Наибольший интерес вызывают перспективы нанотехнологий, поскольку они тянут за собой изменения во всех сферах деятельности человека. В будущем возможно появление сверхпрочных, сверхтонких и сверхпроводимых материалов, свойства которых обязательно будут востребованы в сфере протезирования. Большой прогресс ожидает вычислительные системы. Они будут уменьшаться в размерах, снижать потребление энергии и увеличивать вычислительную мощность. Аналогичные процессы будут происходить в области механики, мехатроники и гидравлики. Больших успехов в будущем можно ожидать и от медицины, и особенно – неврологии.

Определённо, все перечисленные факторы в будущем повлияют на развитие технологий биоуправляемых протезов. В дальнейшем можно ожидать появление устройств с большим количеством степеней свободы, чем у человеческих аналогов. Протезы будут лёгкими, сильными, чувствительными, энерговооружёнными, предельно адаптированными к потребностям и возможностям человека, чутко отвечающими всем его запросам. Существенных улучшений своего положения могут ожидать парализованные пациенты в связи с перспективой разработки нейроуправляемых экзоскелетов – устройств в виде внешнего каркаса, повторяющих биомеханику человека. Неподвижность останется в прошлом этих людей, их возможности станут практически безграничными.

Дальнейшее развитие технологии нейроуправления приведёт к созданию полноценных аватаров – систем полного дистанционного присутствия. Аватары являются полнофункциональными аналогами человеческого тела, возможно, по отдельным параметрам превосходящими его. Их дистанционная связь с человеческим мозгом будет настолько полной, что человек станет ассоциировать себя с аватаром в большей степени, чем с собственным телом. Такая технология позволит существенно снизить риски для жизни и здоровья людей, работающих в опасных и вредных условиях.

В принципе, создание протезов – это путь к бессмертию. Заменяя изношенные части тела, человек получает возможность возвращаться к полноценной жизни. Прогресс может сделать этот процесс бесконечным, если на определённом этапе удастся перенести сознание в электронный аналог мозга. Пожалуй, именно в этот момент человек станет бессмертным.

Библиография

1. Aszmann OC, Roche AD, Salminger S, Paternostro-Sluga T, Herceg M, Sturma A, Hofer C, Farina D. Bionic reconstruction to restore hand function after brachial plexus injury: a case series of three patients. *The Lancet* 2015, 385(9983):2183-2189.

2. Implantable Myoelectric Sensors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://neural.iit.edu/research/imes/> (дата обращения: 11.11.2015).
3. Raspopovic S, Capogrosso M, Petrini FM, Bonizzato M, Rigosa J, Di Pino G, Carpaneto J, Controzzi M, Boretius T, Fernandez E, Granata G, Oddo CM, Citi L, Ciancio AL, Cipriani C, Carrozza MC, Jensen W, Guglielmelli E, Stieglitz T, Rossini PM, Micera S. Restoring natural sensory feedback in real-time bidirectional hand prostheses. *Sci Transl Med* 2014, 6(222):222ra19.
4. Барабаш А. Ученые создали искусственную кожу, различающую прикосновения [Электронный ресурс] // Hi-News.ru. Новости высоких технологий – Режим доступа: <http://hi-news.ru/technology/uchyonye-sozdali-iskusstvennuyu-kozhu-razlichayushhuyu-prikosnoveniya.html> (дата обращения: 12.11.2015).
5. Механик А. У волны растут мозги, глаза и руки [Электронный ресурс] // Эксперт Online. – Режим доступа: <http://expert.ru/expert/2012/25/u-volnyi-rastut-mozgi-glaza-i-ruki> (дата обращения: 09.11.2015).
6. Сафин Д.Р., Пильщиков И.С., Гусев В.Г., Ураксеев М.А. Оценка эффективности различных конструкций электродов и усилителей биосигналов в системах управления протезами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – №2(10). – С.88–101.
7. Силонов А. IBM снизила расстояние между транзисторами микросхемы до 7 нм [Электронный ресурс] // Ведомости. – Режим доступа: <http://www.vedomosti.ru/technology/articles/2015/07/10/600055-ibm-snizila-rasstoyanie-mezhdu-tranzistorami-mikroshemi-do-7-nm> (дата обращения: 09.11.2015).
8. Толковый словарь русского языка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vedu.ru/expdic/1724> (дата обращения: 09.11.2015).
9. Целиков Д. Управление роботизированным протезом силой мысли: взята новая высота [Электронный ресурс] // Компьюлента – Режим доступа: <http://compulenta.computerra.ru/chelovek/neirobiologiya/10003266> (дата обращения: 12.11.2015).
10. Чуб А. Компания Ossur создала управляемый мыслью протез [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gadget.com/science/17039-kompaniya-ossur-sozdala-upravlyaemyij-myislyu-protez> (дата обращения: 12.11.2015).
11. Шеппард Г. Интерфейс для головного мозга [Электронный ресурс] // Вокруг света. – Режим доступа: <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/3007> (дата обращения: 12.11.2015).
12. Щукин Т. Задача управления биопротезом и ее возможные решения / Труды 2-й Российской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях - 2011» (Нижний Новгород). Н. Новгород: Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2011. С.238.