

Д.т.н., проф. Н.Л. Прохоров, к.т.н. Г.Г. Знайко, к.т.н. А.А. Швейн,
к.т.н., проф. В.Е. Красовский (ОАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»)

N. Prokhorov, G. Znaiko, A. Shvein, V. Krasovsky

**АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗРАБОТКИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОТЕЗИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ
НЕЙРОТЕХНОЛОГИЙ**

**ANALYSIS OF ISSUES AND OUTLOOK FOR THE DEVELOPMENT OF ROBOTIC
SYSTEMS FOR INTELLECTUAL PROSTHETICS BASED ON
NEUROTECHNOLOGY**

Анализируются основные направления развития технологий управления искусственными органами с применением нейроинтерфейсов. Приводятся результаты отечественных исследований и разработок в этой области.

Outlines the principal directions for the development of technology for controlling the artificial organs using neurointerfaces. Provides the results of domestic research and development in this area.

Ключевые слова: интерфейс мозг-компьютер, управление протезами, экзопротезы, нейроинтерфейсы.

Keywords: brain-computer interface, prosthetic device control, biological prosthetic devices , neurointerfaces.

Введение

Правительственный прогноз научно-технологического развития РФ на период до 2030 г. содержит список приоритетных научных задач, среди которых – разработка и создание интеллектуальных технических систем, в том числе нейроморфных, включая интерфейсы «мозг – компьютер».

Наука о мозге в XXI в. обогатилась новой методологической и технологической концепцией, в основе которой идея использования психических усилий человека-операто-

ра для коммуникации с внешней средой напрямую от мозга без участия периферических нервов и мышц.

Центральная нервная система (ЦНС) человека обладает уникальным свойством – пластичностью, т.е. способностью перестраивать структуру управления и переобучаться в соответствии с изменением задач, условий и возможностей функционирования. Это ключевое свойство позволяет подключать к ЦНС искусственные подсистемы не только с целью постоянного замещения утраченных органов (конечностей), но также с целью получения новых временно-необходимых функциональных возможностей и расширения диапазона достижимых параметров (силовых, скоростных и пр.).

Рефлексы, автоматизмы, точный контроль положения при движении могут быть распространены (тренингом) на новые искусственные подсистемы в принципе любого назначения. Такие подсистемы становятся антропоморфным продолжением человека: после соответствующего тренинга они «вписываются» в ЦНС, управление ими станет таким же естественным, как управление собственными конечностями.

Создание систем управления органами и функциями в организме человека сигналами от головного мозга, реализуемых в виде бионических экзопротезов, электронных имплантатов или экзоскелетов, позволит резко повысить качество жизни миллионов людей, облегчит существование многим пожилым и больным людям.

1. Основные направления развития

Развитие нейробиологии, нейрохирургии, микроэлектроники и технологий цифровой обработки сигналов создаёт возможности практической реализации нейроруляемых систем управления протезами. Существует значительный объем накопленных в этой области теоретических знаний и практического опыта. Об этом свидетельствует большое и постоянно возрастающее количество публикаций, посвящённых проблеме интерфейса мозг-компьютер (ИМК). Наибольшую интенсивность исследования в данной области приобре-

ли с 2000 года. Они выросли к настоящему времени в три раза, сохраняя тенденцию к устойчивому развитию (по данным SCOPUS).

Основанием для подхода к разработке ИМК было открытие возможности человека произвольным образом изменять выраженность спектральных компонентов собственной электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Первоначально на этой основе были созданы технологии так называемого тренинга биологических обратных связей (БОС-тренинга), наиболее разработанного в том числе и отечественными исследователями, например, в школе академика М.Б. Штарка. Методология БОС-тренинга позволяет человеку удерживать выведенные на экран те или иные показатели ЭЭГ в пределах некоторого коридора допустимых значений и тем самым поддерживать определенное специалистом целевое состояние функциональных систем организма. С появлением БОС-тренинга была выдвинута идея о том, что произвольное управление показателями собственной ЭЭГ можно использовать для кодирования команд или передачи сообщений внешним исполнительным устройствам.

Разрабатываются бионические системы с неинвазивными и инвазивными нейроинтерфейсами, а также периферийные (мышечные) биоинтерфейсы.

Неинвазивные интерфейсы удобны в повседневном применении, однако пока их быстродействие и надежность распознавания сигналов головного мозга (в частности – компонента P300) недостаточны для оперативного управления внешними устройствами. Тем не менее, есть объективные предпосылки к повышению в ближайшем будущем быстродействия и надежности работы неинвазивных интерфейсов.

Помимо неинвазивных нейроинтерфейсов большое внимание уделяется созданию инвазивных интерфейсов (вживляемых микрочипов, электродов, систем беспроводной передачи сигналов мозговой активности и др.), периферических нейроинтерфейсов (с вживляемыми устройствами для управления протезами конечностей), а также разработке необходимой для этих задач специальных компонентов – микроконтроллеров, различных миниатюрных датчиков (сенсоров), обеспечивающих передачу в систему информации о про-

странственно-временном положении ее отдельных частей, экономичных и миниатюрных источников питания и т.п. Среди принципиальных проблем, стоящих на этом направлении, – необходимость проведения высокоточных операций на вскрытом черепе для точной установки электродов на соответствующие области мозга.

Среди важных направлений в реализации ИМК-управления – включение-выключение сервисных устройств и подвижных средств для создания большего комфорта человеку в его трудовой деятельности, в быту и медицинской сфере, в частности, в управлении бытовой техникой, сегментами конвейера, инвалидной коляской. Одной из версий этой технологии может быть минимальный двухпозиционный ИМК-переключатель, рассчитанный на подачу только одной команды, например, включение тревожного сигнала, ключевого устройства, фиксатора протеза и т.д.

Ещё одно важное направление в реализации функции ИМК контроля состоит в управлении робототехническими системами, т.е. устройствами, способными расширить манипуляторные возможности человека. ИМК-технологии привнесут в мир манипуляторов и роботов совершенно новое качество: при всей процессорной насыщенности этих устройств, например мобильных роботов, целевые установки действий ИМК-роботов, в отличие от их традиционных версий, будут определяться командами непосредственно от головного мозга управляющего этими устройствами человека. В обиходе человека появятся настольные манипуляторы и прикроватные (в медицине) сервисные манипуляторы, ИМК-роботы, позволяющие человеку одним намерением дать задание на выполнение этими устройствами тех или иных манипуляций в широкой оперативной зоне его жизнедеятельности и даже вне этой зоны.

Функциональная электростимуляция мышц (ФЭС) – один из наиболее перспективных подходов для частичного восстановления двигательных функций человека при нерминальных парезах конечностей. В этой технологии адекватное позиционирование стимулирующих электродов и оптимальный подбор параметров стимуляции позволяют

добиться фазического повышения тонуса (например, соответствующих мышц кисти), достаточного для выполнения захвата и удержания предмета даже у пациентов с тетраплегией. Однако при том, что в настоящее время хорошо разработаны различные системы миостимуляции для восстановления отдельных движений, у таких пациентов остается нерешенной проблема самостоятельного включения стимуляции мышц в нужный для пациента момент. Даже для пациентов с ограниченными парезами, способными включать миостимуляцию мимикой, движением челюстей или языка, такое управление миостимулятором, очевидно, некомфортно и неэстетично. Поэтому вполне естественной была идея объединения ФЭС с ИМК, посредством которого предполагалось произвольным образом включать миостимуляцию по одному намерению пациента.

Дальнейшее развитие этих технологий привело к интеграции гибрида ИМК-ФЭС с управляемым ортезом, механически стабилизирующим и усиливающим движение атоничной конечности. Возможно, гибриды ИМК-ФЭС или ИМК-ортез могут быть использованы более широко, например, в протезировании конечностей у инвалидов, которые в силу неполной инвалидности хотя и могли бы управлять электромеханическим протезом с помощью, например, сохранной конечности, но, очевидно, более естественным для них было бы управление непосредственно «силой намерения» посредством ИМК.

Периферийными интерфейсами активно занимаются американские военные. Дело в том, что в случае ампутации, например, кисти руки или ноги до колена, использование сложных инвазивных мозговых нейроинтерфейсов не оправдано: проще считывать нервные импульсы с нервов поврежденной конечности. В DARPA считают мышечные нейроинтерфейсы очень перспективными и активно работают над соответствующими технологиями, которые позволят обеспечить надежное и долговременное соединение протеза с нервной системой человека. Кроме того, в перспективе подобные нейроинтерфейсы могут использоваться и здоровыми людьми – для управления специальной техникой и оборудованием.

В частности, речь идет об особом типе периферийного интерфейса TMR, который разработали в Реабилитационном институте Чикаго (RIC). Этот нейроинтерфейс обеспечивает повторную иннервацию мышц, причем в качестве замены ампутированной части тела выступает искусственно созданный механоэлектронный протез. TMR не только позволяет управлять протезом как собственной рукой или ногой, но и возвращает чувствительность, правда теперь в роли осязательных датчиков выступают не рецепторы в коже, а сенсоры в искусственном покрытии протеза.

В отличие от большинства других интерфейсов, TMR не требует визуальной связи с протезом, т.е. им можно управлять вслепую, как и обычной живой рукой. Работа в рамках TMR продолжится до 2016 года. Биоинтерфейсы более просты, чем нейроинтерфейсы, менее травматичны, чем инвазивные нейроинтерфейсы, и обеспечивают быструю реабилитацию инвалидов. Судя по всему, через 10 лет универсальный периферийный нейроинтерфейс будет готов для массового использования.

Как показывает анализ, разработка современных робототехнических систем интеллектуального протезирования будет проводиться по следующим наиболее перспективным направлениям:

- применение робототехнических принципов работы систем управления органами/функциями в массовых изделиях индивидуального назначения;
- использование в этих системах современных методов регистрации, обработки и интерпретации биоэлектрических сигналов, поступающих от головного мозга;
- применение в изделиях перспективной элементной базы (микрочипов, микроконтроллеров, сенсоров и др.) и современного программного обеспечения;
- применение в изделиях новых конструкционных материалов (композитов, углепластиков, титана и др.).

Для успешного развития и массового применения нейроуправляемых систем предстоит решить множество методологических и практических задач, находящихся на стыке

медицины, материаловедения, электроники и других областей. К основным из этих задач относятся:

- обеспечение безопасной долговременной (10–20 лет) совместимости имплантируемых искусственных материалов с биологическими тканями человека (прежде всего, вопрос реакции иммунной системы);

- вопросы интеграции в нервную систему человека (разработка эффективных нейрохирургических методик имплантации, обеспечивающих высокую надёжность и эффективность контакта, точность локализации и низкий уровень повреждений окружающих тканей и нервных клеток);

- разработка устройств беспроводной связи и энергообеспечения имплантированного и внешнего блоков системы;

- разработка эффективных методов, алгоритмов и программно-аппаратных средств обработки и анализа нейро- и биоинформации в реальном времени;

- создание методов и средств реализации обратных связей путем формирования искусственных ощущений;

- разработка искусственных компонентов конечностей, максимально схожих с естественными по биомеханическим (эргономическим, силовым и функциональным) параметрам.

Следует отметить, что рассматриваемые направления по своему характеру относятся к категории мультидисциплинарных исследований, о чем говорит следующий факт. В 2012 году опубликованы наиболее впечатляющие результаты группы исследователей под руководством Э. Шварца, заведующего лабораторией «MotorLab» (Университет Питтсбурга, США), посвященные созданию нейропротеза руки. Среди 11 авторов статьи этого коллектива, опубликованной в журнале «The Lancet» (Collinger et al., 2012), – биоинженеры, нейрохирурги, нейрофизиологи и специалисты по вычислительной математике и кибернетике из девяти научно-исследовательских и медицинских учреждений, преимуще-

ственно локализованных в г. Питтсбург (США).

2. Результаты отечественных исследований и разработок

Отечественные научные организации проводят интенсивные исследования в области робототехнических систем интеллектуального протезирования на основе нейротехнологий.

В настоящее время в лаборатории нейрокомпьютерных интерфейсов МГУ идет разработка систем интерфейса мозг-компьютер для управления антроидным роботом и антропоморфными манипуляторами (протезами). В будущем такие системы можно будет использовать для тренировки движений у временно парализованных пациентов, чтобы поддерживать моторные программы мозга в действии в самый острый период, когда собственные мышцы и нервы еще не в силах выполнять команды мозга.

В ОАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука» завершается разработка технического проекта, направленного на создание технологии и организацию производства ключевых компонентов для экзопротезирования нижних и верхних конечностей, управляемых от биопотенциалов головного мозга.

В Новосибирске исследованиями, связанными с нейрокомпьютерными технологиями, занимается отдел биофизики и биоинженерии Института молекулярной биологии и биофизики СО РАН, возглавляемый академиком РАН М.Б. Штарком. В частности, здесь разрабатывается технология биоуправления, основанная на принципе обратной связи.

В Институте высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН (Москва) под руководством д.б.н. Г.А. Иваницкого и д.б.н. А.А. Фролова разрабатываются эксклюзивные алгоритмы классификации паттернов электроэнцефалограммы, позволяющие ученым создавать прототипы интерфейсов мозг-компьютер, которые в недалеком будущем дадут постинсультным пациентам возможность владеть парализованными частями тела с помо-

щью управляемых мозгом экзопротезов.

В Институте нейрокибернетики им. А.Б. Когана (Ростов-на-Дону) под руководством профессоров Б.М. Владимирского и В.Н. Кироя на основе технологий интерфейсов мозг-компьютер разработаны системы управления инвалидной коляской, которые уже в недалеком будущем позволят больным передвигаться без посторонней помощи. В более далекой перспективе такие технологии дадут нам возможность управлять тихоходными передвижными средствами.

3. Оценки масштабов ожидаемых рынков

Оценку объемов ожидаемых рынков можно провести на примере протезно-ортопедических изделий. Так, из общего числа инвалидов в РФ (по оценкам это 12 – 15 млн. человек) 10% из них (т.е. около 1,5 млн. человек) нуждаются в протезировании нижних/верхних конечностей. Потребность в этих протезах в настоящее время удовлетворяется лишь на 70 – 80% и в денежном выражении составляет примерно 3 млрд. рублей в год. Рынок современных протезов в РФ сегодня примерно на 90% заполняет импорт из Германии, Исландии, США, Китая. Объем экспорта сравнительно простых протезно-ортопедических изделий в страны ближнего зарубежья и развивающиеся страны невелик (порядка 400 млн. рублей в год). В результате выполнения данной разработки и развертывания серийного производства современных бионических протезов появится возможность полного или частичного вытеснения с отечественного рынка иностранных импортеров, а также экспорта протезно-ортопедической продукции в третьи страны.

Исследование рынка от компании ABI Research на тему «Экзоскелеты, моторизированные протезы и оптические сенсорные устройства: всемирный рынок систем умножения/расширения возможностей человека» прогнозирует, что рынки систем расширения человеческих возможностей в период до 2020 года будут иметь совокупный темп годового прироста приблизительно в 41%, при этом годовой доход возрастет с 29 млн. долларов до

более чем 877 млн. долларов.

Согласно результатам исследования, усовершенствованные моторизованные протезы верхних конечностей, которые включают в себя миоэлектрические и управляемые на уровне нервов конечности с шарнирно-сочлененными пальцами, покажут за расчетный период совокупный темп годового роста 28,5%. У окулярных устройств сенсорного замещения для слепых, таких как ретинальные имплантаты и глазные протезы, за ближайшие десять лет этот показатель составит почти 75% с запланированным к отгрузке объемом в 16000 единиц в 2020 году.

Заключение

Анализ состояния работ в мире в данной области показал актуальность проблемы роботизации в различных сферах деятельности человека и острую потребность РФ в массовом производстве современных интеллектуальных изделий медицинского и специального назначения, основанных на их управлении сигналами от головного мозга.

На основе изложенных методологических и практических результатов в ОАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука» в настоящее время проводятся теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку и производство широкой гаммы унифицированных модулей бионических экзопротезов, электронных имплантатов и экзоскелетов (изготовлены макеты нейромозгового интерфейса, нейромышечного интерфейса, модулей для снятия биомеханики движения человека, роботизированного коленного сустава), ведутся непрерывные работы по совершенствованию интерфейса мозг-компьютер.

Литература

1. Kaplan A.Ya., Lim J.J., Jin K.S. et al. Unconscious operant conditioning in the paradigm of brain-computer interface based on color perception – «Intern. J. Neuroscience», 2005, v. 115, p. 781-802.

2. Ганин И.П., Шишкин С.Л., Кочетова А.Г., Каплан А.Я. Интерфейс мозг-компьютер «на волне P300»: исследование эффекта номера стимулов в последовательности их предъявления – «Физиология человека», 2012, т. 38, №2, с. 5-13.
3. Базанова О.М., Штарк М.Б. Оптимизации психомоторной реактивности. Сообщение I. Сравнительный анализ биоуправления и обычной исполнительской практики – «Физиология человека», 2007, т. 33 (4), с. 24-32.
4. Shishkin S.L., Ganin I.P., Kaplan A.Y. Event-related potentials in a moving matrix modification of the P300 brain-computer interface paradigm – «Neuroscience Letters», 2011, v. 496 (2), p. 95-99.
5. Kaplan A., Shishkin S., Ganin I., Basul I. The prospects of the P300-based brain-computer interface in game control – «IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games», 2013 (in press).
6. Даминов В.Д., Рыбалко Н.В., Горохова И.Г., Короткова И.С., Кузнецов А.Н. Реабилитация больных в остром периоде ишемического инсульта с применением роботизированной системы «Erigo» – «Вестник восстановительной медицины», 2008, №6, с. 50-53.
7. Кадыков А.С., Черникова Л.А., Шапаронова Н.В. Реабилитация неврологических больных. – М.: МЕДпресс-информ, 2008, 560 с.
8. Кочетков А.В., Пряников И.В., Костив И.М. и др. Метод восстановления утраченной или нарушенной функции ходьбы с использованием роботизированной системы «Lokomat» (НОСОМА, Швейцария) у больных травматической болезнью спинного мозга – «Вестник восстановительной медицины», 2009, №1, с. 82-86.
9. Макарова М.Р., Преображенский В.Н. Программы опорно-двигательной активности у больных, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения, с применением новых медицинских технологий – «Вестник восстановительной медицины», 2008, №4, с. 41-42.
10. Черникова Л.А., Демидова А.Е., Домашенко М.А. Эффект применения роботизированной системы «Lokomat» у больных с острым нарушением мозгового кровообращения

зированных устройств («Эриго» и «Локомат») в ранние сроки после ишемического инсульта – «Вестник восстановительной медицины», 2008, №5, с. 73-75.

11. Знайко Г.Г., Стулин И.Д. Компьютеризованный многофункциональный комплекс для исследования головного мозга, артерий и вен головы и конечностей – «Научные технологии», 2001, т. 2, №1, с. 61-69.

12. Прохоров Н.Л., Олейников А.Я., Знайко Г.Г., Красовский В.Е., Стулин И.Д., Швейн А.А. Инновационные технологии в проектировании медицинских диагностических комплексов – «Вопросы радиоэлектроники», сер. ЭВТ, 2008, вып. 2, с. 13-28.

13. Прохоров Н.Л., Швейн А.А., Знайко Г.Г., Красовский В.Е. Проблемы управления информационными процессами в проектировании и применении медицинской техники – «Мехатроника, автоматизация, управление», 2011, №7.

14. Головин В.Ф., Архипов М.В., Журавлев В.В. Обзор состояния робототехники в восстановительной медицине – «Мехатроника, автоматизация, управление», 2011, №8.

15. Каплан А.Я., Кочетова А.Г., Шишкин С.Л., Басюл И.А., Ганин И.П., Васильев А.Н., Либуркина С.П. Экспериментально-теоретические основания и практические реализации технологии «Интерфейс мозг-компьютер» – «Бюллетень сибирской медицины», 2013, т. 12, №2, с. 21-27.

16. Материалы маркетинговых исследований компании Research Techart от 09 августа 2011 г. «Обзор российского рынка протезов верхних и нижних конечностей».

17. Musallam S., Corneil B.D., Greger B., Scherberger H., Andersen R.A. Cognitive Control Signals for Neural Prosthetics – «Science», 2004, v. 305, p. 258-262.

18. Leigh R. Hochberg, Mijail D. Serruya, Gerhard M. Friehs, Jon A. Mukand, Maryam Saleh, Abraham H. Caplan, Almut Branner, David Chen, Richard D. Penn and John P. Donoghue. Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia – «Nature», 2006, v. 442, p. 164-171.

19. Hochberg L.R. et al. Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally con-

trolled robotic arm – «Nature», 2012, v. 485, p. 372-375.

20. Popescu F., Blankertz B., Muller K-R. Trends and controversies: Computational challenges for non-invasive Brain Computer Interfaces – «IEEE Intell Syst», 2008, v. 23, p. 78-79.

21. Muller-Putz G.R, Scherer R., Pfurtscheller G., Rupp R. EEG-based neuroprosthesis control: a step towards clinical practice – «Neurosci Lett», 2005, v. 382, p. 169-174.

22. Lebedev M.A., Carmena J.M., O'Doherty J.E., Zacksenhouse M., Henriquez C.S., Principe J.C., Nicolelis M.A. Cortical Ensemble Adaptation to Represent Velocity of an Artificial Actuator Controlled by a Brain-Machine Interface – «Journal of Neuroscience», 2005, v. 25, p. 4681-4693.

23. Velliste M., Perel S., Spalding M.C., Whitford A.S., Schwartz A.B. Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding – «Nature», 2008, v. 453, p. 1098-10101.

24. Hinterberger T., Veit R., Wilhelm B., Weiskopf N., Vatine J.J., Birbaumer N. Neuronal mechanisms underlying control of a brain-computer interface – «Eur. J. Neurosci», 2005, v 21, p. 3169-3181.

25. Höller Y., Bergmann J., Kronbichler M. et al. E. Real movement vs. motor imagery in healthy subjects – «Int. J. Psychophysiol», 2012, p. S0167-8760.

26. Leeb R., Sagha H., Chavarriaga R., Del Millan J.R. A hybrid brain-computer interface based on the fusion of electroen-cephalographic and electromyographic activities – «J. Neural Eng.», 2011. v. 8, p. 1-5.

27. Salvaris M., Cinel C., Citi L., Poli R. Novel protocols for P300-based brain-computer interfaces – «IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng.», 2012, v. 20, p. 8-17.

28. Кузнецов А.Н., Даминов В.Д., Рыбалко Н.В., Канкулова Е.А. Роботизированная локомоторная терапия в реабилитации пациентов с поражением нервной системы – от научных теорий в клиническую практику – «Вестник восстановительной медицины», 2011, № 2.