
DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt187.01.049>

УДК 615.47; 004.9

М.И. БОБК, канд. биол. наук, старш. науч. сотр.,
зав. отд. биоэлектрического управления и медицинской кибернетики
e-mail: dep140@irtc.org.ua
Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем
НАН Украины и МОН Украины, п-кт Академика Глушкова, 40,
г. Киев, 03680 ГСП, Украина

БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ЧЕЛОВЕКА

Рассмотрена эволюция синтеза биотехнических систем управления двигательными функциями как внешних контуров управления — «Миотон», «Миокор», адаптивных «Миостимул», используемые для восстановления двигательных функций. Представлен новый класс электронных аппаратов цифровой медицины, персональных, биологически адекватных «Тренар». Теоретической основой синтеза таких систем является обработка электромиографических (ЭМГ) сигналов. Адекватность воздействий состоянию двигательных функций, этапу их восстановления обеспечивается различными программами и методами управления. Рассмотрена оригинальная технология управления тонкой моторикой кисти для восстановления речи на базе аппаратов «Тренар».

Ключевые слова: биотехнические системы, электронные аппараты, управление, реабилитация, движение, речь, персональный подход, программная электростимуляция, биологическая обратная связь, электромиографический сигнал.

ВВЕДЕНИЕ

«Все бесконечное разнообразие внешних проявлений мозговой деятельности сводится окончательно к одному лишь явлению — мышечному движению...».

И.М. Сеченов «Рефлексы головного мозга», 1863 г.

Мы привыкли совершать разнообразные движения и действия, совершенно не задумываясь о том, насколько это сложный и уникальный механизм, позволяющий здоровому человеку свободно, не думая и не напрягаясь, совершать все то разнообразие движений, которыми наградила нас природа. Более того, движения являются самыми доступными и эффективными лекарствами, лучшим средством для восстановления здоровья и гармоничного развития человека. Люди со специальными потребностями, например, те, кто имеет синдром детского церебрального паралича (ДЦП), или утра-

тил двигательную активность в результате тяжелых заболеваний центральной, периферической нервной системы или травм особенно ценят и понимают значение двигательной активности. Цереброваскулярная патология и их наиболее тяжелая форма — инсульт являются одной из наиболее частых причин потери двигательных функций. В настоящее время отмечается стремительная тенденция к увеличению числа больных инсультом, а также к их «омоложению». По данным ВОЗ 30 % больных составляют лица трудоспособного возраста (до 50–60 лет). Инсульт — ведущая причина инвалидности взрослого населения, а ДЦП остается ведущей причиной инвалидности среди детей. Разработка эффективных методов и средств восстановления двигательных функций не перестает быть актуальной.

Одним из направлений биологической и медицинской кибернетики, последовательно развивающимся в Международном научно-учебном центре информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, являются исследования, связанные с разработкой информационных технологий управления движениями на основе биотехнических систем, аппаратно-программных комплексов, как внешних контуров управления. Такие внешние контуры, «встраиваясь» в разветвленную, иерархически организованную, с обратными связями собственную систему управления движениями человека, выполняют в ней роль недостающего звена по поддержанию, восстановлению и/или формированию нового двигательного стереотипа взамен утраченного или искаженного патологией. Функцию внешних контуров регуляции движений выполняют биотехнические системы.

Научные исследования этого направления характеризуются как теоретическими, так и прикладными результатами — от идеи, разработки концептуальных основ, физиологических предпосылок, методов, формулирования принципов, разработки алгоритмов, информационно-структурных и структурно-функциональных моделей биотехнических систем управления движениями человека до технической реализации нескольких поколений электронных аппаратов управления движениями, разработки действующих экспериментальных образцов, передачи в серийное производство и практическое использование. Такие системы предназначены для: восстановительного лечения остаточных явлений поражений центральной и периферической нервной системы у взрослых и детей (например, постинсультные параличи и парезы, невриты различного характера), травмы опорно-двигательного аппарата; управления движениями, их коррекции или обучения определенным двигательным навыкам (например, при тренаже, профессиональном обучении, спорте и т.д.); предупреждения неблагоприятного влияния ограничений двигательной активности; управления функциями, тесно связанными с двигательными, например речевыми, секреторными.

Исследования, направленные на разработку теоретических и прикладных основ управления движениями зародились еще в стенах Вычислительного Центра АН УССР в лаборатории биоэлектростимуляции отдела Биологической кибернетики (зав. отделом академик Н.М. Амосов). С 1962 г. продолжились в Институте кибернетики АН УССР, с 1964 г. в лаборатории «Управление двигательными реакциями в живых организмах», с 1969 г. в отделе «Биоэлектрическое управление и медицинская кибернетика». С мая 1997 г. по настоящее время продолжают развиваться в Международном

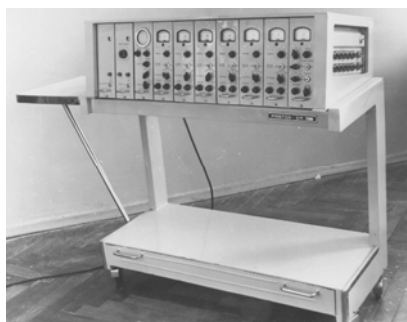
центре НАН и МОН Украины, в упомянутом отделе. С 1964 по 2009 г.г. исследованиями руководил доктор медицинских наук, профессор Леонид Седекович Алеев — лауреат Премии имени Н.М. Амосова, 2004 г.

Цель статьи — рассмотреть эволюцию развития исследований, направленных на синтез информационных технологий управления движениями человека на основе биотехнических систем как внешних контуров управления и представить теоретические и прикладные результаты исследований.

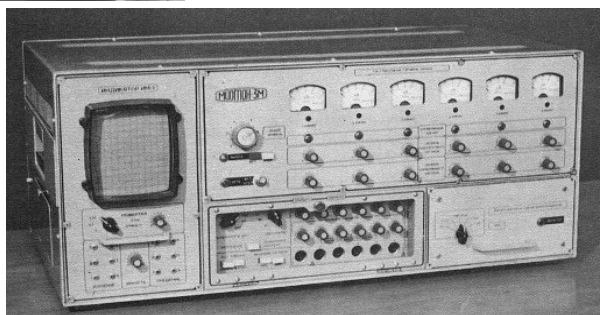
МНОГОКАНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ ЧЕЛОВЕКА ТИПА «МИОТОН»

Еще в 60-х годах XX века был разработан метод программного биоэлектрического управления движениями человека, в основу которого положена многоканальная электростимуляция выбираемого нервно-мышечного комплекса, управляемая по программам, полученным в виде преобразованных электромиографических сигналов одноименных мышц другого человека [1]. В 1965 г. в Институте кибернетики АН УССР изготовлен первый экспериментальный образец многоканального устройства биоэлектрического управления движениями человека «Миотон», реализующего этот метод. В 1967-1970 г.г. были разработаны и изготовлены в СКБ Института кибернетики три опытных образца 6-канального устройства «Миотон-2», которые сразу стали использоваться в неврологических отделениях Октябрьской больницы, г. Киев, 1-ой городской больницы, г. Запорожье — для восстановления двигательных функций после инсульта, санаториях г. Саки и г. Евпатория — для восстановительного лечения двигательных функций у детей [2]. В 1977 г. аппарат «Миотон-2» включен в номенклатуру разрешенных для применения в медицинской практике и серийного производства изделий медицинской техники (Регистрационное удостоверение № 77/29/13 от 4.02.1977 г.).

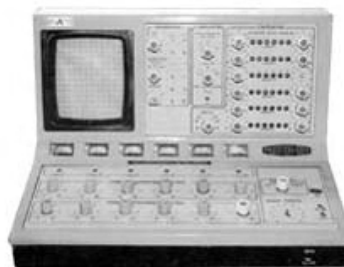
Сотрудничество отдела Биоэлектрического управления и медицинской кибернетики с Арзамасским приборостроительным заводом (АПЗ) Министерства авиапромышленности СССР привело к выпуску партии изделий «Миотон-2» (рис. 1 а). По сравнению с известными аппаратами, выпускаемыми в те годы в СССР, например «Амплипульс», или зарубежными терапевтическими электростимуляторами RS 10, RS 12, которые изготавливались фирмой Veb Tur (ГДР), «Миотон-2» обладал принципиальным отличием использования в качестве программы управления сокращениями мышц преобразованной биоэлектрической активности мышц человека-донора, задающего программу движения. В сочетании с многоканальностью это позволяло навязывать движения, близкие к естественным. Модернизация «Миотон-2» привела к разработке и выпуску на АПЗ многоканального программного биоэлектрического миостимулятора «Миотон-3М», 1983 г. (рис. 1 б), важным отличием которого являлось формирование стимулирующего сигнала с порогового уровня (соответствующего порогу возбуждения стимулируемых мышц), что увеличивало соответствие навязанного движения программному [3]. В состав «Миотон-3М» входил шестиканальный магнитный регистратор, позволяющий формировать «банк двигательных программ», записанных со здоровых мышц другого человека, и шестиканальный видеоконтро-



а)



б)



в)

Рис. 1. Биотехнические системы управления движениями человека типа «Миотон»: а) «Миотон-2», б) «Миотон-3М», в) «Миотон 604»

льный индикатор, позволявший оператору и пациенту проводить визуальный контроль двигательных программ, поступающих на мышцы пациента и сравнивать их с выполняемыми движениями. В 1988 г. «Миотон-3М» демонстрировался на Лейпцигской ярмарке и был награжден Золотой медалью. На базе «Миотон-3М» с 1989 г. на АПЗ начался серийный выпуск биоэлектрического стимулятора «**Миотон-604**» (рис. 1 в) с улучшенными техническими характеристиками и сервисными функциями. «Миотон-604» работает в режимах: прямое управление движениями реципиента от донора; запись программы управляющих биосигналов на магнитограф; управление движениями реципиента по программе, ранее записанной на магнитограф; управление стимуляцией от встроенного синтезатора программ. Самая последняя модель «Миотон-М» — результат модернизации аппарата «Миотон-604» АПЗ совместно с ООО «СТЭК», г. Нижний Новгород, Россия, имеет малые габариты, современную элементную базу, улучшенные технические характеристики и более широкий спектр сервисных функций. Кроме базового, для клиничес-

ких учреждений предполагается разработка и производство упрощенного варианта «Миотон-М» для фитнес-клубов и ветеринарных лечебниц.

Системы управления движениями типа «Миотон» нашли широкое применение в лечебной практике клиник и курортов различных регионов СССР для восстановления двигательных функций, нарушенных при различных поражениях центральной и периферической нервной системы [4]. Аппарат «Миотон-604» до сих пор с успехом используется в клинической практике [5].

90-е годы XX ст. отмечены сотрудничеством отдела Биоэлектрического управления и медицинской кибернетики с НПКФ «Биокоринформатика» при Институте кибернетики имени В.М. Глушкова АН УССР, в результате которого разработан, поставлен на производство и нашел применение в лечебной практике медицинских учреждений Украины электростимулятор многоканальный программный биоэлектрический «**Миокор-МК-01**» (рекомендован к постановке на производство Комиссией по аппаратам и приборам, применяемым в физиотерапии, Комитета по новой медицинской технике МЗ СССР, протокол №4 от 08.04.1991 г.). Отличительная особенность аппарата — широкий набор искусственно синтезированных программ управления стимулирующими сигналами, учитывающих наиболее характерное вовлечение мышц в выполнение различных движений, и наглядное отображение программ.

БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ

Результаты экспериментальных исследований по динамике изменения ключевых параметров мышцы (порог возбуждения, сила максимального сокращения) [4], а также результаты анализа изменений параметров ЭМГ сигнала (амплитуда, частота) в результате утомления мышц при произвольных и вызванных электростимуляцией сокращениях послужили теоретической основой синтеза обратных связей в устройствах управления мышечными сокращениями. Это позволило перейти к новому классу устройств, реализующие принципы адаптивного управления, когда параметры стимулирующего сигнала автоматически подстраиваются под функциональное состояние стимулирующих мышц [6, 7]. Известно, что адаптивный подход полезен в условиях начальной неопределенности и в системах управления объектами с дрейфующими характеристиками. Обе ситуации имеют место при управлении движениями на основе электростимуляции мышц. Так, ключевые параметры идентичных мышц для различных людей и различных мышц для одного и того же человека имеют существенный разброс; претерпевают существенные изменения в процессе стимуляции вследствие адаптации и/или утомления, существенно отличаются при патологии. Кроме того, при реабилитации двигательных функций важно не столько добиваться выполнения полного движения (особенно на начальных этапах реабилитации), сколько получить проприоцептивную афферентацию для формирования нового динамического стереотипа. При этом не следует выходить за пределы максимальных стимулов, поскольку при больших уровнях электростимулирующего сигнала в работу включаются защитные

реакции организма, которые могут исказить желаемую искусственно вызванную афферентацию. Отсюда вытекает необходимость в автоматической (в зависимости от функционального состояния стимулируемых мышц) регулировке динамического диапазона стимула. В дополнение, адаптивное управление приводит к увеличению соответствия выполняемых движений заданной программе, что существенно в специальных задачах управления движениями, когда требуется выполнять условие линейного управления. Технология адаптивного управления защищена патентами США, Англии, Германии, Франции, Канады, Швеции, Италии, Югославии [8, 9]. Принципы адаптивного управления реализованы в аппарате «Миостимул» — Стимулятор электрический медицинский, два промышленных образца которого выпущены предприятием «Октава», завод «Генератор», г.Киев в 1975 г. и 1977 г. «Миостимул» содержит две основные обратные связи, реализующие адаптивный подход. Первая служит для автоматического регулирования динамического диапазона стимулирующего сигнала в зависимости от функционального состояния мышц, с целью уменьшения искажения программы движения при управлении. При этом основным параметром, к которому подстраивается управляющее воздействие, является порог возбуждения стимулируемых мышц [6]. Вторая обратная связь осуществляет перевод на «щадающий» режим стимуляции либо отключение стимуляции при наступлении утомления стимулируемых мышц. В этом случае в качестве сигнала обратной связи используются информативные параметры биоэлектрической активности мышц, сокращениями которых управляют — амплитуда и частота «вызванной» электромиограммы [7].

ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ ПЕРСОНАЛЬНОГО БИОЛОГИЧЕСКИ АДЕКВАТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ «ТРЕНАР»

Современный этап развития информационной технологии управления движениями человека характеризуется биологически адекватным, целенаправленным подходом к управлению двигательными функциями. Главными достоинствами этой технологии являются: возможность организовать индивидуальный, в зависимости от нозологии, глубины патологии и этапа реабилитации, подход к реабилитации, активировать дополнительные резервы организма на восстановление двигательных функций. Сформулированные принципы, разработанные критерии, информационно-структурные модели организации биологически адекватного управления движениями, подробно описаны в [10, 11]. Понятие «адекватность» рассматривается как индивидуальный критерий оптимального (с точки зрения достижения главного результата — восстановление двигательных функций) формирования движений и оптимальной мобилизации резервов на разных этапах восстановления.

На базе обработки и преобразования электромиографических сигналов в световые и звуковые информативные сигналы получила развитие теория «образного» (зрительного и слухового) осознания мышечной активности зрительным и слуховым анализаторами коры головного мозга. В результате такого преобразования ЭМГ сигналы, характеризующие ключевые параметры мышечной активности (сила и скорость сокращения мышц), ранее

недоступные, стали доступны сознанию в виде зрительных и слуховых образов. Это позволило активировать дополнительные резервы моторной области коры на восстановление двигательных функций. Известно, что моторная область, являясь кортикальным отделом проприоцептивной сенсорной системы, одновременно оказывается местом конвергенции проекций от всех других сенсорных зон коры и как высший интегративный отдел мозга млекопитающих является «центральным аппаратом построения движений». Использование в системах управления движениями не только метода программной электростимуляции мышц, но и метода биологической обратной связи (БОС), а также сочетание этих методов способствует установлению движения во взаимосвязи со зрительным, слуховым анализаторами, позволяет расширить ассоциативные связи между новыми функциональными образованиями, которые начинают выполнять роль утраченных структур в собственной системе управления движениями пациента. Метод БОС — зрительной и слуховой, используемый параллельно с другими методами и как самостоятельный метод, позволяет проводить осознанный контроль тренировочного задания, способствуя эффективности реабилитационных мероприятий. Такие программы как «Донор» или «Пороговая стимуляция», «готовят» и делают более восприимчивой поврежденную моторную зону к управляющим воздействиям, усиливают эффективность афферентации как основного способа формирования новой рефлекторной системы супраспинального контроля движений взамен утраченного или искаженного патологией.

Описанный подход реализован в новом классе электронных систем биологически адекватного управления движениями типа ТРЕНАР®, представленный двумя модификациями электронных аппаратов цифровой медицины: «Аппарат для электростимуляции с биоуправлением Тренар-01» и «Аппарат для электростимуляции с биологической обратной связью Тренар-02» (рис. 2).

Гамма тренировочных программ как информационно-энергетических сигналов управления в аппаратах «Тренар» представлена:

1) электростимуляцией мышц по искусственно синтезированным программам в широком диапазоне — программы «Синтез»;

2) по программам, которые «считываются» с собственных здоровых мышц пациента или мышц другого человека (инструктора) при их произвольном сокращении и передаются тренируемым мышцам в режиме «онлайн» — программы «Донор»;

3) тренировкой соотношения принудительно-произвольных сокращений по методу пороговой электростимуляции — программа «Порог»;

4) тренировкой произвольных сокращений мышц по методу биологической обратной связи с использованием ЭМГ сигнала тренируемой мышцы, преобразованного в зрительные и слуховые информационные сигналы — программа «Биотренировка»;

5) тренировкой произвольных и принудительных сокращений мышц в режиме «запись — воспроизведение», когда записанный в памяти ЭМГ сигнал произвольно сокращающейся мышцы воспроизводится в виде программы электростимуляции той же мышцы — программа «Память-Ауто» [12, 13].



Рис. 2. Электронные аппараты биологически адекватного управления движениями ТРЕНАР®.

Основу этих программ составляет «электромиографический образ» мышечного движения, несущий информацию о силе и скорости мышечного сокращения. Преобразование «электромиографических образов» в информативные «зрительные и звуковые» образы мышечного движения позволило активировать сознание в процессе тренировки мышц и, тем самым, активировать дополнительные резервы организма на восстановление двигательных функций при патологии.

При биологически адекватном управлении движениями «электромиографический образ» мышечного сокращения выполняет разные функции:

- детектор состояния мышечного сокращения (норма, патология);
- модель (программа) формирования принудительных мышечных сокращений;
- модель (программа) формирования тренировочного задания произвольных мышечных сокращений. ЭМГ-образ мышечных сокращений используется также для комплексной активации сенсорных зон коры головного мозга — проприоцептивной, зрительной и слуховой.

Как внешние контуры управления движениями, аппараты Тренар имеют электрическую и информационную связь с мышцами, которые управляют и электрическую и/или информационную связь с мышцами, которыми управляют в зависимости от программы тренировки (рис. 3) [14]. Разнообразие программ формирования/тренировки движений обеспечивает выбор программы, адекватной функциональному состоянию двигательной системы пациента, позволяет индивидуально на каждом этапе реабилитации организовать процесс тренировки, наиболее эффективно мобилизующий резервы орга-

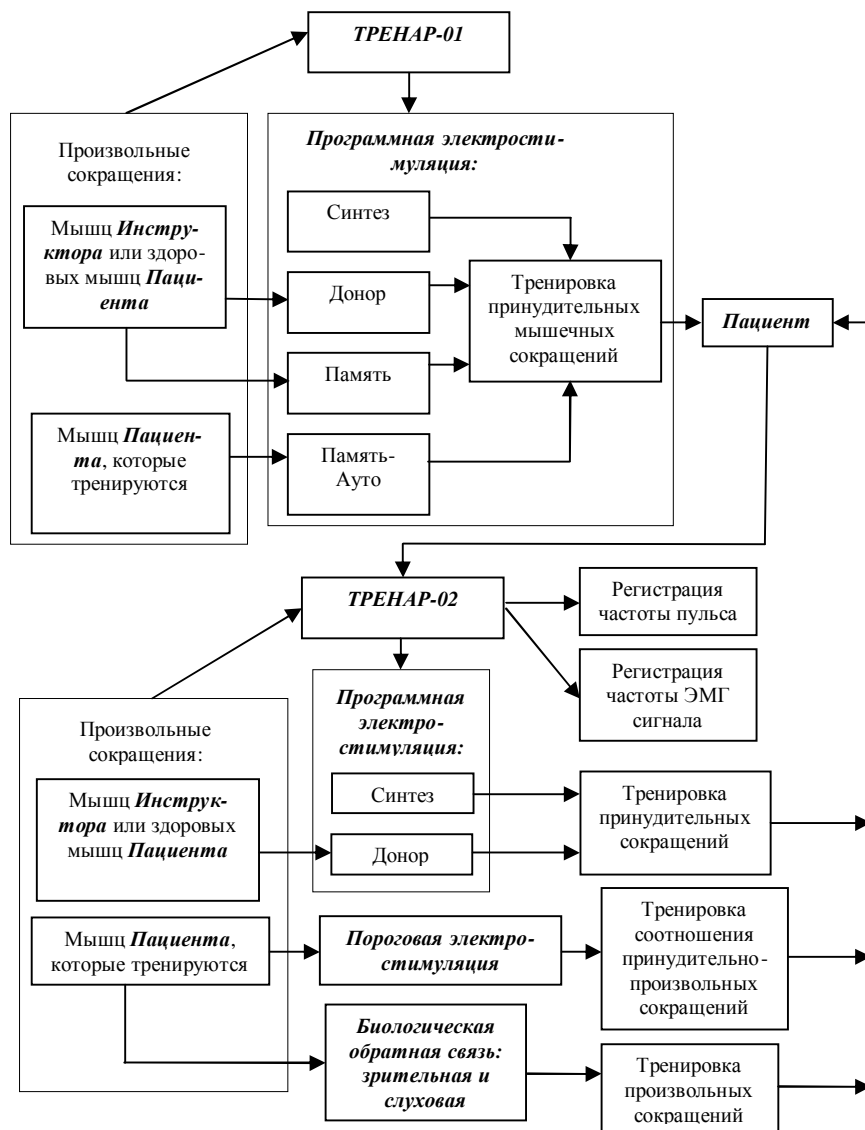


Рис. 3. Аппараты ТРЕНАР как внешние контуры управления движениями. Структурно-функциональная модель

низма на восстановление движений, вплоть до их полного восстановления. Структурно-функциональные модели активации поврежденной моторной зоны коры на восстановление управления движениями по программам «Синтез», «Донор» (метод — программная электростимуляция) и «Биотренировка» (метод БОС) представлены и описаны в [15].

Рассмотренная организация управления процессом восстановления патологически измененных двигательных функций является примером организации интеллектуального управления, которое появилось на стыке нейробиологии, кибернетики, информатики.

Показателем интеллектуального управления является единство ситуационной и конечной цели управления. Конечная цель — это восстановление двигательных функций. Ситуационная цель зависит от неврологического статуса пациента, состояния его двигательных функций и определяет метод, программу, параметры и регламент тренировки движений на определенном этапе реабилитации [10].

Как интеллектуальные системы, аппараты «Тренар» характеризуются доминированием в них избирательной структурно-функциональной организации с целью получения результата — биологически адекватной активации резервов организма на восстановление двигательных функций. Такой подход совпадает с фундаментальным положением П.К. Анохина о роли результата как фактора, который образует функциональную систему [16]. Гибкая архитектура аппаратов «Тренар» позволяет реализовать этот принцип и организовать разные программы тренировки движений с целью получения главного результата — восстановление двигательных функций. Управление восстановлением двигательных функций на базе аппаратов «Тренар» удовлетворяет главным принципам реабилитации: раннее начало реабилитационных мероприятий; систематичность и продолжительность; адекватность на каждом этапе реабилитационных мероприятий; активное участие в реабилитации пациента.

Технология биологически адекватного, целенаправленного управления движениями и электронные аппараты «Тренар» ее реализующие, защищены рядом авторских свидетельств и патентов [17–20], переданы в промышленное производство на ГНПП «Электронмаш», г. Киев, получили Свидетельства о Государственной регистрации, разрешены для применения на территории Украины. Всесторонняя клиническая апробация аппаратов в 16 клинических и оздоровительных учреждениях различных регионов Украины подтвердила их эффективность при восстановлении двигательных функций взрослых и детей (более 12 000 пациентов).

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТОНКОЙ МОТОРИКОЙ КИСТИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЧИ НА БАЗЕ АППАРАТОВ «ТРЕНАР»

Нарушения речи (афазии, дизартрии) наблюдаются более чем у трети больных, перенесших инсульт, и являются вторым по значимости и распространенности постинсультным дефектом после двигательных нарушений. Моторная афазия — патология устной речи, которая характеризуется нарушением структурно-семантического оформления речевого высказывания, проявляется у 18–27% пациентов, перенесших инсульт. Наличие речевого дефекта после перенесенного инсульта, черепно-мозговой травмы, опухоли мозга либо оперативного вмешательства на головном мозге значительно снижает коммуникативные возможности, повседневную жизненную активность больных, способствует их социальной изоляции. Разработка эффективных методов и средств восстановления речевых функций как и двигательных после инсульта не перестает быть актуальной.

Речевые движения являются одним из видов произвольных движений. Поэтому наиболее эффективным подходом к реабилитации речи является

комплексный подход, при котором логопедические занятия, сопровождающиеся медикаментозной терапией, сочетаются с методами, направленными на формирование кинестетической афферентации от мышц речевых органов. Кроме артикуляционного аппарата, различают еще один «орган речи», который имеет онтогенетическую связь с функциональной системой речи. Это — кисть. Известно, что развитие тонкой моторики кисти доминантной руки влияет на уровень речевого развития детей [21]. Однако пальчиковая гимнастика малоэффективна при выраженных патологиях движений дистальных отделов руки, а метод подпороговой электростимуляции тыльной поверхности кисти рук (для создания афферентации от мышц кисти и пальцев), не вызывающий сокращения мышц [22], малоэффективен, поскольку не направлен на формирование движений тонкой моторики кисти. Между тем, именно формирование мелкой моторики кисти имеет онтогенетическую связь с функциональной системой речи.

Анализ механизмов нейропластичности коры головного мозга и путей ее активации при восстановлении движений и речи, близкая локализация представительства кисти и центров речи в коре головного мозга, их тесная филогенетическая связь, учет такого фактора, как величина проекции кисти в коре головного мозга, которая занимает около трети всей двигательной проекции, а также принимая во внимание то, что развитие речи с ее многообразием звуков, слов, предложений и логическим отражением человеком восприятия мира, собственной оценкой окружающей среды, тесно связано с развитием движений пальцев рук — все это послужило основой для разработки нового метода и технологии восстановления моторики речи на базе подключения к пациенту внешнего контура индивидуализированного управления мышечными движениями кисти [23, 24]. В качестве внешнего контура, целенаправленно формирующего движения кисти и пальцев пораженной руки, использован аппаратно-программный комплекс ТРЕНАР, хорошо зарекомендовавший себя при восстановлении двигательных функций после инсульта [15].

Отличительной особенностью разработанного метода восстановления устной речи у пациентов после инсульта является формирование афферентации от различных мышечных сокращений кисти и пальцев пораженной руки. Расширенная гамма движений тонкой моторики, отобранных с учетом онтогенеза развития движений кисти и пальцев, особенностей функционального состояния пораженной конечности после инсульта и доступности подведения управляющих воздействий с помощью поверхностных электродов позволяет расширить область активации представительства кисти в моторной зоне коры, что способствует реорганизации моторного центра речи.

Проблема многокритериального выбора параметров тренировок кисти и пальцев, который осуществляет врач при организации индивидуального подхода к реабилитации, решена включением в систему управления движениями информационного компонента — специализированного программного модуля, реализованного в структуре персонального компьютера (ПК) [25, 26]. Разработанные на основе продукционной модели представления знаний критерии определения индивидуализированного комплекса управляющих воздействий, — движения, программы и регламент управления, — позволяют врачу формировать стратегию реабилитационного курса

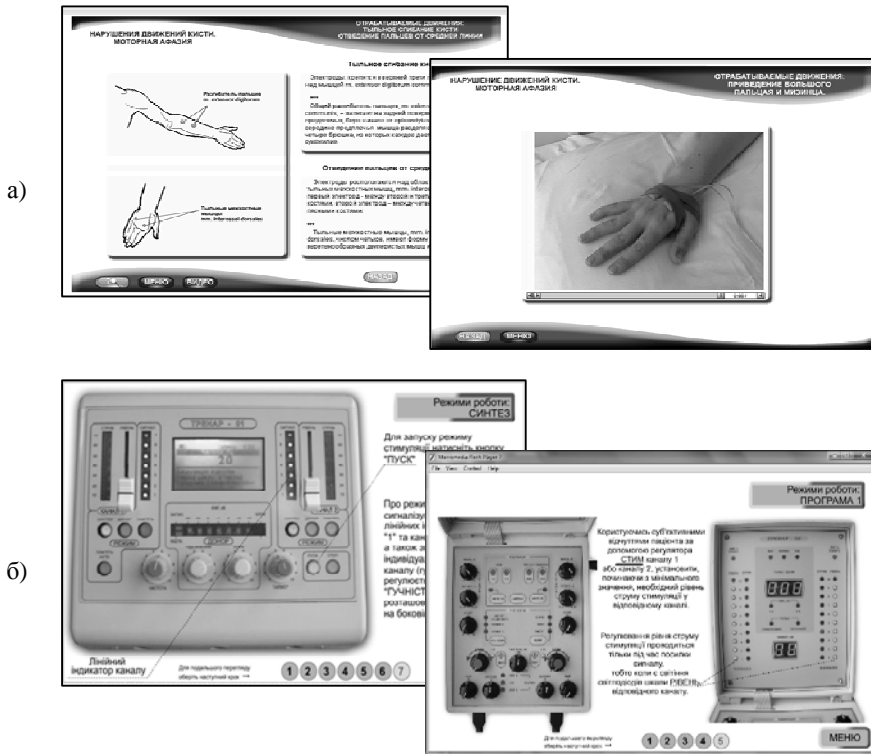


Рис. 4. Фрагменты а) медицинского и б) технического модулей мультимедийного справочника

с учетом текущего состояния больного, его неврологического статуса, состояния двигательных функций, наличия сопутствующих заболеваний и специфических противопоказаний. Специализированный программный модуль объединяет подсистему поддержки принятия решений и электронный мультимедийный справочник, предоставляющий информацию о видах движений тонкой моторики кисти, топологии подведения информационно-энергетических управляющих сигналов к мышцам, функционировании аппаратов «Тренар» по различным программам управления движениями (рис. 4). Интегрированный в архитектуру ПК программный модуль обеспечивает информационно-консультационную поддержку врача при проведении реабилитационных мероприятий по восстановлению речи и, при необходимости, консультирует в интерактивном режиме оператора (врача) относительно практического использования технологии управления тонкой моторикой кисти на базе электронных аппаратов «Тренар» (рис. 5)

Разработанная методика количественной экспресс-оценки моторных и сенсорных нарушений речи при моторной или моторно-сенсорной афазии позволила объективизировать диагностику степени выраженности дефекта речи и оценить восстановление речи даже в пределах небольшой положительной динамики [27]. Использование новой информационной технологии восстановления моторного компонента речи в сочетании с базовым курсом реабилитации у больных после инсульта с нарушением движений по типу

гемипареза и речи по типу моторной или моторно-сенсорной афазии улучшает функцию речи на 32,5 % ($p < 0,02$) по сравнению с базовым курсом реабилитации. Более выраженная эффективность восстановления речи наблюдается у пациентов в раннем периоде реабилитации, а также при использовании нескольких программ тренировки мелкой моторики кисти в одном курсе. Исследования проведены на базе неврологического отделения № 1 Киевской городской клинической больницы № 3.

Отличительной особенностью рассмотренной организации управления процессом восстановления устной речи является то, что роль внешнего контура целенаправленного, биологически адекватного управления тонкой моторикой кисти выполняет компьютерный программно-аппаратный комплекс, в состав которого входят и электронные аппараты «Тренар» и ПК с интегрированным в своей структуре программным модулем. Эта особенность внесла дополнительные элементы «интеллектуализации» в управление физиологическими функциями — *организации управления на основе знаний — медицинских и технических*. Специализированный программный модуль обеспечивает поддержку деятельности оператора на основе знаний о технологии восстановления речи, функционировании аппаратно-программного комплекса «Тренар» во всем разнообразии предоставляемых методов, программ и параметров сигналов управления; движениях кисти и пальцев рук, рекомендуемых для тренировки, мышцах и топологии подведения управляющих сигналов к мышцам для реализации движений. Наличие специализированного программного модуля в качестве информационного компонента в составе программно-аппаратного комплекса тренировки тонкой моторики кисти позволяет расширить функциональные возможности электронных аппаратов «Тренар» по организации персонального, биологически адекватного, целенаправленного подхода к управлению двигательными функциями, в частности, тонкой моторикой кисти для восстановления речи, интенсифицировать усвоение знаний по практическому использованию аппаратов «Тренар» для восстановления речи.

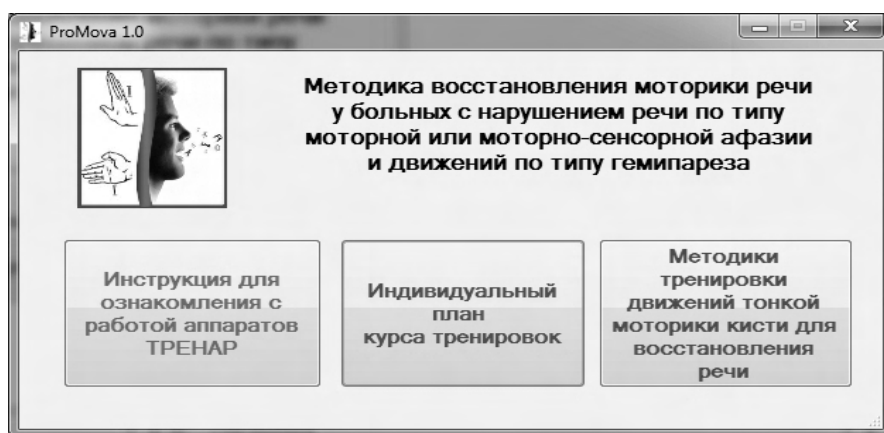


Рис. 5. Начальное окно программы определения персональной «маршрутной карты» реабилитационного курса тренировок движений кисти и пальцев пораженной руки.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена эволюция синтеза биотехнических систем управления двигательными функциями как внешних контуров управления — «Миотон-2», «Миотон-3М», «Миотон 604», «Миокор», адаптивных, с обратными связями, — «Миостимул», а также новый класс электронных аппаратов цифровой медицины — персональных, биологически адекватных типа ТРЕНАР®.

1. Многоканальные аппараты биоэлектрического управления движениями типа «Миотон» — это первые аппараты, обладающие тем принципиальным отличием от терапевтических электростимуляторов мышц, что в них использовалась многоканальная электростимуляция выбираемого нервно-мышечного комплекса, управляемая по программам, полученным в виде преобразованных электромиографических сигналов одноименных мышц другого человека. В сочетании с многоканальностью это позволяло навязывать движения, близкие к естественным, и улучшать восстановление двигательных функций после тяжелых заболеваний центральной и периферической нервной системы.

2. Введение обратных связей в устройства управления мышечными сокращениями по автоматической регулировке динамического диапазона стимулирующего сигнала в зависимости от порога возбуждения стимулируемых мышц и по автоматическому уменьшению уровня или отключению стимулирующего сигнала при утомлении мышц позволило улучшить соответствие навязанного движения программному и избежать включения защитных реакций организма, которые могут исказить искусственно вызванную афферентацию при превышении уровня электростимуляции. Введение таких обратных связей целесообразно не только при управлении движениями с целью восстановления двигательных функций, но и в специальных задачах управления движениями, когда требуется выполнять условие линейного управления.

3. Главными достоинствами нового класса аппаратов «Тренар» является возможность организовать индивидуальный, биологически адекватный подход к восстановлению двигательных и речевых функций в зависимости от вида, глубины патологии и этапа реабилитации. Организация индивидуального подхода к восстановлению нарушенных функций, активация дополнительных резервов мозговой деятельности, направленная на восстановление нарушенных функций, достигаются за счет использования оригинальных программ формирования мышечных движений, основанных на разных методах. Основой синтеза методов и программ является специальная обработка ЭМГ сигналов. Организация управления восстановлением двигательных функций на базе аппаратов «Тренар» удовлетворяет такому важному показателю интеллектуального управления, как единство ситуационной и конечной цели, а также главным принципам реабилитации.

4. Использование оригинального метода управления тонкой моторикой кисти для восстановления речи, расширенной гаммы тренировки движений кисти и пальцев рук на базе аппаратов «Тренар», включение в биотехническую систему управления движениями специализированного программного модуля в структуре ПК, выполняющего функции информационно-консультационной поддержки врача при проведении реабилитационных

мероприятий по восстановлению речи, позволило организовать индивидуальный подход к восстановлению моторики речи после инсульта, увеличить эффективность восстановления по сравнению с базовым курсом реабилитации и внесло дополнительные элементы «интеллектуализации» в управление физиологическими функциями — организации управления на основе медицинских и технических знаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 190525 СССР, МПК А 61b 4/06. Способ управления двигательными реакциями / Л.С. Алеев, Бунимович С.Г. СССР. № 1019769/31-16; заявл. 26.06.65; опубл. 29.12.66, Бюл. №2.
2. Алеев Л.С. Біоелектрична система «Міотон» і рухові функції людини. *Вісн. АН УРСР*. 1969. Вип.4. С. 70–80.
3. А. с. 321245 СССР, МПК А 61b 5/04. Способ управления движениями человека / Л. Алеев, С. Бунимович, М. Вовк, В. Горбанев, А. Шевченко СССР. № 1455753/31-16; заявл. 22.06.1970; опубл. 03.09.1971.
4. Алеев Л.С., Вовк М.И., Горбанев В., Шевченко А. «Миотон» в управлении движениями. Киев: Наук. думка, 1980. 142 с.
5. Юдин А.В., Шикова Т.Н. Миотонотерапия в комплексном лечении невропатий. Городская клиническая больница №1 г. Тольятти. URL:http://www.f-med.ru/scient/nt_mitonoterapia.php (дата обращения: 11.11.2016)
6. А. с. 929 054 СССР, МПК А 61 В 5/04. Многоканальное устройство адаптивного биоэлектрического управления движениями человека / Л. Алеев, М. Вовк, В. Горбанев, А.Шевченко СССР. № 2428608/28-13; заявл. 13.12.76; опубл. 25.05.82, Бюл. № 19.
7. А. с. 976 952 СССР, МПК 61 В 5/04, А 61 N 1/36. Многоканальное устройство адаптивного биоэлектрического управления движениями человека / Л. Алеев, М.Вовк, В. Горбанев, А. Шевченко СССР. № 2436412/28-13; заявл. 03.01.77; опубл. 30.11.82, Бюл. № 44.
8. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles: United States Patent 4,165,750 Aug. 28, 1979.
9. Elektrischer Anreger für Menschenmuskeln mit bioelektrischer Steuerung : Deutsches Patentamt DE 2 811 463. 14.03.85.
10. Вовк М.И., Кифорено С., Котова А. Биологическая и биотехническая системы как целенаправленные. *Управляющие системы и машины*. 2005. № 3. С.16–24.
11. Гриценко В.І., Котова А., Вовк М. и др. Інформаційні технології в біології та медицині. Курс лекцій. Київ: Наук. думка. 2007. 382 с.
12. Вовк М.И. Биоинформационная технология управления движениями человека. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2010. Вып. 161. С. 42–52.
13. «Тренар» — инновационная технология восстановления движений. Матеріали Міжнародного науково-практичного форуму «Наука і бізнес — основа розвитку економіки» — Дніпропетровськ, 2012. С.204–206.
14. Вовк М.И. Биоинформационная технология управления движениями как направление биологической и медицинской кибернетики. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2013. Вып. 174. С. 56–70.
15. Вовк М.И. Новые возможности восстановления двигательных и речевых функций. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2016. Вып.186. С. 78–93.
16. Анохин П.К. Очерки по физиологии функциональных систем. М.: Медицина, 1975. 447 с.
17. Спосіб керування рухами людини: пат. 41795 Україна: МПК А61 N 1/36, № u 200814822; заявл. 23.12.08; опубл. 10.06.09, Бюл. № 11. 4 с.
18. Електростимулятор: пат. 32376 Україна: МПК А61N 1/36, № u 2008 00632; заявл. 18.01.08; опубл. 12 .05.08, Бюл. № 9. 4 с.

19. «Апарат для електростимуляції з біокеруванням ТРЕНАР-01. Методика використання» / М. Вовк, В. Иванов, А. Шевченко // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 26 836, Україна. — 09.12.2008.
20. «Апарат для електростимуляції з біологічним зворотним зв'язком ТРЕНАР-02. Методика використання» / М. Вовк, В. Горбаньов, А. Шевченко // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 37243. — Україна — 04.03.2011.
21. Кольцова М.М. Двигательная активность и развитие функций мозга ребенка. М.: Педагогика, 1973. 143 с.
22. Спосіб лікування мовних порушень у хворих на пухлини головного мозку: патент на корисну модель № 42627 Україна, МПК (2006.01), А61N 1/36. № u200902139; заявл. 11.03.2009, опубл. 10.07.09, Бюл. № 13. 4 с.
23. Вовк М.І., Галян Е.Б. Восстановление моторного компонента речи на базе управления мышечными движениями. Теоретическое обоснование. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2012. Вып. 167. С.51–60.
24. Спосіб лікування мовних порушень: пат. на винахід № 111388 Україна, МПК (2006.01), А61N 1/36; № а 2014 06 092; заявл. 03.06.2014, опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с.
25. Галян Е.Б. Специализированный программный модуль технологии восстановления речи, архитектура и функциональное взаимодействие его компонентов. *Управляющие системы и машины*. 2014. № 6. С. 52–58.
26. Вовк М.І., Галян Е.Б. Организация интеллектуального управления движениями кисти для восстановления речи. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2016. Вып. 184. С. 25–43.
27. Вовк М.И., Пелешок С.Р., Галян Е.Б., Овчаренко М.А. Методика оценки моторных и сенсорных нарушений речи. *Сборник статей науч.-информ. центра «Знание» по материалам XI международной заочной научно-практической конференции: «Развитие науки в XXI веке» 3 ч., г. Харьков: сборник со статьями*. Д.: научно-информационный центр «Знание», 2016. С. 70–76.

Получено 28.12.2016

REFERENCES

1. Inventor's certificate 190525 USSR. The method of motor control / L. Aleev, S. Bunimovich. No 1019769/31-16; claimed 26.06.65; published 29.12.66, Bull. No 2. (in Russian).
2. Aleev L.S. Bioelectrical system "Mioton" and motor functions of a person. Bull. of AS of USSR. 1969. Iss. 4. P. 70–80 (in Russian).
3. Inventor's certificate 321 245 USSR. The method of motor control of a person / L. Aleev, S. Bunimovich, M. Vovk, V. Gorbanev, A. Shevchenko. No1455753/31-16; claimed 22.06.1970; registered 03.09.1971. (in Russian).
4. Aleev L.S., Vovk M.I., Gorbanev V., Shevchenko A. «Mioton» in motor control. Kiev: Nauk. dumka, 1980. 142 p. (in Russian).
5. Judin A.V., Shikova T.N. Miotonoterapiya in treatment of neuropathies. City Clinical Hospital №1 Togliatti. URL: http://www.f-med.ru/scient/nt_miotonoterapia.php (in Russian) (date of the application: 11.11.16).
6. Inventor's certificate 929 054 USSR. Multichannel device for adaptive bioelectrical motor control of a person / L. Aleev, M. Vovk, V. Goranev, A. Shevchenko. No 2428608/28-13; claimed 13.12.76; published 23.05.82, Bull. № 19 (in Russian).
7. Inventor's certificate 976 952 USSR Multichannel device for adaptive bioelectrical motor control of a person / L. Aleev, M. Vovk, V. Goranev, A. Shevchenko. No 2436412/28-13; claimed 03.01.77; published 30.11.82, Bull. №44. (in Russian).
8. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles: United States Patent 4,165,750 Aug. 28, 1979.
9. Elektrischer Anreger für Menschenmuskeln mit bioelektrischer Steuerung: Deutsches Patentamt DE 2 811 463. 14.03.85 (in German).

10. Vovk M.I., Kiforenko S.I., Kotova A. Biological and Biotechnical Systems as Purposeful Ones. *Systems and Machines for Control*. 2005. No 3. P.16–24 (in Russian).
11. Gritsenko V.I., Kotova A., Vovk M et.al. Information technology in Biology and Medicine. Lecture course. K.: Nauk. Dumka, 2007. 382 p. (in Ukrainian).
12. Vovk M.I. Bioinformatic technology of motor control of a person. *Kibernetika i vychislitelnaâ tehnika*. 2010. Iss. 161. P. 42–52 (in Russian).
13. “Trenar” — innovative technology for motor restoration. Materials of the International scientific — practical forum «The Science and Business — a basis of development of economy». Dnepropetrovsk, 2012. P. 204–206 (in Russian).
14. Vovk M.I. Bioinformatic technology of motor control as the direction of biological and medical cybernetics. *Kibernetika i vychislitelnaâ tehnika*. 2013. № 174. P. 56–70 (in Russian).
15. Vovk M.I. New opportunities for movement and speech rehabilitation. *Kibernetika i vychislitelnaâ tehnika*. 2016. Iss.186. P. 78–93 (in Russian).
16. Anohin P.K. The Sketches on Physiology of Functional Systems. Moscow: Medicine, 1975. 447 p. (in Russian).
17. The method of Motor Control of a Person: pat. 41 795, Ukraine: IPC A61 N 1/36. No u 200814822; claimed 23.12.08; published 10.06.09, Bull. No 11. (in Ukrainian).
18. Electrical stimulator: patent 32376, Ukraine: IPC A61 N 1/36. No u 2008 00632; claimed 18.01.08; published 12.05.08, Bull. No 9. (in Ukrainian).
19. The Device for Electrical Stimulation with Biocontrol TRENAR-01. The Technique for Using / M. Vovk, V. Gorbanev, A. Shevchenko // The Inventor's Certificate on author's product right № 26 836, Ukraine — 09.12.2008 (in Ukrainian).
20. The Device for Electrical Stimulation with Biofeedback TRENAR-02. The Technique for Using / M. Vovk, V. Gorbanev, A. Shevchenko // The Inventor's Certificate on author's product right № 37243, Ukraine. 04.03.2011 (in Ukrainian).
21. Koltsova M.M. Motor activity and development of the child's brain functions. M.: “Pedagogika”, 1973. 143 p. (in Russian).
22. The way to treat speech disorders: pat. UA 111388, IPC A61N 1/36. No a 2014 06 092; claimed 03.06.2014, published 25.04.2016, Bull. No 18. (in Ukrainian).
23. Vovk M.I., Galyan Ye.B. Restoring of motor component of speech based on muscle movement control. Theoretical grounding. *Kibernetika i vychislitelnaâ tehnika*. 2012. № 167. P. 51–60 (in Russian).
24. The way to treat speech disorders: pat. UA, A61N 1/36, no. 111388, claimed 03.06.2014, published 25.04.2016, Bulletin no 18 (in Ukrainian).
25. Galyan Ye.B. Specialized software module of speech rehabilitation technology, architecture and functional interaction of its components. *Control Systems and Machines*. 2014. Iss. 6. P. 52–58 (in Russian).
26. Vovk M.I., Galyan Ye.B. Organization of Intelligent Hand Movements Control to Restore Speech. *Kibernetika i vychislitelnaâ tehnika*. 2016. Iss. 184. P. 25–43 (in Russian).
27. Vovk M.I., Peleshok S.R., Galyan Ye.B. Ovcharenko M.A. The method of assessment of motor and sensory speech disorders. *Collected papers of scientific-information center "Knowledge" based on XI International correspondence scientific-practical conference: «The development of science in the XXI century», part 3. Kharkiv: collected papers. D.: scientific-information center "Knowledge", 2016. p. 70–76 (in Russian).*

Recieved 28.12.2016

М.І. Вовк, канд. біол. наук, старший наук. співроб.,
зав.від. біоелектричного керування та медичної кібернетики
e-mail: dep140@irtc.org.ua
Міжнародний научно-навчальний центр інформаційних технологій
та систем НАН України і МОН України, пр. Академіка Глушкова, 40,
м. Київ, 03680 ГСП, Україна

БИОТЕХНИЧНИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОВИМИ ФУНКЦІЯМИ ЛЮДИНИ

Розглянуто еволюцію синтезу біотехнічних систем керування руховими функціями, як зовнішніх контурів керування — «Міотон», «Міокор», адаптивних «Міостимул», які використовуються для відновлення рухових функцій. Представлено новий клас електронних апаратів цифрової медицини, персональних, біологічно адекватних «Тренар». Теоретичною основою синтезу таких систем є обробка електроміографічних (ЕМГ) сигналів. Адекватність керування стану рухових функцій і етапу їх відновлення забезпечується різними програмами і методами. Розглянуто оригінальну технологію керування тонкою моторикою кисті для відновлення мовлення на базі апаратів «Тренар».

Ключові слова: біотехнічні системи, електронні апарати, керування, реабілітація, рух, мовлення, персональний підхід, програмна електростимуляція, біологічний зворотний зв'язок, електроміографічний сигнал.

M.I. Vovk, PhD (Biology), Senior Researcher,
Head of Bioelectrical Control & Medical Cybernetics Department
e-mail: dep140@irtc.org.ua
International Research and Training Center for Information Technologies
and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine
and of Ministry of Education and Science of Ukraine,
Glushkov ave., 40, Kiev, 03680 GSP, Ukraine

BIOENGINEERING SYSTEMS FOR HUMAN MOTOR FUNCTIONS CONTROL

Introduction. Movement training is one of the main factors to mobilize person's reserves for movement restoration

The purpose of the article is to present the results of theoretical and applied researches focused on synthesis of information technologies for human motion control based on bioengineering systems as external control circuits.

Results. The evolution of bioengineering systems for motor control — multichannel electronic devices "Mioton-2", "Mioton-3M", "Mioton-604", "Miokor", adaptive device "Miostimul" and a new class of portable electronic devices of digital medicine for personal, biologically adequate, motor control "TRENAR[®]" are considered. Special EMG — signals processing and its transformation into informative visual and sound signals, that describe muscle contractions are used to develop different programmes for muscle control. These programs based on different methods of muscle electrical stimulation and biofeedback are aimed on activation of additional brain reserves to restore motor functions. New method and technology to restore motor speech, based on original technique of fine motor hand training by the technology "Trenar" is described. The results of clinical testing confirmed its effectiveness in motor speech restoration after the stroke.

Conclusion. The main benefits of the technology "Trenar" that leads to the increasing in efficiency of motor and speech rehabilitation are as follows: advanced range of training programs, based on different methods, original techniques of fine motor hand training allows one to select individual approach to rehabilitation process.

Keywords: bioengineering systems, electronic devices, bioelectric control, muscle stimulation, biofeedback, electromyographic signal, rehabilitation, movement, speech, personal approach.