
DOI: [https:// 10.15407/kvt194.04.079](https://10.15407/kvt194.04.079)

УДК 615.47: 004.9

ВОВК М.І., канд. біол. наук, старш. наук. співроб.,
зав. відд. біоелектричного керування та медичної кібернетики
e-mail: vovk@irtc.org.ua; imvovk3940@gmail.com
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій
та систем НАН України та МОН України,
пр. Акад. Глушкова 40, м. Київ, 03187, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ КЕРУВАННЯ РУХАМИ. ЕВОЛЮЦІЯ СИНТЕЗУ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Еволюцію синтезу технологій біоелектричного керування рухами людини подано в аналізі декількох поколінь програмних міоелектростимуляторів типу «МІОТОН», «МІОСТИМУЛ» і нового класу апаратів цифрової медицини ТРЕНАР®. Особливістю цих апаратів є використання спеціально оброблених електроміографічних (ЕМГ) сигналів у якості програм керування сигналами електростимуляції і зворотного зв'язку. Розглянуто принципи, критерії, методи, програми, на базі яких синтезовано інноваційну технологію персонального тренування/відновлення рухів ТРЕНАР®. Представлено комп'ютерний програмно-апаратний комплекс «ПРОМОВА-1», який реалізує нову технологію персонального відновлення усного мовлення у хворих після інсульту на базі оригінальних методик тренувань тонкої моторики кисті. Перспективні дослідження спрямовано на синтез технологій мобільної інформаційно-консультаційної допомоги лікарю у діагностиці дефіциту рухових і мовленнєвих функцій і формуванні індивідуальних планів реабілітації, на синтез технологій керування узгодженою активністю м'язів під час виконання координованих рухів та відновного лікування дефектів постави.

***Ключові слова:** біоелектричне керування, рухи, мовлення, координація, постава, персональна реабілітація, методи, програми, міоелектростимуляція, цифрова медицина.*

ВСТУП

Становлення і розвиток досліджень з керування рухами визначалося не тільки науковим інтересом, але й практичною необхідністю. Рухова активність є винятково важливим, фундаментальним чинником формування, збереження, зміцнення здоров'я та гармонічного розвитку людини, особливо в дитячому, підлітковому та юнацькому віці. Рухи є найдоступнішими та найефективнішими ліками, найкращим засобом для відновлення здоров'я. Цереброваскулярна патологія та її найважча форма — інсульт, є однією з найчастіших причин втрати рухових функцій. Спостерігається стрімка тенденція до збільшення кількості хворих на інсульт, а також до їх «омо-

© ВОВК М.І., 2018

ISSN 2519-2205 (Online), ISSN 0454-9910 (Print). Киб. и выч. техн. 2018. № 4 (194)

79

лодження». Інсульт — провідна причина інвалідності дорослого населення. За даними ВООЗ 30 % хворих становлять особи працездатного віку (до 50-60 років). Дитячий церебральний параліч (ДЦП) залишається провідною причиною інвалідності серед дітей. Порушення мовлення спостерігаються більш ніж у третини хворих, які перенесли інсульт, та є другим за значимістю і поширеністю постінсультним дефектом після рухових порушень. Розроблення ефективних методів і засобів відновлення рухових і мовленевих функцій не перестає бути актуальним.

Дослідження, спрямовані на керування рухами людини, зародилися ще в стінах Обчислювального Центру АН УРСР у відділі біологічної кібернетики (зав. відділом — академік М.М. Амосов). Тут поряд з іншими стояло завдання розробити теорію керування основними функціями і органами живих організмів на основі біоелектростимуляції. В рамках цього завдання сформувався напрям — біоелектричне керування руховими функціями, керування, яке використовує в якості команд оброблені електроміографічні (ЕМГ) сигнали. З 1964 р. цей напрям отримав цілеспрямований розвиток в Інституті кібернетики АН України, в лабораторії «Керування руховими реакціями живих організмів», з 1969 р. — у відділі «Біоелектричне керування і медична кібернетика». З травня 1997 р. продовжує плідно розвиватися в Міжнародному центрі інформаційних технологій та систем НАН України і МОН України у згаданому відділі. З 1964 по 2009 р.р. на чолі досліджень стояв доктор медичних наук, професор Леонід Седекович Аляєв, лауреат Премії імені М.М. Амосова (2004 р.).

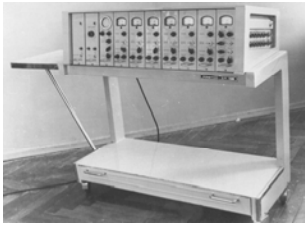
Наукові дослідження цього напрямку характеризуються як теоретичними, так і прикладними результатами — від ідеї, розроблення концептуальних основ, фізіологічних передумов, методів, формулювання принципів, розроблення алгоритмів, інформаційно-структурних і структурно-функціональних моделей біотехнічних систем керування рухами людини до технічної реалізації кількох поколінь електронних апаратів керування рухами, передачі їх в серійне виробництво і практичне використання. Такі апарати призначено для: відновного лікування залишкових явищ уражень центральної та периферичної нервової системи у дорослих і дітей (наприклад, постінсультні паралічі і парези, неврити різного характеру), травм опорно-рухового апарату; керування рухами, їхньої корекції або навчання певним руховим навичкам (наприклад, у спорті); попередження несприятливого впливу обмежень рухової активності, корекції наслідків перебування людини в спеціальних умовах (наприклад, у невагомості); керування функціями, тісно пов'язаними з руховими (наприклад мовними) тощо.

Мета статті — розглянути теоретичні та технологічні основи еволюції синтезу біотехнічних систем керування рухами, показати роль нових інформаційних технологій і засобів цифрової медицини в синтезі систем персонального керування рухами для відновлення порушених патологією рухових і мовленевих функцій.

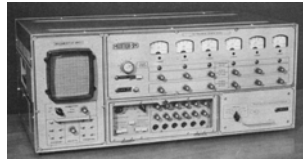
БАГАТОКАНАЛЬНІ ПРИСТОЇ БІОЕЛЕКТРИЧНОГО КЕРУВАННЯ РУХАМИ ЛЮДИНИ ТИПУ «МІОТОН»

З кінця 50-х — початку 60-х років ХХ століття для відновлення рухових функцій у паралізованих хворих стали активно використовувати електростимуляцію як спосіб примусового скорочення м'язів, внаслідок якого до неушкоджених ділянок мозку по каналах зворотного зв'язку надходить необхідна для відновлення рухів аферентна інформація про скорочення м'язів. Традиційні методи стимуляції за допомоги генераторів електричних імпульсів з фіксованими параметрами, зміна яких в допустимих для даного стимулятора межах проводиться оператором, далеко не завжди задовольняли завдання реабілітації хворих з порушеннями рухів. Щоб відновити не тільки силу уражених м'язів, а й втрачену рухову навичку, виникла необхідність в багатоканальних електростимуляторах, які використовують певні програми (моделі) залучення м'язів до руху, що відпрацьовується. Важливим етапом у розвитку програмної міоелектростимуляції був перехід до використання в якості програми (моделі активації м'язів, які втягуються в рух) оброблених ЕМГ сигналів здорових довільних рухів. Такий спосіб керування знайшов використання в пристроях типу «Міотон» [1–3]. У 1965 р. в Інституті кібернетики АН УРСР виготовлено перший експериментальний зразок багатоканального пристрою біоелектричного керування рухами людини «Міотон», який реалізує цей метод. У 1967–1970 рр. виготовлено дослідні зразки шестиканального апарата «Міотон-2» (рис. 1а), який включено в номенклатуру дозволених для застосування в медичній практиці і серійного виробництва виробів медичної техніки (Реєстраційне посвідчення № 77/29/13 від 4.02.1977 р.). Використання оброблених ЕМГ сигналів здорових довільних рухів в якості програм вже на цьому етапі було пов'язане з поняттям «біоелектричного образу руху» як моделі (програми) формування примусових м'язових скорочень під впливом програмної міоелектростимуляції [3].

Результатом модернізації апарата «Міотон-2» було розроблення і виробництво на Арзамаському приладобудівному заводі (АПЗ) апарата «Міотон-3М», 1983 г. (рис. 1 б). Особливістю «Міотон-3М» було формування сигналу електроміостимуляції з рівня, який відповідає порогу збудження м'язів. Це збільшувало відповідність нав'язаного руху програмі (моделі) [4]. До складу «Міотон-3М» входив шестиканальний магнітний реєстратор, що дозволяло формувати «банк рухових програм» здорових м'язів іншої людини, а також шестиканальний індикатор для візуального контролю рухових програм і порівняння їх з виконуваними рухами. У 1988 р. «Міотон-3М» демонструвався на Лейпцігському ярмарку, був нагороджений Золотою медаллю. На базі апарата «Міотон-3М» з 1989 р. на АПЗ розпочався серійний випуск апарата «Міотон-604» з поліпшеними технічними характеристиками і сервісними функціями (рис. 1 в). Апарати «Міотон» знайшли широке використання в клініках і курортах колишнього Радянського Союзу для відновлення рухових функцій, пошкоджених патологією центральної і периферичної нервової системи [3].



а)



б)



в)

Рис. 1. Апарати біоелектричного керування рухами людини типу «Міотон»

Завдяки співробітництву з НПКФ «Біокор-інформатика» при Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова АН УРСР було розроблено, поставлено на виробництво та знайшло використання в медичних установах України шести-канальний програмний біоелектричний стимулятор «Міокор-МК-01», 1991 р. Особливість апарата у порівнянні з апаратами типу «Міотон» — наявність банку штучно синтезованих програм керування, які враховують найхарактерніші залучення м'язів у виконання різних рухів.

БАГАТОКАНАЛЬНІ ПРИСТОЇ АДАПТИВНОГО БІОЕЛЕКТРИЧНОГО КЕРУВАННЯ РУХАМИ ЛЮДИНИ «МІОСТИМУЛ»

Введення зворотних зв'язків в електронні системи керування рухами дозволило перейти до нового класу апаратів, які реалізують принципи адаптивного керування. Адаптивний підхід є корисним в умовах великої початкової невизначеності, коли брак апріорної інформації про об'єкт керування потрібно заповнити поточною інформацією, а також у системах керування об'єктами з характеристиками, які дрейфують. Обидві ситуації мають місце у керуванні рухами на основі зовнішніх контурів. Так, параметри м'язової активності ідентичних м'язів різних людей і м'язів однієї людини мають суттєвий розкид; параметри м'язової активності істотно відрізняються за умови патології і зазнають змін в процесі електростимуляції. Адаптивне керування передбачає автоматичне підлаштування параметрів сигналу стимулювання під функціональний стан м'язів, що стимулюються.

В технології синтезу зворотних зв'язків використано результати експериментальних досліджень з динаміки амплітудних і частотних характеристик м'язової активності (поріг збудження, м'язова сила, обсяг рухів) під час тренувальних процедур, а також результати аналізу змін ЕМГ сигналу (амплітуда, частота) у разі втоми. Під час реабілітації рухових функцій не слід виходити за межі максимальних подразнень, оскільки за великих рівнів стимулу в роботу включаються захисні реакції організму, які можуть спотворити бажану штучно викликану аферентацію для формування нового динамічного стереотипу. Звідси виникає необхідність в автоматичному регулюванні динамічного діапазону стимулу залежно від функціонального стану м'язів, які стимулюються. Принципи адаптивного керування реалізовано в апараті «Міостимул». Промислові зразки у кількості двох випущені підприємством «Октава», завод «Генератор», (м.Київ) у 1975 і 1977 рр.

Цей шестиканальний апарат «Міостимул» містить два види зворотних зв'язків: перший для автоматичного регулювання динамічного діапазону сигналу стимуляції [5], другий — для зменшення рівня сигналу стимуляції або її відключення, коли настає стомлення м'язів, які стимулюються [6]. Як сигнал зворотного зв'язку, використовують поріг збудження та інформативні параметри ЕМГ сигналу м'язів (амплітуда, частота), що залучаються у рухи, якими керують — «викликану електроміограму». Технологія адаптивного керування захищена патентами США, Англії, Німеччини Франції, Канади, Швеції, Італії, Югославії ([7]).

РЕЗУЛЬТАТИ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

ЕЛЕКТРОННІ АПАРАТИ ПЕРСОНАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХАМИ «ТРЕНАР».

Організація індивідуального підходу до керування рухами на базі зовнішніх контурів. Індивідуальний підхід до лікування є одним з провідних напрямів у сучасній системі охорони здоров'я. Реабілітація — це перш за все мобілізація резервів організму на відновлення функції, порушеної внаслідок патології. Використання сучасних інформаційних технологій створює нові можливості у виборі індивідуального «маршруту» лікування. У разі відновлення рухових функцій мобілізація резервів передбачає розроблення і реалізацію індивідуальних комплексних програм медичної реабілітації, в яких поряд з лікарськими засобами провідне місце займають технології індивідуального тренування/керування рухами на базі зовнішніх контурів. Такі зовнішні контури виконують роль відсутньої ланки у формуванні або корегуванні гомеостазу рухової системи та забезпечують функції сприйняття, передачі знань про рух, формування, регулювання і контролювання рухів [8–10].

Принципи та критерії індивідуальної активації резервів організму на відновлення рухів. Поняття гомеостазу рухової системи, його індивідуальності та індивідуальності порушення за рухової патології приводять до розуміння доцільності дотримуватися *принципу біологічної адекватності як головного у керуванні рухами за допомоги зовнішніх контурів на різних етапах реабілітації.* У зв'язку з цим дуже важливим є вибір керувальних впливів на кожному етапі відновлення рухових функцій. Керувальні впливи повинні бути такими, які запускають і стимулюють резерви внутрішніх систем регулювання за рахунок комбінованої роботи внутрішніх механізмів і керувальних впливів, а коли внутрішніх резервів недостатньо, то за рахунок роботи тільки керувальних впливів. Тому зовнішній контур повинен мати функціональні й технічні характеристики, які даватимуть змогу оптимізувати «маршрут» лікування (відновлення рухових функцій) як багатокритеріальну оптимізацію процесу формування рухів на основі активації резервів пацієнта, адекватної стану його рухових функцій, на різних етапах реабілітації. Засобом, який забезпечує *біологічно адекватний запуск і стимуляцію резервів організму на відновлення рухів, є метод, програма, методики, регламент зовнішнього впливу, які відповідають стану рухових функцій пацієнта та його загальному стану.* Перелічені вимоги до синтезу зовнішніх контурів керування дозволили сформулювати принципи організації індивідуального підходу до біологічно адекватного запуску і стимуляції резервів організму на відновлення рухів та розробити критерії, які забезпечують виконання цих принципів (рис. 2).

Методи та індивідуальні програми активації резервів організму на відновлення рухових функцій за технологією ТРЕНАР®

Індивідуальний підхід до реабілітації забезпечується набором базових програмно-технологічних електронних модулів, основу синтезу яких складають *різні методи та програми тренування примусових і довільних скорочень м'язів*. Цей підхід є основою синтезу біоінформаційної технології відновлення рухових і мовленнєвих функцій ТРЕНАР®. Технологію реалізує новий клас електронних виробів цифрової медицини — апаратно-програмний комплекс «ТРЕНАР» [11]: «Апарат для електростимуляції з біокеруванням Тренар-01» і «Апарат для електростимуляції з біологічним зворотним зв'язком Тренар-02» (Рис. 3).

Набір базових програмно-технологічних електронних модулів комплексу «ТРЕНАР» складає:

Програмно-технологічний модуль «Синтез». Метод — програмна електростимуляція; програма — «Синтез»; завдання — тренування примусових рухів під впливом електростимуляції м'язів за штучно синтезованими програмами у широкому діапазоні «посилання – пауза» імпульсів електростимуляції. Цей метод і програми тренувань надають можливість здійснювати активацію резервів нервової системи на відновлення рухів на базі аферентної пропріоцепції (рис. 4). Модуль застосовується на ранніх етапах реабілітації, у тому числі майже за відсутності рухів ураженої кінцівки.

Програмно-технологічний модуль «Донор». Метод — програмна електростимуляція; програма — «Донор»; завдання — тренування примусових рухів ураженої кінцівки під впливом електростимуляції відповідних м'язів за програмами, які «зчитуються» з власних здорових (бажано симетричних) м'язів пацієнта або м'язів іншої людини (інструктора) за умови їхнього довільного скорочення і передаються м'язам, які тренуються в режимі «онлайн». Пацієнт самостійно змінює програму тренування, здійснює контроль її виконання. Інформаційний потік, що йде в пошкоджену моторну зону кори головного мозку, складається з пропріоцептивних імпульсів як від довільних скорочень-розслаблень м'язів здорової кисті, так і від примусових скорочень-розслаблень м'язів пошкодженої кисті (рис. 5). Безпосередньо пацієнт або інструктор можуть контролювати і змінювати програму тренувань, ритм і силу скорочень м'язів, які тренуються. Зростає роль мотивації у процесі аферентного синтезу від довільних скорочень здорової кінцівки та примусових скорочень пошкодженої. Застосовується на ранніх етапах реабілітації за відсутності порушень когнітивної сфери.

Програмно-технологічний модуль «Поріг». Метод — порогова електростимуляція, програма – «Поріг»; завдання — тренування співвідношення довільно-примусових скорочень м'язів. Електростимуляція як спосіб примусового скорочення м'язів «запускається» у разі подолання пацієнтом певного порогу ЕМГ сигналу, який виникає за умови довільного скорочення тих самих м'язів, що тренуються. Рівень порогу встановлює оператор або самостійно пацієнт.

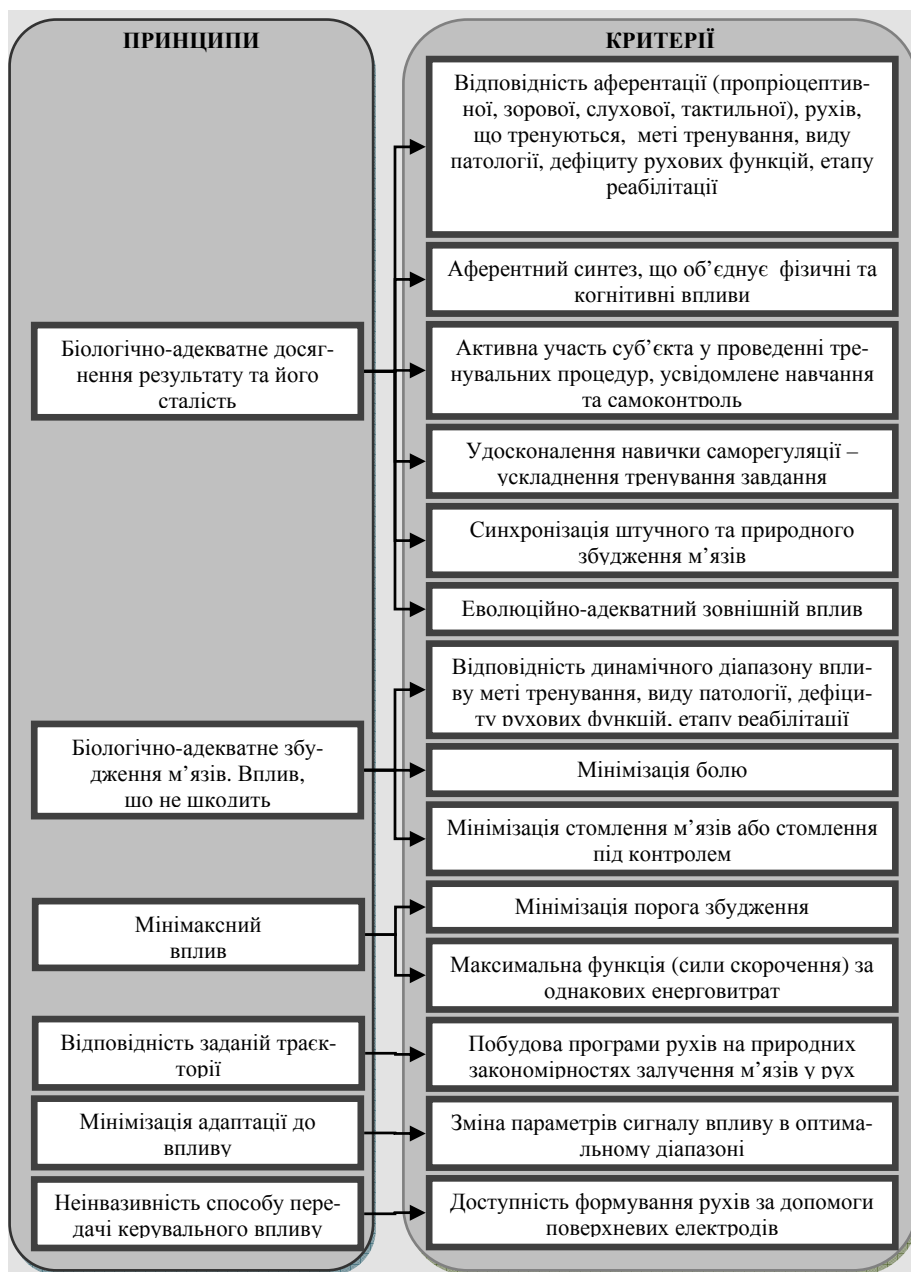


Рис. 2. Принципи та критерії індивідуального керування рухами



Рис. 3. Комплекс «ТРЕНАР»

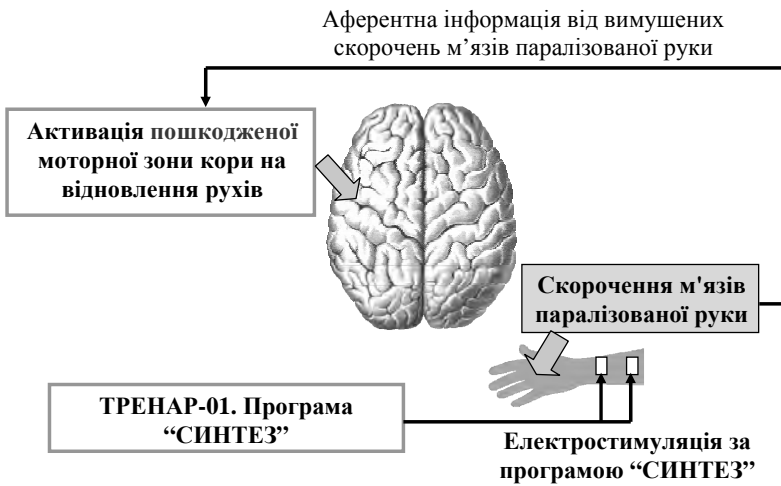


Рис. 4. Структурно-функціональна модель активації пошкодженої моторної зони кори на відновлення керування рухами за програмою «Синтез»

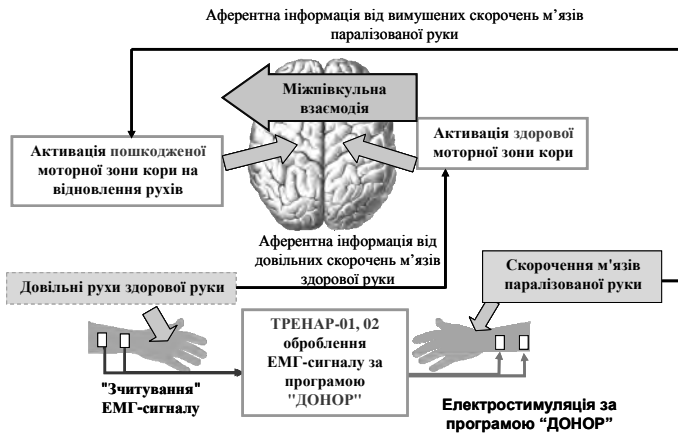


Рис. 5. Структурно-функціональна модель активації пошкодженої моторної зони кори на відновлення керування рухами за програмою «Донор»

Тренування спрямовано на те, щоб з кожним новим сеансом довільне скорочення м'язів додало все більший поріг ЕМГ сигналу, який виникає за умови довільного скорочення м'язів, що тренуються. Тим самим внесок довільного скорочення у тренувальне завдання поступово збільшується у порівнянні з примусовим скороченням. За методом «Порогова електростимуляція» ефективність впливу пропріоцептивної аферентації від примусових скорочень м'язів, що тренуються, на пошкоджену моторну зону кори зростає, тому що пошкоджена моторна зона стає «підготовленою» до керувальних впливів за рахунок аферентації від довільних скорочень м'язів пошкодженої кінцівки. Зростає і роль мотивації у процесі аферентного синтезу від довільних і примусових скорочень м'язів пошкодженої кінцівки. Ця програма, як і програма «Донор», надає можливість пацієнту самостійно ускладнювати тренувальне завдання. Метод «Порогова електростимуляція» застосовується у разі появи у пацієнта найменших ознак довільних рухів за відсутності порушень когнітивної сфери.

Програмно-технологічний модуль «Пам'ять-Ауто». Метод — програмна електростимуляція, програма — «Пам'ять-Ауто»; характеристика завдання — тренування довільних і примусових скорочень м'язів відбувається в режимі «запис – відтворення»: записаний у пам'яті ЕМГ сигнал довільного скорочення/розслаблення м'язів відтворюється у вигляді програми електростимуляції тих самих м'язів. Запис ЕМГ сигналу відбувається за умови подолання певного порогу. Тому мотивація у тренуванні м'язів за цією програмою хворої або здорової людини (наприклад, спортсмена) теж відіграє важливу роль.

Програмно-технологічний модуль «Біотренування». Метод — Біологічний зворотний зв'язок (БЗЗ), зоровий і слуховий за електроміограмою; програма — «Біотренування» (рис. 6). За цією програмою пацієнт тренує довільні скорочення м'язів відповідно до встановленого пацієнтом або інструктором (лікарем) тренувального завдання. ЕМГ сигнал м'яза, що тренується, перетворюється на візуальні та звукові інформаційні сигнали, які інформують пацієнта про успішність або неуспішність виконання тренувального завдання. Під час тренування довільних рухів за цією програмою ЕМГ сигнали, які характеризують м'язову активність довільних рухів, сприймаються пацієнтом у вигляді зорових і слухових образів. А інформаційний потік, що надходить в центральну нервову систему, є аферентним синтезом сигналів від пропріоцептивної, слухової, зорової сенсорних систем. Це забезпечує активацію додаткових механізмів до нейрональної перебудови пошкодженої моторної зони кори головного мозку. У разі використання методу біологічного зворотного зв'язку мотивація відіграє виняткову роль у процесі аферентного синтезу. Програму «Біотренування» за методом БЗЗ зазвичай використовують на останніх етапах реабілітації для наближення рухів пацієнта до норми. Важливим є те, що цю програму можна використовувати за наявності у пацієнта певних протипоказань до електростимуляції, наприклад кардіостимулятора.

Методологія, яка поєднує використання «електроміографічного образу» руху як програми керування (програмна електростимуляція за програмою «Донор») і формалізованого інформаційного образу руху, до якого повинен прагнути пацієнт, як цільової функції керування («Порогова електростимуляція, БЗЗ), сприяє утворенню нових умовно рефлексорних комплексів під дією як *фізичних, так і когнітивних впливів.*

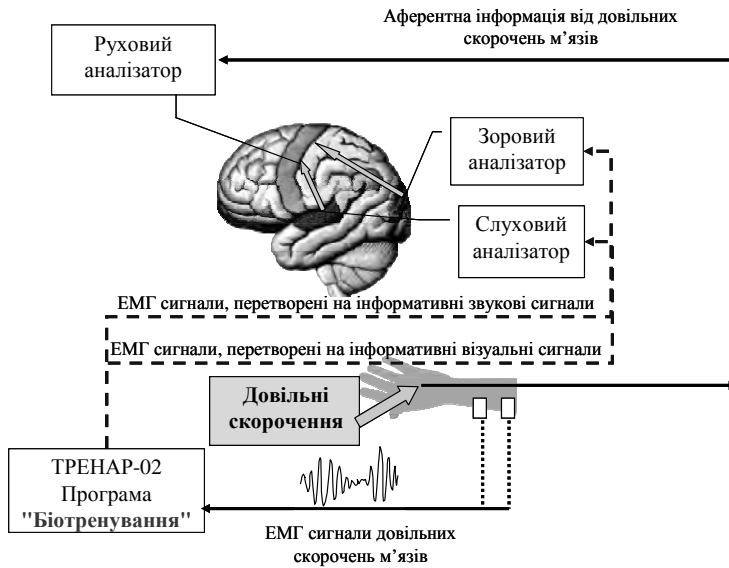


Рис.6. Структурно-функціональна модель активації пошкодженої моторної зони кори на відновлення керування рухами за програмою "Біотренування" (метод — БЗЗ)

Структурно-функціональна модель керування рухами на базі апаратів ТРЕНАР як зовнішніх контурів керування

Як зовнішні контури керування рухами, апарати Тренар мають електричний та інформаційний зв'язок з м'язами, які керують, а також електричний та/або інформаційний зв'язок з м'язами, якими керують, залежно від програми тренування (рис. 7). Різноманітність програм формування/тренування рухів забезпечує вибір персональної програми, яка є адекватною функціональному стану рухової системи пацієнта, дозволяє індивідуально на кожному етапі реабілітації організувати процес тренування, що найбільш ефективно мобілізує резерви організму на відновлення рухів. Концепція гомеостазу рухової системи і принцип біологічної адекватності керувальних впливів на кожному етапі відновлення рухових функцій дозволили сформулювати головну вимогу до зовнішніх контурів керування: виконувати роль відсутньої ланки у формуванні гомеостазу рухової системи за тієї чи іншої патології рухової функції і, в кінцевому підсумку, бути засобом відновлення гомеостазу — стійкого виконання функції руху.

На базі оброблення та перетворення електроміографічних сигналів у зорові і слухові інформативні сигнали отримала розвиток теорія «образного усвідомлення» м'язової активності пацієнтом за допомоги зорового і слухового аналізаторів кори головного мозку. Внаслідок такого перетворення ЕМГ сигнали, що характеризують м'язову активність під час виконання рухів, які зазвичай недоступні свідомості, усвідомлюються пацієнтом у вигляді зорових і слухових інформативних образів. Це дозволяє активувати додаткові резерви моторної області кори на відновлення рухових функцій. Відомо, що моторна область як «центральный апарат побудови рухів» є кортикальним відділом пропріоцептивної сенсорної системи і одночасно місцем конвергенції проєкцій від усіх інших сенсорних зон кори.

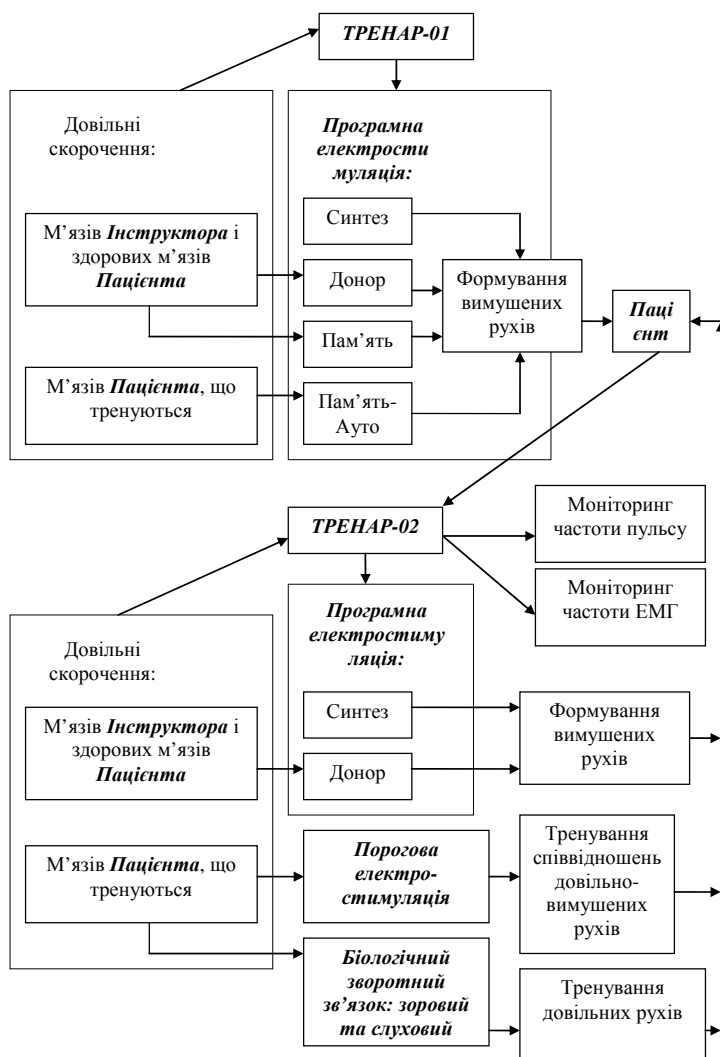


Рис. 7. Апарати ТРЕНАР як зовнішні контури керування рухами. Структурно-функціональна модель

Такі програми як «Донор» (за рахунок міжпівкульової взаємодії) або «Порогова стимуляція» (безпосередньо) «готують» і роблять пошкоджену моторну зону більш сприйнятливою до керуючих впливів, підсилюють ефективність аферентації як основного способу формування нової рефлекторної системи супраспинального контролю рухів замість втраченого або спотвореного патологією. Програми «Донор», «Поріг» і «Біотренування» передбачають активну участь пацієнта в тренуванні, дозволяють уникати монотонних процедур, самостійно гнучко змінювати ритм і інтенсивність рухів, які тренуються, поступово ускладнювати тренувальне завдання.

Основу цих програм становить «електроміографічний образ» м'язового скорочення, який виконує різні функції. Його використовують як детектор стану м'язової активності (норма, патологія) під час виконання примусових і довільних м'язових скорочень, модель (програму) формування примусо-

вих і довільних м'язових скорочень, модель комплексної активації сенсорних зон кори головного мозку — пропріоцептивної, зорової та слухової. Керування відновленням рухових функцій на базі апаратів «Тренар» задовольняє головним принципам реабілітації: ранній початок; систематичність і тривалість; адекватність реабілітаційних заходів на кожному етапі; активна участь пацієнта у реабілітаційному процесі.

Апарати ТРЕНАР-01 і ТРЕНАР-02 внесено до Державного реєстру медичної техніки та виробів медичного призначення, дозволені для використання в клінічній практиці на території України. Всебічна клінічна апробація апаратів у 17 клінічних і оздоровчих установах різних регіонів України підтвердила їхню ефективність для відновлення рухових функцій у дорослих і дітей (понад 15 000 пацієнтів).

РЕЗУЛЬТАТИ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО ВІДНОВЛЕННЯ УСНОГО МОВЛЕННЯ НА БАЗІ ТРЕНУВАНЬ ТОНКОЇ МОТОРИКИ КИСТІ

Зв'язок рухових і мовленнєвих функцій, величина проекції кисті, її близькість до моторної мовленнєвої зони, позитивний вплив тренування рухів пальців рук на розвиток мовлення дитини склали теоретичну передумову розроблення нового методу і технології персонального відновлення моторного компонента мовлення на базі тренувань тонкої моторики кисті у хворих після інсульту з порушеннями мовлення за типом моторної або моторно-сенсорної афазії та порушеннями рухових функцій за типом геміпарезу [12–14].

Технологія відновлення мовленнєвих функцій використовує методи і програми тренувань кисті і пальців, які надає апаратно-програмний комплекс ТРЕНАР®. Рухи пальців рук для тренування вибираються за критеріями розвитку дрібної моторики кисті в онтогенезі, доступу передачі сигналів електростимуляції відповідним м'язам за допомоги поверхневих електродів, стану рухів кисті та пальців після інсульту [15]. Технологію реалізує комп'ютерний програмно-апаратний комплекс персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-1» (Рис. 8). Центральною ланкою комплексу є технічна система, яка складається з двох компонентів: електронні апарати керування рухами Тренар-01 і Тренар-02, за допомоги яких відбувається тренування рухів тонкої моторики ураженої кисті і пальців, і інформаційний компонент — спеціалізований програмний модуль «ProMova 1.0», який реалізовано в архітектурі ПК. Включення в технічну систему інформаційного компонента зумовлено проблемою багатокритеріального вибору параметрів тренувань, які здійснює лікар під час організації індивідуального підходу до реабілітації.

Визначення параметрів персонального реабілітаційного курсу тренування рухів кисті і пальців для відновлення мовлення базується на розроблених критеріях, вирішувальних правилах за спеціальними алгоритмами [15–16]. Спеціалізований програмний модуль забезпечує організацію інформаційно-консультаційної допомоги для/під час планування і проведення заходів з відновлення мовлення.

Клінічна апробація комп'ютерного комплексу персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-1» у хворих після інсульту на базі неврологічного відділення №1 Київської міської клінічної лікарні №3 (рис. 9) показала, що процент

покращень мовленнєвих функцій у хворих після інсульту (моторна афазія, правобічний геміпарез) досягає 74 % проти базового курсу — 41 % (рис. 9).

Кількісне експрес-оцінювання моторних і сенсорних порушень мовлення [17], яке визначає відновлення усного мовлення навіть в межах невеликої позитивної динаміки, підтвердило більшу ефективність відновлення у пацієнтів в ранньому періоді реабілітації (до 6 місяців після інсульту) та у разі тренування рухів тонкої моторики кисті за програмою «Донор».

Розглянута організація керування рухами тонкої моторики кисті для відновлення мовлення у хворих з руховими порушеннями за типом геміпарезу і порушеннями мовлення за типом моторної або моторно-сенсорної афазії є прикладом організації інтелектуального керування відновленням патологічно зміненої функції, в даному випадку усного мовлення, на базі зовнішнього контуру керування рухами кисті. Таким зовнішнім контуром є комп'ютерний програмно-апаратний комплекс персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-1» на базі тренувань дрібної моторики ураженої кисті, відновлення рухів якої опосередковано впливає на відновлення мовлення.



Рис. 8. Структурно-функціональна модель комп'ютерного програмно-апаратного комплексу персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-1»



а)



б)

Рис. 9. Сеанс тренування рухів кисті за програмами: а) «Донор», б) «Синтез» для відновлення мовлення (Моторна афазія. Правобічний геміпарез).

Зазначимо показники інтелектуального керування відновленням усного мовлення після інсульту.

- Єдність ситуаційної та кінцевої мети. Ситуаційна мета залежить від неврологічного статусу пацієнта, стану його рухових функцій, які визначають індивідуальний план реабілітаційного курсу: метод, програму, параметри і регламент тренування рухів кисті. Кінцева мета — це і відновлення рухів кисті, і відновлення моторного компоненту мовлення.

- Включення в технічну систему програмно-апаратного комплексу персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-1» інформаційного компоненту — спеціалізованого програмного модуля «ProMova 1.0» для вирішення проблеми багатокритеріального вибору параметрів тренувань тонкої моторики кисті для відновлення усного мовлення, які здійснює лікар під час організації індивідуального підходу до реабілітації.

ПЕРСПЕКТИВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Головною метою сучасних досліджень, розрахованих на ближню і дальню перспективу, є підвищення ефективності створених і нових технологій діагностики і реабілітації м'язових, мовленнєвих та інших функцій, які мають зв'язок з м'язовими, за рахунок наближення технологій до пацієнта, забезпечення індивідуального підходу до реабілітації, отримання оперативної інформації про стан пацієнта, формування індивідуальних планів відновного лікування/корегування пошкоджених патологією функцій, зручності масового використання створених технологій.

Дослідження, які спрямовано на *синтез технологій мобільної інформаційно-консультаційної допомоги лікарю у діагностиці стану рухових і мовленнєвих функцій, пошкоджених патологією, та формування індивідуальних планів реабілітації цих функцій*, передбачають розроблення нових методик кількісного оцінювання дефіциту рухових і мовленнєвих функцій у хворих після інсульту, алгоритмів, критеріїв, вирішувальних правил формування індивідуального плану реабілітації рухів і усного мовлення на базі кількісних характеристик глибини рухових і мовленнєвих порушень, розроблення мобільного спеціалізованого програмного модулю, який функціонує на смартфоні/планшеті для оперативної інформаційно-консультаційної допомоги лікарю у діагностиці та реабілітації рухів і усного мовлення. В цьому напрямку вже отримано перші результати [18, 19].

Синтез технологій керування активністю м'язів для виконання координованих рухів, методів і засобів *індивідуального формування складних координованих рухів кінцівок* на базі багатоканальних програмних міоелектростимуляторів передбачає розроблення гнучкої архітектури штучного синтезу активних фаз залучення м'язів у виконання складного руху та створення зручного інтерфейсу, на якому відображається сформована програма (модель) руху для допомоги оператору і пацієнту проводити індивідуальне відпрацювання окремих активних фаз м'язової активності у структурі складного координованого руху.

Відновне лікування і профілактика дефектів постави, як однієї з найактуальніших проблем сучасної ортопедії, передбачає розроблення нової технології діагностики та індивідуальної корекції дефектів постави на

базі використання двох методів корекції — біологічного зворотного зв'язку і програмної електростимуляції. Це надає можливість задіяти додаткові резерви організму до формування симетричної активності (симетричного тону) м'язів спини за рахунок комплексної аферентації: зорової, слухової і пропріоцептивної.

ВИСНОВКИ

Розглянуто еволюцію синтезу біотехнічних систем керування рухами як зовнішніх контурів керування: відкритих типу «МІОТОН», адаптивних, які мають зворотні зв'язки типу «МІОСТИМУЛ», а також новий клас електронних апаратів цифрової медицини — персональних, біологічно адекватних, типу ТРЕНАР®.

Апарати біоелектричного керування рухами «МІОТОН» — це перші апарати, в яких використовували програмовану багатоканальну електростимуляцію нервово-м'язового комплексу за програмами у вигляді перетворених електроміографічних сигналів однойменних м'язів іншої людини. У поєднанні з багатоканальністю це дало змогу нав'язувати рухи, близькі до природних, і покращувати відновлення рухових функцій після важких захворювань центральної і периферичної нервової системи.

Введення зворотних зв'язків в апарати керування рухами «МІОСТИМУЛ» з автоматичного регулювання динамічного діапазону сигналу стимуляції, автоматичного зменшення рівня або відключення сигналу стимуляції у разі втоми м'язів внаслідок тренувальних процедур дало змогу підвищити відповідність нав'язаного руху програмному і уникнути включення захисних реакцій організму, які можуть спотворити штучно викликану аферентацію у разі перевищення рівня електростимуляції. Регулювання динамічного діапазону сигналу стимуляції доцільно не тільки з метою відновлення рухових функцій, але й в спеціальних завданнях лінійного керування.

Головною перевагою нового класу електронних апаратів цифрової медицини ТРЕНАР® є можливість організувати індивідуальний, біологічно адекватний підхід до відновлення рухових і мовленнєвих функцій залежно від виду, глибини патології і етапу реабілітації. Індивідуальний підхід до активації додаткових резервів мозкової діяльності на відновлення порушених рухових функцій досягається за рахунок використання оригінальних програм формування м'язових рухів, оснований на різних методах. Програми «Донор», «Поріг», «Біотренування» передбачають активну участь пацієнта в тренуванні, надають можливість уникати монотонних процедур, самостійно гнучко перебудовувати ритм і об'єм рухів, що тренуються, поступово ускладнювати тренувальне завдання. Все це сприяє реабілітації.

На базі оброблення і перетворення електроміографічних сигналів в зорові і слухові інформативні сигнали отримала розвиток теорія «образного усвідомлення» м'язової активності зоровим і слуховим аналізаторами кори головного мозку, що надало можливість задіяти додаткові резерви організму на відновлення м'язових функцій.

Оригінальна технологія персонального відновлення усного мовлення на базі тренувань тонкої моторики кисті у хворих після інсульту з порушеннями мовлення за типом моторної або моторно-сенсорної афазії та порушеннями рухових функцій за типом геміпарезу, яку реалізовано на базі

комп'ютерного програмно-апаратного комплексу «ПРОМОВА-1», тренування розширеної гами рухів кисті і пальців рук за технологією ТРЕНАР[®], які враховують онтогенетичний зв'язок розвитку рухів кисті і усного мовлення, включення в комп'ютерний комплекс «ПРОМОВА-1» спеціалізованого програмного модуля «ProMova 1.0», який виконує функції інформативно-консультаційної допомоги лікарю під час проведення реабілітаційних заходів з відновлення усного мовлення уможливило організацію індивідуального підходу і підвищення ефективності відновлення у порівнянні з базовим курсом реабілітації.

Керування рухами на базі електронних систем як зовнішніх контурів, що виконують у власній системі роль відсутньої ланки і/або додаткового контуру в регуляції рухів, дає змогу цілеспрямовано відновлювати рухові функції або опосередковано впливати на інші, наприклад усне мовлення, яке має зв'язок з руховими.

Організація керування відновленням рухових і мовленнєвих функцій на базі зовнішніх контурів, роль яких виконують апарати ТРЕНАР, є прикладом нового міждисциплінарного напрямку в керуванні фізіологічними, зокрема руховими і мовленнєвими функціями, яке з'явилося на стику кібернетики, інформатики, нейробіології, медицини, та є прикладом інтелектуального керування відновленням патологічно змінених функцій, організованого на основі медико-фізіологічних і технічних знань.

Сучасні дослідження, розраховані на ближню і дальню перспективу, спрямовано на подальший розвиток таких пріоритетних напрямів у медицині, як індивідуальний підхід до лікування, цифрова медицина, мобільне здоров'я на базі нових інформаційних технологій. Мобільність створює умови для масового використання інноваційних технологій, наближує нові технології до пацієнта.

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. Биоэлектрична система «Миотон» і рухові функції людини. *Вісн. АН УРСР*. 1969. Вип.4. С. 70–80.
3. Алеев Л.С., Вовк М.І., Горбанев В., Шевченко А. «Миотон» в управленні движениями. Киев: Наук. думка, 1980. 142 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles: United States Patent 4,165,750 Aug. 28, 1979.
8. Гриценко В.І., Котова А., Вовк М. и др. Інформаційні технології в біології та медицині. Курс лекцій. Київ: Наук. думка. 2007. 382 с.

9. Вовк М.И. Биоинформационная технология управления движениями человека. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2010. Вып. 161. С. 42–52.
10. «Тренар» — инновационная технология восстановления движений. Матеріали Міжнародного науково-практичного форуму «Наука і бізнес — основа розвитку економіки». Дніпропетровськ, 2012. С.204–206.
11. Вовк М.И. Биоинформационная технология управления движениями как направление биологической и медицинской кибернетики. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2013. Вып. 174. С. 56–70.
12. Вовк М.И., Галян Е.Б. Восстановление моторного компонента речи на базе управления мышечными движениями. Теоретическое обоснование. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2012. Вып. 167. С.51–60.
13. 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.
14. Вовк М.И., Галян Е.Б. Персонализованный биотехническая система для восстановления речи. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2015. Вып. 179. С. 5–19.
15. Вовк М.И., Галян Е.Б. Персонализованный биотехническая система для восстановления речи. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2015. Вып. 179. С. 5–19.
16. Вовк М.И., Галян Е.Б. Организация интеллектуального управления движениями кисти для восстановления речи. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2016. Вып. 184. С. 25–43.
17. Галян Е.Б. Специализированный программный модуль технологии восстановления речи, архитектура и функциональное взаимодействие его компонентов. *Управляющие системы и машины*. 2014. № 6. С. 52–58.
18. 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.
19. Вовк М.И., Куцяк О.А., Лаута А.Д., Овчаренко М.А. Інформаційний супровід досліджень динаміки відновлення рухів після інсульту. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2017. №3 (189). С. 61–78.
20. Вовк М.И., Галян Е.Б., Куцяк О.А., Лаута А.Д. Формування індивідуального комплексу керувальних впливів для реабілітації рухів і мовлення після інсульту. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2018. №3 (193). С. 43–63.

Получено 14.09.2018

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. Aleev L.S., Vovk M.I., Gorbanev V., Shevchenko A. «Mioton» in motor control. Kiev: Nauk. dumka, 1980. 142 p. (in Russian).
4. 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).
5. 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).
6. 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).
7. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles: United States Patent 4,165,750 Aug. 28, 1979.

8. Gritsenko V.I., Kotova A., Vovk M et.al. Information technology in Biology and Medicine. Lecture course. Kyiv: Nauk. Dumka, 2007. 382 p. (in Ukrainian).
9. Vovk M.I. Bioinformatic technology of motor control of a person. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2010. Iss. 161. P. 42–52 (in Russian).
10. “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.
11. Vovk M.I. Bioinformatic technology of motor control as the direction of biological and medical cybernetics. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2013. № 174. P. 56–70 (in Russian).
12. Vovk M.I., Galyan Ye.B. Restoring of motor component of speech based on muscle movement control. Theoretical grounding. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2012. № 167. P. 51–60 (in Russian).
13. 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).
14. Vovk M.I., Galyan Ye.B. Personalized biotechnical system to restore speech. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2015. Iss. 179. P. 5–19 (in Russian).
15. Vovk M.I., Galyan Ye.B. Organization of Intelligent Hand Movements Control to Restore Speech. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2016. Iss. 184. P. 25–43 (in Russian).
16. 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).
17. 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. Donetsk: Scientific-information center "Knowledge", 2016. P. 70–76 (in Russian).*
18. Vovk M.I., Kutsyak O.A., Lauta A.D., Ovcharenko M.A. Information Support of Researches on the Dynamics of Movement Restoration After the Stroke. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2017. № 3 (189). P. 61–78 (in Ukrainian).
19. Vovk M.I., Galyan Ye.B., Kutsyak O.A., Lauta A.D. Formation of individual complex of control actions for motor and speech rehabilitation after a stroke. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2018. № 3 (193). P. 43–63. (in Ukrainian).

Recieved 14.09.2018

Вовк М.И., канд. биол. наук, старш. науч. сотр.,
зав. отд. биоэлектрического управления и медицинской кибернетики
e-mail: vovk@irtc.org.ua; imvovk3940@gmail.com
Международный научно-учебный центр
информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины,
п-кт Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, Украина

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ. ЭВОЛЮЦИЯ СИНТЕЗА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Эволюция синтеза технологий биоэлектрического управления движениями человека представлена в анализе нескольких поколений программных миоэлектростимуляторов типа «МИОТОН», «МИОСТИМУЛ» и нового класса аппаратов цифровой медицины ТРЕНАР®. Особенностью этих аппаратов является использование специально обработанных электромиографических (ЭМГ) сигналов в качестве программ управления сигналами электростимуляции и обратной связи. Рассмотрены принципы, критерии, методы, программы, на базе которых синтезирована инновационная технология персональной тренировки / восстановления движений ТРЕНАР®. Представлен компьютер-

ний програмно-апаратний комплекс «ПРОМОВА-1», который реализует новую технологию персонального восстановления устной речи у больных после инсульта на базе оригинальных методик тренировок тонкой моторики кисти. Перспективные исследования направлены на синтез технологий мобильной информационно-консультационной помощи врачу в диагностике дефицита двигательных и речевых функций и формировании индивидуальных планов реабилитации, на синтез технологий управления согласованной активностью мышц во время выполнения координированных движений и восстановительного лечения дефектов осанки.

Ключевые слова: *биоэлектрическое управление, движение, речь, координация, осанка, персональная реабилитация, методы, программы, миоэлектростимуляция, цифровая медицина.*

Vovk M.I., PhD (Biology), Senior Researcher,
Head of Bioelectrical Control & Medical Cybernetics Department
e-mail: vovk@irtc.org.ua; imvovk3940@gmail.com
International Research and Training Center for Information Technologies
and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine,
Acad. Glushkov av., 40, Kiev, 03187, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY OF MOVEMENT CONTROL. EVOLUTION OF SYNTHESIS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

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

The purpose of the article is to consider the theoretical and technological bases of the evolution of synthesis of biotechnical systems for motion control, to show the role of new information technologies and means of digital medicine in the synthesis of systems for personal control of movements for the restoration of motor and speech functions that are affected by pathology.

Results. The evolution of the synthesis of technologies of bioelectric control of human movements is given in the analysis of several generations of programmed muscle electrostimulators such as MIOTON, MIOSTIMUL and the new class of digital medicine devices TRENAR[®]. The main feature of these devices is the use of specially processed electromyographic (EMG) signals as programs to control signals of electrical stimulation and feedback. The principles, criteria, methods, programs, on the basis of which the innovative technology of personal training / restoration of movements TRENAR[®] is synthesized are considered. The computer program-apparatus complex "PROMOVA-1" is presented, that implements new technology of personal reconstruction of oral speech after a stroke based on the original techniques of fine motor hand training. Prospective studies are aimed at the synthesis of mobile informational and consulting assistance to the doctor in diagnosing the deficit of motor and speech functions and the formation of individual rehabilitation plans; at the synthesis of technologies to control muscle activity coordination during the performance of coordinated movements and rehabilitation treatment of posture defects.

Conclusion. Current researches are aimed at the further development of such priority areas in medicine as an individual approach to treatment, digital medicine, mobile health based on new information technologies.

Keywords: *bioelectric control, movement, speech, coordination, posture, personal rehabilitation, methods, programs, myoelectrostimulation, digital medicine.*