

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.087>

УДК: 615.47: 004.9

CC BY-NC

**ВОВК М.І.**, канд. біол. наук, старш. наук. співроб.,  
зав. відд. біоелектричного керування та медичної кібернетики  
ORCID: 0000-0003-4584-9553, e-mail: [vovk@irtc.org.ua](mailto:vovk@irtc.org.ua); [imvovk3940@gmail.com](mailto:imvovk3940@gmail.com)

**КУЦЯК О.А.**, канд. техн. наук,  
старш. наук. співроб., відд. біоелектричного керування та медичної кібернетики  
ORCID: 0000-0003-2277-7411, e-mail: [spirotech85@ukr.net](mailto:spirotech85@ukr.net)

Міжнародний науково-навчальний центр  
інформаційних технологій та систем  
НАН України та МОН України,  
пр. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

## **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ КЕРУВАННЯ М'ЯЗОВИМИ ФУНКЦІЯМИ. РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ**

---

**Вступ.** Дослідження з керування м'язовими функціями визначається не тільки науковим інтересом, але й практичною необхідністю.

**Мета статті** — виконати ретроспективний аналіз синтезу інформаційних технологій керування м'язовими функціями людини для їхнього відновлення, корекції або навчання.

**Результати.** Показано еволюцію синтезу наукоємних інформаційних технологій керування м'язовими функціями з метою їхнього відновлення, корекції або навчання на базі зовнішніх контурів керування, роль яких виконують інформаційно-енергетичні сигнали міостимуляції, які надходять від електронних програмних апаратів або програмно-апаратних комплексів. Розглянуто головні класи першого покоління таких апаратів — відкриті «МІОТОН», адаптивні «МІОСТИМУЛЬ», а також сучасні — «ТРЕНАР», які містять набір базових програмних модулів активації резервів організму на відновлення м'язової активності залежно від стану рухових функцій і загального стану пацієнта. Розглянуто нову запатентовану технологію відновлення усного мовлення у пацієнтів після інсульту на базі тренувань тонкої моторики кисті. Надано нову інформаційну технологію цифрової медицини з реалізацією у «АІ-РЕАБІЛІТОЛОГ», яка для надання інформаційної допомоги користувачу (лікарю) у прийнятті діагностично-лікувальних рішень з реабілітації рухових і мовленнєвих функцій використовує інструменти штучного інтелекту — спеціалізовані програмні модулі формування персоналізованого плану тренувань рухів кінцівок, тонкої моторики кисті, зокрема для відновлення усного мовлення та форми ходи за результатами кількісного оцінювання їх дефіциту. Подано результати практичного застосування розроблених інформаційних технологій, їхні переваги та перспективи розвитку.

**Висновки.** Головними принципами синтезу наукоємних інформаційних технологій керування м'язовими функціями з метою їхнього відновлення, корекції або навчання на базі зовнішніх контурів керування є поєднання фізичних і когнітивних впливів, активна участь суб'єкта у проведенні тренувальних процедур та їх самоконтроль.

**Ключові слова:** інформаційні технології, керування, апарати міостимуляції, рухи, мовлення, реабілітація, інсульт, персоналізована кількісна оцінка, критерії, штучний інтелект, програмний модуль, структурно-функціональна модель

© ВОВК М.І., КУЦЯК О.А., 2022

ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print). *Cyb. and Comp. Eng.* 2022. № 1 (207)

87

## ВСТУП

Становлення і розвиток досліджень з керування рухами визначалися не лише науковим інтересом, а й практичною необхідністю. Рухова активність є винятково важливим, фундаментальним чинником формування, збереження, зміцнення здоров'я та гармонійного розвитку людини, 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 «омолодження». Інсульт — основна причина інвалідності дорослого населення. Дитячий церебральний параліч (ДЦП) залишається головною причиною інвалідності серед дітей. Розроблення ефективних методів керування рухами для відновлення рухової спроможності не перестає бути актуальною задачею.

**Об'єкт досліджень:** процеси керування відновленням загальних рухів кінцівок, тонкої моторики кисті, усного мовлення, координацією активності м'язів.

**Методи:** структурно-функціональне моделювання, програмна міоелектростимуляція, біологічний зворотний зв'язок, багатокритеріальний вибір параметрів тренувань рухів, інформаційно-структурне моделювання, об'єктно-орієнтоване проектування, алгебра логіки.

**Мета статті:** виконати ретроспективний аналіз синтезу інформаційних технологій керування м'язовими функціями людини для їхнього відновлення, корекції або навчання.

## СТАНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК НАПРЯМУ БІОЕЛЕКТРИЧНОГО КЕРУВАННЯ М'ЯЗОВИМИ ФУНКЦІЯМИ ЛЮДИНИ (1964-1997 РР.)

Дослідження, спрямовані на керування рухами людини, започатковано ще у стінах Обчислювального Центру АН УРСР у відділі біологічної кібернетики, яким завідував академік М.М. Амосов. Стояло завдання — розробити теорію керування основними функціями і органами живих організмів на основі біоелектростимуляції, і в його рамках сформувався напрям біоелектричного керування руховими функціями. Таке керування використовує в якості команд і сигналів зворотного зв'язку оброблені електроміографічні (ЕМГ) сигнали. З 1964 р. цей напрям отримав цілеспрямований розвиток в Інституті кібернетики АН України, в лабораторії керування руховими реакціями в живих організмах, з 1969 р. — у відділі біоелектричного керування і медичної кібернетики. З травня 1997 р. продовжує плідно розвиватися в Міжнародному центрі інформаційних технологій та систем НАН України і МОН України у згаданому відділі. З 1964 р. до 2009 р. на чолі досліджень стояв доктор медичних наук, професор Л.С. Алєєв, 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 у 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.

**«МІОТОН».** *Багатоканальні пристрої біоелектричного керування рухами людини.* Важливим етапом у розвитку програмної міоелектростимуляції став перехід до використання в якості програми (моделі активації м'язів, які втягуються в рух) оброблених ЕМГ сигналів здорових довільних рухів. Такий спосіб керування рухами застосовано у пристроях типу «МІОТОН» [1–3]. У 1965 р. в Інституті кібернетики АН УРСР виготовлено перший експериментальний зразок багатоканального пристрою біоелектричного керування рухами людини «МІОТОН». Використання оброблених ЕМГ сигналів здорових довільних рухів як програм вже на цьому етапі пов'язано з поняттям «біоелектричного образу руху» як моделі (програми) формування примусових м'язових скорочень під впливом програмної міоелектростимуляції [3].

У 1967–1970 рр. виготовлено дослідні зразки 6-канального апарата «МІОТОН-2», який включено до номенклатури дозволених для застосування у медичній практиці і серійного виробництва виробів медичної техніки (Ресстраційне посвідчення № 77/29/13 від 4.02.1977 р.). Результатом модернізації апарата «МІОТОН-2» було створення апаратів «Міотон-3М», 1983 р. та «МІОТОН-604» з покращеними технічними характеристиками і сервісними функціями [4]. Апарати типу «МІОТОН» широко використовують в клініках і курортах колишнього СРСР для відновлення рухових функцій, пошкоджених патологією центральної і периферичної нервової системи [3].

У рамках співпраці з НПКФ «Біокор-інформатика» при Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова АН УРСР розроблено, поставлено на виробництво і використано в медичних установах України 6-канальний програмний біоелектричний стимулятор «МІОКОР-МК-01» (1991 р.). Особливістю апарата порівняно з апаратами типу «МІОТОН» є наявність банку штучно синтезованих програм керування, які враховують найхарактерніші залучення м'язів у виконання різних рухів.

**«МІОСТИМУЛ».** *Багатоканальні пристрої адаптивного біоелектричного керування рухами людини.* Введення зворотних зв'язків в електронні системи керування рухами дало змогу перейти до нового класу апаратів, які реалізують принципи адаптивного керування. Адаптивний підхід є корисним в умовах великої початкової невизначеності, а також у системах керування об'єктами з характеристиками, що 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 істотний розкид; параметри м'язової активності істотно відрізняються у разі патології і зазнають змін у процесі електростимуляції. Адаптивне керування передбачає автоматичне підлаштування параметрів сигналу стимуляції під функційний стан м'язів, які стимулюються. Принципи адаптивного керування реалізовано в 6-канальному апараті «МІОСТИМУЛ», який містить два види зворотного зв'язку: перший — для

автоматичного регулювання динамічного діапазону сигналу стимуляції [5], другий — для зменшення рівня сигналу стимуляції або відключення стимуляції, коли настає стомлення стимульованих м'язів [6]. Технологія адаптивного керування захищена патентами США, Англії, Німеччини Франції, Канади, Швеції, Італії, Югославії, наприклад [7].

## РОЗВИТОК ПЕРСОНАЛІЗОВАНОГО ПІДХОДУ ДО КЕРУВАННЯ М'ЯЗОВИМИ ФУНКЦІЯМИ (1997–2022 РР.)

Індивідуальний підхід до лікування є одним з пріоритетних напрямів у сучасній системі охорони здоров'я. Реабілітація — це насамперед мобілізація резервів організму на відновлення функції, порушеної внаслідок патології. Використання сучасних інформаційних технологій (ІТ) створює нові можливості вибору індивідуального «маршруту» лікування. У разі відновлення рухових функцій мобілізація резервів передбачає розроблення та реалізацію індивідуальних комплексних програм медичної реабілітації, в яких поряд з лікарськими засобами провідне місце займають технології персоналізованого тренування/керування рухами на основі зовнішніх контурів. Такі зовнішні контури виконують роль відсутньої ланки у формуванні/коригуванні гомеостазу рухової системи та забезпечують функції сприйняття, передачі знань про рух, формування, регулювання і контролювання рухів. За вимогами до синтезу зовнішніх контурів керування м'язовими функціями сформульовано принципи організації персоналізованого підходу до біологічно адекватного запуску і стимуляції резервів організму на відновлення рухів та розроблено критерії, які забезпечують виконання цих принципів [8].

**Технологія «ТРЕНАР®».** *Методи та індивідуальні програми активації резервів організму на відновлення рухових функцій.* Персоналізований 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.* Ці методи є основою синтезу біоінформаційної технології відновлення рухових і мовленнєвих функцій ТРЕНАР®. Технологію реалізує новий клас електронних засобів цифрової медицини: «Апарат для електростимуляції з біокеруванням Тренар-01» і «Апарат для електростимуляції з біологічним зворотним зв'язком Тренар-02» (рис. 1) [8].



**Рис. 1.** а) — Комплекс «ТРЕНАР»: апарати Тренар-01 і Тренари-02, б) — тренування рухів за програмою "Донор" і методом порогової стимуляції

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

*Програмно-технологічний модуль «Синтез».* Його завдання — тренування примусових рухів під впливом електростимуляції м'язів за штучно синтезованими програмами у широкому діапазоні «надсилання — пауза» імпульсів електростимуляції. Модуль застосовують на ранніх етапах реабілітації, зокрема майже за відсутності рухів ураженої кінцівки.

*Програмно-технологічний модуль «Донор».* Його завдання — тренування примусових рухів ураженої кінцівки під впливом електростимуляції відповідних м'язів за програмами, «зчитаними» 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 та здійснює контроль її виконання. Інформаційний потік, що йде у пошкоджену моторну зону кори головного мозку, складається з пропріоцептивних імпульсів як від довільних скорочень-розслаблень м'язів здорової кінцівки, так і від примусових скорочень-розслаблень м'язів пошкодженої кінцівки. 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».* Його завдання — тренування співвідношення довільно-примусових скорочень м'язів. Тренування спрямовано на те, щоб з кожним новим сеансом довільне скорочення м'язів долало все більший поріг ЕМГ сигналу, який виникає за умови довільного скорочення м'язів, що тренуються. Метод порогової електростимуляції застосовують у разі появи у пацієнта найменших ознак довільних рухів за відсутності порушень когнітивної сфери.

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

*Програмно-технологічний модуль «Біотренування».* За цією програмою на основі біологічного зворотного зв'язку (БЗЗ), зорового і слухового за ЕМГ, пацієнт тренує довільні скорочення м'язів відповідно до встановленого пацієнтом або інструктором (лікарем) тренувального завдання. У разі використання методу БЗЗ мотивація є ключовою у процесі аферентного синтезу. Програму «Біотренування» за цим методом зазвичай використовують на останніх етапах реабілітації для наближення рухів пацієнта до норми. Важливо, що цю програму можна використовувати за наявності у пацієнта певних протипоказань до електростимуляції, наприклад кардіостимулятора.

**Таблиця 1.** Ефективність відновлення рухів за програмами технології ТРЕНАР®

Нозологія	Кількість пацієнтів	Ефективність лікування: кількість пацієнтів, (%)		
		Значне покращення	Покращення	Без змін
Наслідки інсульту	4855	1214 (25 %)	3301 (68 %)	340 (7 %)
ДЦП	633	101 (16 %)	494 (78 %)	38 (6 %)
Неврит лицевого нерва	1139	433 (38 %)	581 (51 %)	125 (11 %)
Невропатії	1329	465 (35 %)	758 (57%)	106 (8%)
Наслідки патологій хребта	5487	4553 (83 %)	879 (16%)	55 (1%)
Інше	7069	4595 (65 %)	2333 (33 %)	141 (2%)
Всього:	20512	11361 (55 %)	8346 (41 %)	845 (4 %)

Методологія, яка поєднує використання «ЕМГ 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 електростимуляції, БЗЗ), сприяє утворенню нових умовно рефлекторних комплексів під дією впливів як *фізичних, так і когнітивних*.

Комплекс ТРЕНАР® захищено патентами України, свідоцтвами про реєстрацію авторського права на твір, на комп'ютерні програми, на знак для товарів і послуг TRENAR, має переваги перед аналогами за гамою функцій (методами та програмами відновного лікування рухів), що підвищує ефективність реабілітації, розширює сферу застосування за меншої (в 7–10 разів) вартості. Електронні медичні вироби «ТРЕНАР-01» і «ТРЕНАР-02» отримали відповідні Свідоцтва про Державну реєстрацію № 13235/2013, № 12121/2012, внесені до Державного реєстру медичної техніки та виробів медичного призначення України (рис. 1). Їх використовують у клінічних, поліклінічних, санаторно-клінічних закладах, сімейні лікарі і приватні особи. Загальна кількість пролікованих пацієнтів, дорослих і дітей, становить понад 20 тис. осіб. Ефективність лікування рухів доведена за різноманітної патології, зокрема з наслідками інсульту та ДЦП (Таблиця 1).

**«ПРОМОВА».** *Комп'ютерний програмно-апаратний комплекс персонального відновлення мовлення.* Наслідками інсульту є не лише розлади рухових функцій, але й мовленнєві порушення, серед яких одним з найпоширеніших є моторна афазія внаслідок ураження моторної мовленнєвої зони кори головного мозку, де формується рухова програма мовленнєвого висловлення. Хворий втрачає можливість говорити через порушення рухових команд подібно до розладів рухових функцій після інсульту, спричинених порушенням рухових команд у моторних зонах кори головного мозку, нейрони яких організують руховий акт. М'язові рухи мовленнєвого апарата є одними з видів довільних м'язових рухів. Наявність мовленнєвого дефекту знижує комунікативні можливості хворих, сприяє їхній соціальній ізоляції. Синтез ефективних методів і технологій відновлення усного мовлення, розроблення

інструментарію для їхнього швидкого та якісного впровадження є актуальним науково-прикладним завданням. Зв'язок рухових і мовленнєвих функцій, проєкція кисті у корі головного мозку, 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 основі 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 [9, 10].

Технологія відновлення мовленнєвих функцій використовує методи і програми тренувань кисті і пальців, які надає апаратно-програмний комплекс «ТРЕНАР®». Рухи пальців рук для тренування вибирають за критеріями розвитку тонкої моторики кисті в онтогенезі, доступності передачі сигналів електростимуляції відповідним м'язам за допомогою поверхневих електродів, стану рухів кисті та пальців після інсульту. Технологію реалізує комп'ютерний програмно-апаратний комплекс персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-2» [11].

Центральною ланкою комплексу є технічна система, яка складається з двох компонентів: електронні апарати керування рухами «ТРЕНАР-01» і «ТРЕНАР-02», за допомогою яких здійснюють тренування рухів тонкої моторики ураженої кисті і пальців, та інформаційний компонент — спеціалізований програмний модуль «ProMova 1.2», реалізований для персонального комп'ютера (ПК). Включення у технічну систему інформаційного компонента зумовлено проблемою багатокритеріального вибору параметрів тренувань, який здійснює лікар під час організації індивідуального підходу до реабілітації. Позитивні результати використання комплексу «ПРОМОВА-2» показали покращення функції моторного компонента мовлення порівняно з базовим курсом реабілітації на 32,5 % ( $p < 0,02$ ), що дає підставу для включення інформаційної технології (ІТ) відновлення мовлення до обов'язкового комплексу реабілітаційних заходів. Проте наведені показники відображають якісну оцінку експертів.

Масове використання комплексу «ПРОМОВА-2» значною мірою визначається об'єктивним оцінюванням динаміки дефіциту мовленнєвих функцій внаслідок реабілітаційних заходів, важливе значення в якій має кількісна оцінка дефіциту мовленнєвих функцій за доказовими критеріями. Таке оцінювання є важливим складником цифрової медицини, допомагає лікарю оцінити ефективність реабілітаційного процесу та формувати індивідуальний план реабілітації на основі об'єктивного оцінювання. Не менш важливим для впровадження є забезпечення зручності взаємодії користувача з комп'ютерним комплексом.

**«AI – РЕАБІЛІТОЛОГ».** *Інтелектуальна ІТ формування персоналізованого плану реабілітації рухів після інсульту.* Застосування технології ТРЕНАР® у відновному лікуванні рухів показало високий ступінь покращень рухових функцій, оцінений експертним шляхом (табл. 1). Проте для об'єктивізації оцінювання ефективності реабілітаційного процесу розроблено методіку кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій у пацієнтів, яка пройшла клінічну апробацію у пацієнтів після інсульту [12]. Така методика створена на основі тестових методів експертного оцінювання

дефіциту рухових функцій за доказовими критеріями, оскільки не кожна клінічна установа має відповідні інструментальні засоби оцінювання дефіциту рухових функцій. Для оцінювання дефіциту вибрано такі основні та додаткові критерії з відповідними шкалами оцінювання, які мають однакову шестибальну градацію та зіставляються зі шкалою динаміки парезу (що є зручним для формування інтегрального кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій) [13]:

– основні: оцінювання за критеріями сили м'язів — за шкалою L. McPeak, M. Вейсс [14], та обсягу рухів — за шкалою Л. Столярової [13] проксимальних та дистальних відділів кінцівок на рівні суглобів (плечового, ліктьового, променево-зап'ясткового — для верхньої кінцівки, а також кульшового, колінного, гомілково-ступневого — для нижньої кінцівки);

– додаткові: оцінювання ходи за критерієм форми ходи та моторики кисті руки за критеріями: протиставлення великого пальця (протиставлення дистальної фаланги великого пальця основі інших), згинання пальців у кулак, основної функції кисті (схоплення і втримування предметів), розгинання пальців кисті [15, 16].

Також оцінюють тонус м'язів: гіпертонус — за модифікованою шкалою Ашфорт; гіпотонус — за спеціально запропонованою шестибальною шкалою [12]. Тонус м'язів не входить в інтегральну кількісну оцінку дефіциту рухових функцій, але має діагностичне значення у створенні персоналізованого плану реабілітаційних заходів пацієнтів після інсульту.

Експертне оцінювання уражених кінцівок виконують відносно власних здорових кінцівок пацієнта, рухові функції яких характеризують індивідуальну норму відсутності порушень [12].

Для зручності використання лікарями-неврологами цієї методики розроблено Протокол оцінювання дефіциту рухових функцій кінцівок та ефективності їхньої реабілітації у пацієнтів, які перенесли інсульт, з відповідними таблицями оцінювання дефіциту рухових функцій за основними та додатковими доказовими критеріями, оцінювання тону м'язів (гіпертонус і гіпотонус), сумарного кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій з прив'язкою до ступеня парезу та ефективності відновлення моторних функцій [12]. Ефективність реабілітації визначають порівнюючи дефіцит рухових функцій до і після реабілітації.

Кількісне оцінювання дефіциту рухових функцій відіграє важливу роль у цифровій медицині. Така оцінка допомагає лікарю зменшити помилку в оцінюванні перебігу та ефективності реабілітаційного процесу, а також є основою синтезу мобільних засобів інформаційно-консультаційної допомоги лікарю у формуванні та внесенні корективів до індивідуального плану відновлення пошкоджених патологією функцій на різних етапах реабілітації.

За отриманими показниками кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій з урахуванням неврологічного статусу і супутніх захворювань пацієнта формується персоналізований рекомендований план тренування рухів для їхнього відновлення — багатокритеріальне визначення за пріоритетом рухів і тривалості їх тренувань, методів та програм тренувань апаратами ТРЕНАР® з наданням пріоритету методу, програмі тренувань, що впливає з принципу біологічно адекватної активації додаткових резервів організму на відновлення рухів на поточному етапі реабілітації пацієнта.





Рис. 2. Структурно-функціональна модель взаємодії лікаря з пацієнтом і програмно-апаратним комплексом AI «РЕАБІЛІТОЛОГ»

Для визначення складників плану тренувань рухів застосовують розроблені із застосуванням алгебри логіки вирішувальні правила на основі змінних, які відповідають неврологічному статусу, супутнім захворюванням пацієнта критеріям та показникам дефіциту рухових функцій та ступеня м'язового тону, а також критеріям дозволу-обмеження-заборони тренування рухів пацієнта.

*Практична реалізація.* Методика кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій та метод формування персоналізованого рекомендованого плану тренування рухів за технологією ТРЕНАР® втілено в інтелектуальну інформаційну технологію формування персоналізованого плану реабілітації рухів після інсульту. Цю технологію реалізує програмно-апаратний комплекс AI «РЕАБІЛІТОЛОГ» (рис. 2), який для надання інформаційної допомоги користувачу (лікаря) у прийнятті діагностично-лікувальних рішень використовує інструменти штучного інтелекту — спеціалізований програмний модуль формування рекомендованого персоналізованого плану тренувань рухів «MovementRehabStroke» [16, 17] апаратами ТРЕНАР® за результатами кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій програмним модулем «MovementTestStroke» [18] з урахуванням загального стану пацієнта.

Програмні модулі реалізовано для структур ПК та мобільних Android-платформ з використанням відповідних структурно-функціональних моделей, алгоритмів та UML-діаграм діяльності.

Сформований програмно персоналізований план тренування рухів може бути скориговано лікарем. Тренування рухів за цим планом забезпечує запуск і стимуляцію резервів організму на відновлення рухів залежно від

глибини їхніх порушень, неврологічного статусу, показників психоемоційного стану, супутніх захворювань та етапу реабілітації пацієнта.

Головними перевагами інтелектуальної інформаційної технології формування персоналізованого плану реабілітації рухів «AI - РЕАБІЛІТОЛОГ» є:

- розширення гами діагностики дефіциту рухів: розподілене та інтегральне кількісне оцінювання за доказовими критеріями на рівні суглобів проксимальних і дистальних відділів верхньої та нижньої кінцівок, тонкої моторики кисті та форми ходи;

- можливість виявляти специфіку порушень рухів внаслідок інсульту;

- персоналізація профілактичних і реабілітаційних заходів;

- збереження повної інформації про пацієнта у базі даних: інформації з медичної карти пацієнта відповідно до стандарту, а також спеціалізованої інформації: чинників заборони/обмежень тренувань рухів, первинної кількісної експертної оцінки дефіциту рухів, інтегральної кількісної оцінки дефіциту рухів до і після реабілітації, ефективності реабілітації; рекомендованих та скоригованих лікарем персоналізованих планів реабілітації рухів.

Уся ця інформація за запитом користувача виводиться на інтерфейс у зручній формі.

Результати апробації технології «AI-РЕАБІЛІТОЛОГ» підтвердили доцільність її використання у клінічній практиці, а також показали, що розроблена методика кількісного оцінювання глибини і специфіки порушень у динаміці сприяє запобіганню розвитку ускладнень і, як наслідок, зменшенню ризику набутої інвалідності [13].

**Апарати міостимуляції.** Перспективним новим класом апаратів міостимуляції, розроблених за останній час, є макети 4-канальних програмних міоелектростимуляторів персоналізованого формування складних координованих рухів кінцівок «ТренКорСинтез» і «МіоАктивСинтез», а також програмно-апаратний комплекс діагностики і корекції дефектів постави «МіоБалансСтимул». На відміну від наявних апарати «ТренКорСинтез» і «МіоАктивСинтез» мають гнучку архітектуру синтезу програм залучення м'язів у виконання складного руху, містять інтерфейси з відображенням сформованої програми (моделі) руху, що допомагає оператору і пацієнту відпрацьовувати окремі фази руху. Особливістю комплексу «МіоБалансСтимул» є використання двох методів корекції — біологічного зворотного зв'язку і програмної міоелектростимуляції, що сприяє активації додаткових резервів організму на відновлення симетрії активності м'язів спини, які формують вертикальну орієнтацію хребта.

Впровадження технологій цифрової медицини для відновного лікування рухових і мовленнєвих функцій супроводжувалось організаційною та консультативною діяльністю. Плідна співпраця з медичними закладами сприяла вдосконаленню технологій.

## ВИСНОВКИ

Еволюція синтезу наукоємних інформаційних технологій керування м'язовими функціями з метою їхнього відновлення, корекції або навчання на основі зовнішніх контурів керування пройшла два головних етапи.

На першому етапі — від 6-канальних програмних біоелектричних стимуляторів «МІОТОН» та «МІОКОР-МК-01» до адаптивних «МІОСТИМУЛ». «МІОТОН» — це перші апарати, в яких використано багатоканальну міоелектростимуляцію нервово-м'язового комплексу за програмами у вигляді перетворених ЕМГ сигналів однойменних м'язів іншої людини. Це дозволило нав'язувати рухи, близькі до природних, і покращувати відновлення рухових функцій після важких захворювань центральної і периферичної нервової системи. Особливістю апарата «МІОКОР-МК-01» порівняно з «МІОТОН» є наявність банку штучно синтезованих програм керування, які враховують найхарактерніші залучення м'язів у виконання різних рухів. Перевагами 6-канального апарата «МІОСТИМУЛ» є введення зворотних зв'язків (результати керування-параметри керування), що дало змогу підвищити відповідність нав'язаного руху програмному і уникнути втоми м'язів внаслідок тренувальних процедур.

На другому етапі синтез наукоємних інформаційних технологій було спрямовано на розвиток персоналізованого підходу до керування м'язовими функціями — від нового класу електронних апаратів цифрової медицини ТРЕНАР® до програмно-апаратних комп'ютерних комплексів «ПРОМОВА» та «АІ-РЕАБІЛІТОЛОГ». У двох останніх для надання інформаційної допомоги користувачу (лікаряю) у прийнятті лікувальних рішень використано інструменти штучного інтелекту.

Головною перевагою апаратів ТРЕНАР® є можливість організувати персоналізований, біологічно адекватний підхід до відновлення рухових і мовленнєвих функцій залежно від глибини патології та етапу реабілітації. Персоналізація досягається за рахунок використання оригінальних програм формування м'язових рухів на базі різних методів. Програми «Донор», «Поріг», «Біотренування» передбачають активну участь пацієнта у тренуванні, дають змогу уникати монотонних процедур, самостійно перебудувати ритм і обсяг рухів, що тренуються, поступово ускладнювати тренувальне завдання. Все це сприяє реабілітації.

Застосування запатентованої технології відновлення усного мовлення на основі тренувань тонкої моторики кисті у хворих після інсульту з використанням комп'ютерного програмно-апаратного комплексу «ПРОМОВА» уможливило збільшення ефективності відновлення усного мовлення порівняно з базовим курсом реабілітації.

Застосування інтелектуальної ІТ «АІ-РЕАБІЛІТОЛОГ», яка для надання інформаційної допомоги користувачу (лікаряю) у прийнятті лікувальних рішень використовує інструменти штучного інтелекту — спеціалізовані програмні модулі формування персоналізованого плану тренувань рухів за результатом кількісного оцінювання їхнього дефіциту, сприяє зменшенню помилки лікаря, запобіганню розвитку ускладнень, підвищенню ефективності оздоровчих послуг пацієнтам після інсульту. Програмна реалізація технології для структур ПК і мобільних Android-платформ уможливило застосування таких ІТ як у клінічних закладах, так і в домашніх умовах. На відміну від відомих аналогів допомагає виявляти особливості порушень рухових функцій кінцівок, форми ходи, тонкої моторики кисті, яка впливає на відновлення мовлення, а також уможливило діагностування порушень рухових функцій не тільки після інсульту, але й за наявності пухлин і

травм головного мозку. Ця технологія започаткувала створення нового класу мобільних засобів цифрової медицини діагностики та персоналізованих планів тренування рухів.

Результати досліджень можуть бути корисними для цивільної та військової медицини, фізіології праці, космонавтики, ергономіки, фізіології спорту. Розроблені технології можна адаптувати для використання в екзоскелетах для підсилення функції слабких м'язів інвалідів, для програмування дій робототехнічних систем, нормалізації рухів після перебування людини у невагомості тощо.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. А.С. Способ управления двигательными реакциями / Л.С. Алеев, С.Г. Бунимович (СССР); № 1019769/31-16; опубл. 29.12.66, Бюл. №2
2. Алеев Л.С. Биологическая система «Миотон» и 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 управлении движениями. Киев: Наук. думка, 1980. 142 с.
4. А.С. Способ управления движениями человека / Л.Алеев, С.Бунимович, М.Вовк, В.Горбанев, А.Шевченко (СССР); № 321245; 3.09. 1981.
5. А.С. Многоканальное устройство адаптивного биоэлектрического управления движениями человека / Л. Алеев, М.Вовк, В.Горбаньев, А.Шевченко (СССР); № 929 054; 23.05.1982.
6. А.С. Многоканальное устройство адаптивного биоэлектрического управления движениями человека / Л. Алеев, М.Вовк, В.Горбаньев, А.Шевченко (СССР); № 976 952; 03.08.1982.
7. United States Patent. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles / L. Aleev, S. Bunin, M. Vovk, V. Gorbanev, A. Shevchenko, F. Balchev; No 4, 165, 750; 28.08.1979.
8. Гриценко В., Котова А., Вовк М., Кіфоренко С., Белов В. Інформаційні технології в біології та медицині. Курс лекцій. Київ: Наукова думка, 2007. 382 с.
9. Вовк М.І., Галян Є.Б. Восстановление моторного компонента речи на базе управления мышечными движениями. Теоретическое обоснование. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2012. Вып. 167. С. 51–60.
10. Патент. Спосіб лікування мовних порушень / М.І. Вовк, Є.Б. Галян, О.М. Підпригора (Україна); № 111388; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 18 (in Ukrainian)
11. Vovk, M.I., Halian, Ye.B., Kutsiak, O.A. Computer Software & Hardware Complex for Personal Oral Speech Restoration after a Stroke. *Sci. innov.* 2020. Vol. 16, № 1(91). pp. 54–68. <https://doi.org/10.15407/scine15.05.054>
12. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Software module for personal diagnostics of motor functions after stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2019. № 4 (198). P. 62–77
13. Вовк М.І., Куцяк О.А., Лаута А.Д., Овчаренко М.А. Інформаційний супровід досліджень динаміки відновлення рухів після інсульту. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2017. Вип. 3 (189). С. 61–78.
14. Белова А., Щепетова О. Шкалы, тесты и опросники в медицинской реабилитации. Москва: Антидор, 2002. 440 с.
15. Смычек В.Б., Пономарева Е.Н. Черепно-мозговая травма (клиника, лечение, экспертиза, реабилитация). Минск: НИИ МЭ и Р, 2010. 430 с.
16. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Information technology for forming a personal movement rehabilitation plan after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2020. № 3 (201). P. 87–99.
17. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Mobile AI-technology for forming the personalized movements rehabilitation plan after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021. № 4 (206). P. 73–88.
18. Vovk M.I., Kutsyak O.A. AI-technology of motor functions diagnostics after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021. № 2 (204). P. 84–100.

Отримано 24.03.2021

REFERENCES

1. Inventor's certificate. The method of motor control / L. Aleev, S. Bunimovich (USSR); No 1019769/31-16; 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, Issue 4, pp. 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. The method of motor control of a person / L. Aleev, S. Bunimovich, M. Vovk, V. Gorbanev, A. Shevchenko (USSR); No 321 245; 03.09.1981. (in Russian).
5. Inventor's certificate. Multichannel device for adaptive bioelectrical motor control of a person / L. Aleev, M. Vovk, V. Goranev, A. Shevchenko (USSR); No 929 054; 23.05.1982. (in Russian).
6. Inventor's certificate. Multichannel device for adaptive bioelectrical motor control of a person / L. Aleev, M. Vovk, V. Goranev, A. Shevchenko (USSR); No 976 952; 03.08.1982. (in Russian).
7. United States Patent. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles / L. Aleev, S. Bunin, M. Vovk, V. Gorbanev, A. Shevchenko, F. Balchev; No 4, 165, 750; 28.08.1979.
8. V. Hrytsenko, A. Kotova, M. Vovk, S. Kiforenko, V. Bielov. Information technology in Biology and Medicine. Lecture course. Kyiv, 2007, 382 p. (in Ukrainian).
9. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Software module for personal diagnostics of motor functions after stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2019, № 4 (198), pp. 62–77
10. Patent. A method of treating speech disorders / M.I. Vovk, Ye.B. Halian, O.M. Pidpryhora (*Ukraine*); № 111388; published 25.04.2016, Bulletin no 18 (in Ukrainian)
11. Vovk, M.I., Halian, Ye.B., Kutsiak, O.A. Computer Software & Hardware Complex for Personal Oral Speech Restoration after a Stroke. *Sci. innov.* 2020, Vol. 16, № 1(91), pp. 54–68. <https://doi.org/10.15407/scine15.05.054>
12. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Software module for personal diagnostics of motor functions after stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2019, № 4 (198), pp. 62–77
13. Vovk M.I., Kutsiak O.A., Lauta A.D., Ovcharenko M.A. Information Assistance of Researches on the Dynamics of Movement Restoration After the Stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2017, № 3 (189), pp. 61–78. (in Ukrainian)
14. Belova A., Shchepetova O. Scales, tests and questionnaires in medical rehabilitation. Moscow: Antidor, 2002, 440 p. (in Russian)
15. Smychek V., Ponomareva E. Craniocerebral trauma (clinic, treatment, examination, rehabilitation). Minsk: Research Institute of ME and R, 2010, 430 p. (in Russian)
16. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Information technology for forming a personal movement rehabilitation plan after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2020, № 3 (201), pp. 87–99.
17. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Mobile AI-technology for forming the personalized movements rehabilitation plan after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021, № 4 (206), pp. 73–88.
18. Vovk M.I., Kutsyak O.A. AI-technology of motor functions diagnostics after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021, № 2 (204), pp. 84–100.

Received 24.03.2021

Vovk M.I., PhD (Biology), Senior Researcher,  
Head of Bioelectrical Control & Medical Cybernetics Department  
ORCID: 0000-0003-4584-9553, e-mail: vovk@irtc.org.ua; imvovk3940@gmail.com

Kutsiak O.A., PhD (Engineering),  
Senior Researcher of the Bioelectrical Control & Medical Cybernetics Department  
ORCID: 0000-0003-2277-7411, e-mail: spirotech85@ukr.net  
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,  
the Department of Complex Research of Information Technologies,  
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

## INFORMATION TECHNOLOGIES FOR MUSCLE FUNCTIONS CONTROL. RETROSPECTIVE ANALYSIS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

**Introduction.** *The research on muscle functions control is determined not only by scientific interest but also by practical necessity.*

**The purpose of the paper** is to conduct a retrospective analysis of the synthesis of information technologies for the control of human muscle functions for their recovery, correction or training.

**Results.** *The evolution of the synthesis of high technologies for muscle functions control with the purpose for recovering, correcting or training them on the basis of external control circuits is presented. Information and energy signals of myostimulation play the role of these loops. The signals come from electronic software devices or information software and hardware complexes. The main classes of the first generation of such devices, namely an open one ("MIOTON"), adaptive ("MIOSTIMUL"), and modern "TRENAR" are considered. The devices contain a set of basic software modules for activating the patient's reserves to recover muscle activity depending on the motor functions state and the patient's general state. The new patented technology for oral speech recovery after stroke based on training the fine motor skills of the hand is considered. The new information technology of digital medicine "AI-REABILITOLOG" is presented. To aid a user (physician) in making diagnostic and treatment decisions on rehabilitation of motor and speech functions the technology uses artificial intelligence tools: specialized software modules for creating a personalized training plan of extremities, fine motor skills of the hand, in particular for oral speech and gait recovery based on the quantitative assessment of these disorders. The results of practical application, the advantages of the developed information technologies are presented. The prospects for their development are considered.*

**Conclusions.** *The main principles for synthesis of high technologies for muscle functions control in order to recover, correct or train them on the basis of external control circuits are a combination of physical and cognitive influences, active participation of a person in training procedures and their self-control.*

**Keywords:** *information technologies, control, myostimulation devices, movements, speech, rehabilitation, stroke, personalized quantitative assessment, criteria, artificial intelligence, software module, structural and functional model*