

УДК 004-94; 615-8; 616-08-059; 616-08-07; 616-7

О.П. КУРГАЄВ*

АРХІТЕКТУРА СИСТЕМ РЕАБІЛІТАЦІЇ З БІОЛОГІЧНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

* Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Неінвазивність, нетоксичність, надійність і ефективність роблять системи реабілітації з біологічним зворотним зв'язком (БЗЗ) найбільш перспективними для вдосконалення. Досліджено структури переважної більшості систем реабілітації з біологічним зворотним зв'язком та запропоновано досконалішу. Технічна сутність методу БЗЗ полягає в комп'ютерній реєстрації певних фізіологічних показників, не доступних для безпосереднього сприйняття людьми, та їх перетворенні у форму, зрозумілу людям. Оскільки усі системи організму безпосередньо підпорядковані регуляторному впливу центральної нервової системи, перспективнішим різновидом БЗЗ є нейробіоуправління самонавчанням власного мозку. Загальна схема BCI (Brain-Computer-Interface) містить енцефалограф, чий входи з'єднано зі скальпом пацієнта, а виходи підключено до комп'ютера, з'єднаного з керованим пристроєм. За допомогою artificial intelligence додатки BCI значно розширено, включно керування курсором, слухові відчуття, керування кінцівками, пристрої правопису, соматичні відчуття й візуальні протези. Національним центром адаптивних нейротехнологій реалізована програмна система BCI2000 для фундаментальних і клінічних нейрофізіологічних досліджень взаємодії мозку з комп'ютером. Підсумково, всі відомі реалізації і використання БЗЗ у медичній реабілітації не відповідають сучасним тенденціям створення уніфікованих, портативних і безпечних реабілітаційних систем нового покоління, застосованих не лише в медичних закладах, але й у побуті. Для кардинального вирішення цієї проблеми запропоновано нову структуру апаратно-програмного комплексу реалізації вдосконаленого БЗЗ-способу реабілітації людей із обмеженими можливостями. Вдосконала БЗЗ-процедура складається із трьох етапів: вводу і накопичення знань в області реабілітації, постановки задачі персональної реабілітації, пошуку розв'язку цієї задачі.

Ключові слова: реабілітація, біологічний зворотний зв'язок, нейробіоуправління, переваги БЗЗ-терапії, структури реалізації БЗЗ, недоліки реалізації БЗЗ.

Abstract. Non-invasiveness, non-toxicity, reliability, and efficiency make the systems with biological feedback (BF) the most promising for improvement. The structures of the vast majority of BF-systems have been studied and the most advanced one has been proposed. The technical essence of the BF-method lies in the computer registration of certain physiological indicators that are not available for direct human perception and their transformation into a form understandable to people. Since all systems of the human organism are directly subject to the constant influence of the central nervous system, the most promising type of BF is neurobiocontrol of self-learning of your own brain. The general BCI (Brain-Computer-Interface) scheme contains an encephalograph whose inputs are connected to the patient's scalp and the outputs – to a computer connected to a controlled device. Using AI, BCI options are greatly expanded to include cursor control, auditory sensations, limb control, spelling devices, somatic sensations, and visual prostheses. The National Center for Adaptive Neurotechnologies has developed the BCI2000 software system for fundamental and clinical neurophysiological studies of brain-computer interaction. As a result, all existing implementations and applications of BF-based systems for medical rehabilitation do not meet modern trends of creating unified, portable and safe new generation rehabilitation systems which can be used not only in medical institutions but also at home. To cardinally solve this problem, a new structure of the hardware and software complex for the implementation of the advanced BF-method of rehabilitation of people with disabilities has been suggested. The improved BF-procedure consists of three steps: entering and accumulating knowledge in the rehabilitation field, setting personal rehabilitation goals, and searching for a solution to these goals.

Keywords: rehabilitation, biological feedback, neurobiocontrol, advantages of BF-therapy, structures of BF realization, disadvantages of BF realization.

1. Вступ

Медична реабілітація включає лікувальне харчування, клімато- і бальнеотерапію, лікувальну фізкультуру (кінезотерапію або фізичну реабілітацію), фізіотерапію, рефлексотерапію, фітотерапію, гомеопатію у стаціонарних або амбулаторних умовах [1, 2].

Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, ефективність усіх відомих способів медичної реабілітації залишається незадовільною через неефективні механізми надання послуг реабілітації [3].

Неінвазивність, нетоксичність, надійність і ефективність підвищують затребуваність біологічного зворотного зв'язку (БЗЗ) та роблять БЗЗ-методи найбільш перспективними при лікуванні багатьох хронічних захворювань в області неврології, кардіології, урології, гастроентерології, геріатрії, педіатрії та в реабілітаційній і превентивній медицині.

Метою статті є аналіз основних ознак реалізації процесів реабілітації з використанням БЗЗ та пропозиції щодо їхнього вдосконалення.

2. Принципи саморегуляції

В організмі людини виділяють множину фізіологічних систем, наприклад:

- з 12-ти складових: сенсорну, травну, дихальну, серцево-судинну (кровоносну), видільну, статеву, опорно-рухову, нервову, ендокринну, покривну, імунну, систему крові [4];
- з 10-ти складових: опорно-рухову, нервову, серцево-судинну, дихальну, травну, видільну, репродуктивну, ендокринну, імунну, покривну [5, 6];
- з 9-ти складових (рис. 1): опорно-рухова, травну, дихальну, кровоносну, сенсорну, ендокринну, видільну, статеву, нервову [7].

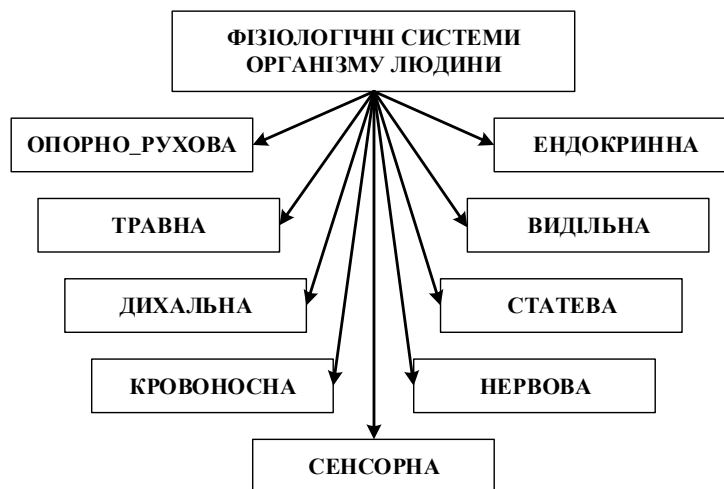


Рисунок 1 – Фізіологічні системи організму людини

Всі фізіологічні системи організму людини взаємозв'язані між собою і навколишнім середовищем, забезпечуючи життєздатність усього організму.

Основною властивістю живих систем є здатність до саморегуляції створенням оптимальних умов взаємодії всіх елементів організму й забезпечення його цілісності, керуючись такими базовими принципами [8].

1. Принцип нерівноважності – це властивість живих систем підтримувати динамічний нерівноважний стан, асиметрію щодо навколишнього середовища.

2. Принцип замкнутості контуру регулювання. Кожен організм не лише реагує на збудник, а ще й оцінює відповідність реакції діючому подразнику. Принцип здійснюється позитивним і негативним зворотним зв'язком.

3. Принцип прогнозування. Біологічні системи здатні прогнозувати результат відповідної реакції на основі минулого досвіду.

4. Принцип цілісності. Для нормального функціонування живої системи потрібна її структурна цілісність.

Гомеостаз – сталість внутрішнього середовища (крові, лімфи, тканинної рідини). Це стійкість фізіологічних функцій організму. Чим вища організація живої істоти, тим вона незалежніша від зовнішнього середовища.

Гомеокінез – комплекс фізіологічних процесів забезпечення гомеостазу. Параметри гомеостазу є динамічними і у нормальних межах змінюються під впливом зовнішнього середовища. Живі системи не лише врівноважують зовнішні впливи, а й активно їм протидіють. Порушення гомеостазу призводить до загибелі організму. БЗЗ, у світі відомий як «biofeedback», – це методика реабілітації, базована на розвитку і вдосконаленні самоконтролю і саморегуляції фізіологічних функцій при різних патологічних станах організму пацієнта, чия мета – поліпшення стану здоров'я.

3. Сутність біологічного зворотного зв'язку

БЗЗ-терапія – це процедура безперервного моніторингу в режимі реального часу певних фізіологічних показників і свідомого управління ними за допомогою мультимедійних, ігрових та інших прийомів у заданій області значень.

Технічна сутність методу БЗЗ полягає в комп'ютерній реєстрації в режимі реального часу певних фізіологічних показників, не доступних для безпосереднього сприйняття людьми (електроенцефалограми, електричний опір шкіри, число серцевих скорочень, температура тіла та ін.), та їхнього перетворення у форму, явну для людей [9].

БЗЗ є немедикаментозним методом лікування, користуючись засобами реєстрації й демонстрації пацієнтові інформації про роботу його внутрішніх органів і систем згідно з даними біоелектричної активності головного мозку, серця, м'язів, органів подиху.

Метод БЗЗ – це різновид навчання, який забезпечує довільну регуляцію багатьох фізіологічних показників. Поряд із МРТ, УЗІ, цифровим рентгенологічним дослідженням і аналізом крові, найбільш доступними для широкої клінічної практики інформативними критеріями є способи оцінки стану хворого за змінами фізіологічних показників (рис. 2): біоелектричних потенціалів головного мозку, параметрів подиху, температури й електричного опору шкіри, ступеня напруги м'язів, частоти й ритму серцевих скорочень (спектральний аналіз ритму серця), гальванічного шкірного рефлексу, збудливості ЦНС, імпедансометрії, вмісту у крові гормонів кори надниркової залози, мікроелементів у волоссях [10].

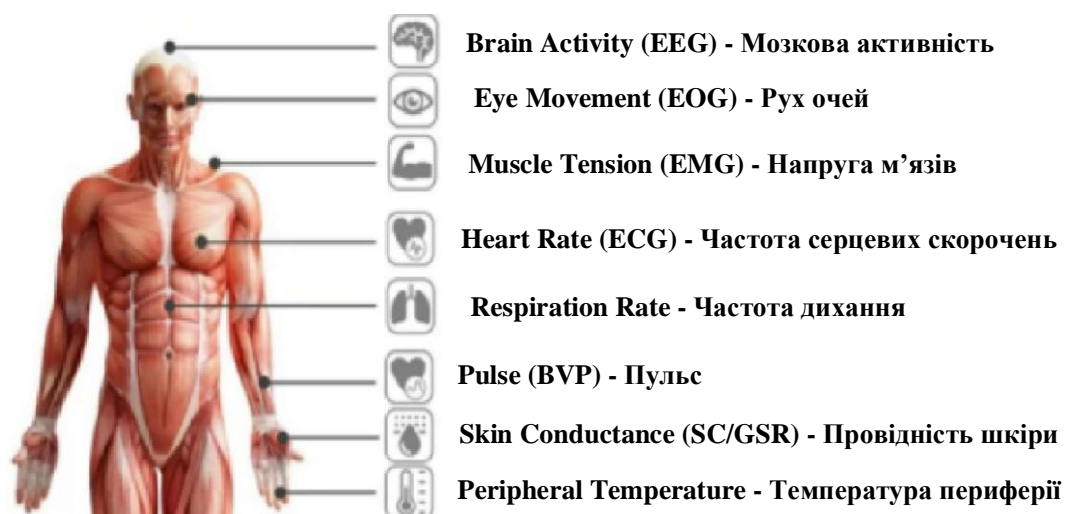


Рисунок 2 – Фізіологічна активність [10]

Метод ґрунтується на перекладі інформації з форми електричних фізіологічних сигналів, одержуваних від тіла людини за допомогою спеціальних датчиків, в інформацію зворотного зв'язку у формі зображень, природномовних повідомлень, мультимедійних, ігрових та інших форм інформаційної та матеріальної взаємодії в заданій області значень.

Діагностична складова медичної реабілітації дозволяє оцінити порушення показників гомеостазу, виставити реабілітаційний діагноз, обґрунтувати лікування.

Основна мета методу БЗЗ полягає як в усвідомленні звичайно неусвідомлюваних процесів, так і керуванні фізіологічними процесами: спочатку шляхом контролю зовнішніх сигналів, а потім – шляхом свідомого регулювання внутрішнього фізіологічного стану.

Класична модель БЗЗ припускає, що інформація про стан фізіологічної системи-мишені, стаючи доступною пацієнтові, загострює сприйняття самих симптомів порушення функціонування й дозволяє пацієнтові контролювати виконувану роботу, формувати стратегію поведінки, здатну для усунення цих симптомів. Самі думки, мотивація, терапевтичні очікування пацієнта, які виникають у процесі БЗЗ, приводять до зміни симптому [10].

4. Впровадження БЗЗ-терапії

Biofeedback включена в перелік методів лікування, офіційно застосовуваних у медичній реабілітації в Європі поряд з іншими, добре відомими методами. БЗЗ-терапія розглядається зараз як один із методів терапії, впровадження якого в медицину тієї ж значущості, що й «третя терапевтична революція» [11].

БЗЗ-методи лише в США впроваджені більш ніж у 700 клінічних центрах.

БЗЗ-технології з успіхом використовують в Україні:

- клініка сучасної фізіотерапії й реабілітації [12];
- клініка АТОС [13];
- центр сімейної медицини «Ваш Лікар» [14];
- компанія «Сіата» [15].

Відомими щодо використання БЗЗ-технології в РФ є:

- компанія «Науково-Виробничий Центр «Ін Вітро» [16];
- центр відбудовного лікування «Альтернатива+» [17];
- національний медичний дослідний «Центр Здоров'я Дітей» [18];
- багатопрофільна клініка «МедикСіті» [19];
- Уральський центр реанімаційної нейрореабілітації Клінічного інституту мозку

[20].

5. Різноманітні способи БЗЗ-реабілітації

Метод БЗЗ переважно використовується у трьох основних напрямках [9]:

- регуляція рухових функцій по параметрах ЕМГ (електроміограма);
- регуляція вегетативних функцій по параметрах ЧСС (частота серцевих скорочень), ЧД (частота дихання), ШГР (шкіро-гальванічна реакція), ЕМГ, температура тіла тощо;
- регуляція біоелектричної активності мозку по параметрах ЕЕГ (електроенцефалограма).

Спосіб функціональної психофізіологічної корекції стану людини й діагностики у процесі корекції реалізує комплекс [21] проведення тренінгу, чия сутність у візуальному поданні пацієнтові його власної кардіоритмограми у реальному часі, при тому, що пацієнт аналізує свою кардіоритмограму й синхронізує свої дихальні рухи з коливаннями власного серцевого ритму: при підвищенні частоти серцевих скорочень здійснює вдих, а при зниженні частоти серцевих скорочень – видих. Така синхронізація (тренінг із БЗЗ кардіореспіраторної системи, кардіореспіраторний БЗЗ-тренінг) приводить до релаксації пацієнта.

Корекцію функціонального стану людини реалізує й спосіб [22], виконуючи синхронізацію дихальних рухів із коливаннями власного серцевого ритму. Команди вдиху-видиху людини формує мікроконтролер на основі аналізу поточної кардіоінтервалограми таким чином, що команда на вдих видається при реєстрації максимуму кардіоінтервалограми, а команда на видих – при реєстрації мінімуму кардіоінтервалограми.

Широко відомим є спосіб корекції порушень зору за допомогою БЗЗ, захищеного патентами [23, 24]. Згідно з цим способом компанією НВЦ «Ін Вітро», офіційним представником якої в Україні є патентно-аналітичне агентство ФОРСАЙТ [25], вироблено комплекси сімейства «Амбліокор ТМ», які поєднують у собі високу клінічну ефективність, надійність, простоту в експлуатації та широко застосовуються в медичній реабілітації.

Незважаючи на суттєві успіхи, традиційна БЗЗ-терапія далеко не завжди ефективна навіть у тих випадках, коли вдається виконати завдання лікувального протоколу. Це обумовлене тим, що як кінцева мета БЗЗ використовуються параметри, які є недостатніми для нормалізації порушеної функції.

Більш ефективним способом реабілітації постінсультних і посттравматичних хворих є винахід [26] за рахунок додаткової інтенсифікації моторних областей кори головного мозку сигналами соматосенсорної системи, які виникають при пасивному виконанні уявлюваного руху екзоскелетом паретичної кінцівки. Реабілітаційна процедура способу патента [26] включає проведення тренувань паретичної кінцівки:

- пред'явлення пацієнтові завдання по кінестетичній уяві руху кінцівки;
- аналіз паттернів мозкової активності пацієнта, які виникають при уяві руху;
- інформування пацієнта по БЗЗ про результат виконання ментального завдання.

Це включає в процедуру реабілітації БЗЗ із контролем активації моторних областей мозку, відповідних цілеспрямованим рухам у хворих зі значними руховими порушеннями.

6. Нейробіоуправління – особливий різновид біологічного зворотного зв'язку

БЗЗ і нейробіоуправління включають різні процеси лікування [27]:

- БЗЗ обмежується контролем і керуванням показниками фізіологічних процесів (такими, як подих, частота серцевих скорочень, м'язові скорочення, температура тощо), інформуючи організм про його функціонування й дозволяючи йому певні зміни для поліпшення здоров'я;

- нейробіоуправління контролює лише один процес – електричну активність у головному мозку. БЗЗ не включає тренування мозку в будь-якій формі, тоді як першочергове завдання нейробіоуправління – навчати мозок функціонувати ефективніше, використовуючи оперантне кондиціонування. (Кондиціонування операнта – це процес навчання шляхом підкріплення та покарання: поведінка посилюється або послаблюється, виходячи з наслідків цієї поведінки [28]);

ЕЕГ-БЗЗ є найперспективним видом біоуправління із зворотним зв'язком, оскільки:

- усі системи організму безпосередньо підпорядковані регуляторному впливу ЦНС;
- за допомогою методу БЗЗ є можливість цільової перебудови самих різних параметрів ЕЕГ (потужності окремих ритмів, їхньої частоти, характеру часової послідовності хвиль ЕЕГ, просторової локалізації зазначених зрушень тощо);

- цілеспрямована перебудова ритмів мозку за допомогою ЕЕГ-БЗЗ супроводжується специфічними змінами поведінки й стану ЦНС індивіда;

- відкриває перспективу безпосереднього самонавчання діяльності власного мозку.

Крім того, ЕЕГ є високоінформативним методом, який випереджає динаміку інших фізіологічних показників, а також з технічної точки зору, ЕЕГ-сигнал відносно легко перетворюється в дискретну форму для інформування про динаміку нервових процесів [10].

6.1. Приклади реалізації способів нейробіоуправління

Відомо, що повторювання активних цілеспрямованих рухів сприяє відновленню рухових функцій та при кінестетичній уяві рухів активуються практично ті ж області мозку, що й при здійсненні рухів [29]. Поєднання активації моторних областей мозку за посередництвом уяви рухів із контролем ступеня цієї активації складає основу БЗЗ-технології для реабілітації постінсультних і посттравматичних хворих.

Відомим є спосіб біоакустичної корекції психофізіологічного стану організму [30], який включає реєстрацію ЕЕГ від двох і більше точок відведення ЕЕГ, установлення однозначної відповідності між просторовим розташуванням точок реєстрації ЕЕГ і джерелами звуку, транспонування кожного коливання ЕЕГ окремо й послідовно у звуковий діапазон частот, одночасний вплив отриманими звуковими сигналами на пацієнта. Недоліком цього способу є, по-перше, те, що відсутнє узгодження часу реєстрації коливань ЕЕГ пацієнта з часом початку впливу на нього відповідними сенсорними сигналами. По-друге, те, що транспонування сигналу ЕЕГ у чутний діапазон звукових частот не є оптимальним способом узгодження параметрів ЕЕГ і сенсорного сигналу. При транспонуванні сигналу ЕЕГ в область чутних частот переміщують гармоніки вихідного сигналу по шкалі частот із збереженням тільки вихідних співвідношень амплітуд, частот і фаз сигналу ЕЕГ в акустичному сенсорному сигналі. По-третє, в даному способі створюють сенсорні сигнали тільки акустичної модальності, що обмежує область застосування методу контингентом пацієнтів із неушкодженим слухом. По-четверте, спосіб транспонування частот неприйнятний при створенні сенсорних сигналів зорової й тактильної модальностей.

Спосіб [31] класифікації ЕЕГ сигналів у ВСІ (Brain-Computer-Interface) полягає в:

- тестуванні пацієнта;
- виділенні інформаційних компонентів із загального просторово-часового паттерна;
- створенні вибірки оцифрованих фрагментів ЕЕГ на множині відведень для навчання класифікатора;
- обчисленні вагових коефіцієнтів і класифікації фрагментів ЕЕГ для ідентифікації класів уявних команд пацієнта, відповідних до керуючих сигналів.

Винахід належить, зокрема, до області комунікації мозку людини з комп'ютером і призначений для ЕЕГ реєстрації, аналізу й інтерпретації сигналів головного мозку для керування зовнішніми виконавчими пристроями, наприклад, курсором «миші» на екрані монітора, інвалідною коляскою або спеціалізованими протезами і може бути використаний у медичній діагностиці, операторській діяльності, у системах безпеки, індустрії розваг.

У ВСІ-системах вимірюють ЕЕГ-сигнали й вибирають необхідні ділянки, тоді як пацієнт уявляє різні рухи, наприклад, рухи лівою або правою рукою. Як специфічні параметри біопотенціалів мозку у відомих системах ВСІ використовують мю, альфа й бетаритми мозку й викликані потенціали (Event Related Potentials – ERPs).

Загальна схема ВСІ містить портативний енцефалограф, чий вихід з'єднано електродними зі скальпом пацієнта, а виходи підключено до комп'ютера, чий вихід з'єднано з керуванням пристроєм (наприклад, інвалідною коляскою).

Апаратно-програмний комплекс ВСІ перетворює електричну активність мозку – імпульсну й сумарну – в конкретну дію без усякої участі тіла людини. Користуючись ВСІ, повністю паралізована людина може стати активним членом соціального середовища, можливо, виконувати певні завдання, брати повноцінну участь у суспільному розподілі праці.

Спосіб [32] поєднує активацію моторних областей мозку за допомогою уяви рухів із контролем ступеня цієї активації по БЗЗ. Цей спосіб включає тренування паретичної кінцівки, яку проводять, пред'являючи хворому завдання по уяві її руху, з наступним контролем паттернів ЕЕГ, які виникають при виконанні зазначеного завдання. Реєстрацію ЕЕГ здійснюють системою активних електродів, розміщених на поверхні голови. Дані ЕЕГ об-

робляють у реальному часі з виділенням сигналів, відповідальних за уявний рух, за допомогою класифікатора паттернів ЕЕГ по методу Байеса. Результати розпізнавання виконаного ментального завдання пред'являють пацієнтові по зоровому зворотному зв'язку з підтвердженням на екрані монітора правильності виконання завдання.

Це дозволяє включати у процедуру рухової БЗЗ реабілітації аналіз активності мозку при уяві рухів і тим самим направлено контролювати активацію моторних областей, відповідальних за цілеспрямовані рухи хворих зі значними руховими порушеннями.

6.2. Сутність реалізації способів нейробіоуправління

Нейробіоуправління використовують принаймні трьома основними способами [33]:

- як терапевтичний інструмент для нормалізації хибної мозкової активності пацієнтів;
- як тренінг для поліпшення когнітивних функцій здорових людей;
- як експериментальний метод дослідження причинної ролі певних нейронних подій для пізнання й поведінки.

Розрізняють п'ять елементів конвеєра обробки нейробіоуправління [33]:

1. Збір даних сигналів мозку з використанням ЕЕГ, магнітоенцефалографії (МЕГ) та частіше - функціональної магнітно-резонансної томографії з високим просторовим дозволом (МРТ) і близької інфрачервоної спектроскопії (NIRS).

2. Попередня обробка даних у режимі онлайн і основне завдання на цьому етапі – виявлення й відхилення або виправлення артефактів (найпоширенішими є артефакти очей і м'язів).

3. Вибір і витяг характеристик, обчислених на основі активності мозку, які використовуються під час нейробіоуправління; звичайно ці особливості являють собою той паттерн мозкової активності, який потрібно модулювати. Це може просто означати вибір певної смуги частот ЕЕГ, яка відповідає «робочій мові» мережі мозку, пов'язаної із конкретною когнітивною функцією.

4. Генерація сигналу зворотного зв'язку перетворенням характеристики витягнутої ознаки в сенсорний стимул, який може бути поданий і оброблений учнем. Отже, сигнал зворотного зв'язку вказує стан активності цільової системи або процесу мозку стосовно критерію й сигналізує, коли цільова характеристика або особливість активності мозку відповідає певному порогу або стану.

5. Учень бере активну участь, постійно застосовує й адаптує стратегії для зміни своєї мозкової активності в заданому напрямку.

Відомо, що певним станам свідомості відповідає певний спектр ЕЕГ активності головного мозку (рис. 3). Коли людина стурбована, зла, роздратована, подавлена, пригнoblена, сумна чи занурена у депресію, це відбивається у спектрі хвиль ЕЕГ [34]. Люди з адиктивною поведінкою постійно переживають психічний дискомфорт, відчувають дефіцит позитивних емоцій, потребу зниження тривоги й розрядки своїх агресивних спонукань.

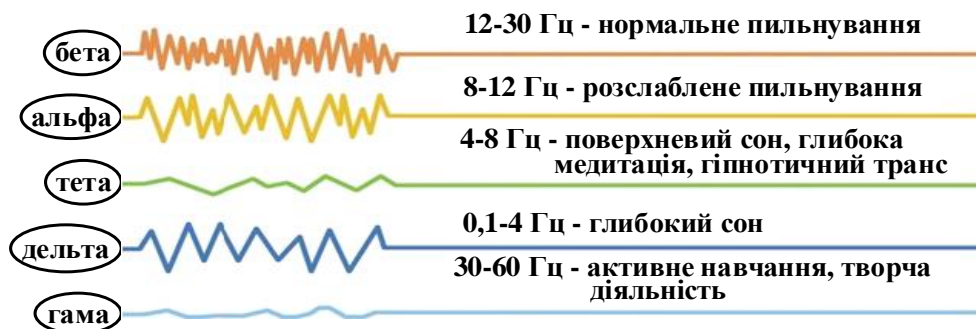


Рисунок 3 – Спектр ЕЕГ активності головного мозку

Основними методами БЗЗ-терапії по ЕЕГ у даний час є альфа-тренінг, бета-тренінг, тета-тренінг і терапія сенсомоторного ритму (SMR) [35].

БЗЗ-альфа-тренінг/терапія використовується при терапії психосоматичних, невротичних, депресивних та ін. порушень, зв'язаних зі змінами процесів мозку.

БЗЗ-тета-тренінг/терапія. Робота [36] показала, що позитивний результат БЗЗ-терапії за схемою альфа/тета-протоколу групи хронічних алкоголіків через 3 роки спостереження склав 80 %.

БЗЗ-бета-терапія ефективна при різних синдромах порушення уваги й гіперактивності [37], постінсультних порушеннях (спастичність, парези, плегії), посттравматичних синдромах, коматозних станах [38] та ін.

БЗЗ-SMR-терапія. [39] показала, що БЗЗ-підсилення сенсомоторного ритму ЕЕГ підвищує поріг судорожної готовності й тим самим зменшує частоту й виразність судорожних випадків при різних епілептичних синдромах аж до їхнього повного припинення [38].

Незважаючи на успіхи розробки ВСІ на основі ЕЕГ для широкого застосування (зокрема, управління інвалідними колясками, написання слів чи маніпуляції із протезами) в житті людей з обмеженими можливостями, багато проблем усе ще вимагають розв'язку. Перш за все, необхідно підвищити точність класифікації і скоротити навчання. Розпізнавання декількох класів із високою точністю, як і раніше, залишається дуже складним завданням. Нарешті, щоб підвищити надійність і безпеку, повинні бути розроблені належні методи спільного керування, які поєднують команди ВСІ і роботизованих механізмів [40].

7. Поєднання ВСІ з АІ

ВСІ на основі artificial intelligence (AI) – це область міждисциплінарної інтеграції медицини, нейробіології й інженерії, яка швидко розбудовується. Мета цих систем – поліпшити якість життя людей із паралічем, травмою спинного мозку, ампутацією, придбаними захворюваннями, сліпотою, глухотою, порушенням пам'яті, іншими неврологічними розладами. З'являється також можливість поліпшити нормальну моторну, сенсорну або когнітивну функцію.

Комбінація ВСІ і штучного інтелекту пропонує дослідження і реалізацію знань і контролю безпосередньо нейронів мозку, які допоможуть вченим більше довідатись про людський мозок і сприятимуть розвитку реабілітаційної медицини.

Поєднання ВСІ з АІ дозволяє використовувати електричні сигнали мозку для керування зовнішніми пристроями. Безпосередня взаємодія комп'ютера з ЦНС може забезпечити для людей з нейродегенеративними захворюваннями незалежний від м'язів канал зв'язку з дійсністю. Ці «розумні» ВСІ виявили помітний клінічний успіх, поліпшили якість життя паралізованих пацієнтів, розширили спортивні можливості звичайних людей і прискорили еволюцію роботів [41, 42].



Рисунок 4 – Керування курсором за допомогою АІ

За допомогою АІ додатки ВСІ були значно розширені, включаючи керування курсором (рис. 4), слухові відчуття, керування кінцівками, пристрої правопису, соматичні відчуття й візуальні протези.

Використання комбінації ВСІ з АІ виглядає таким чином:

- від кори головного мозку людини компоненту АІ передають такі параметри сигналів життєдіяльності ЦНС, як тривалість і амплітуда імпульсів, частота стимуляції, споживання енергії пристроєм, щільність стимуляції або реєстрації й електричні властивості нервових тканин [43];
- засобами АІ виділяють і класифікують семантично значимі ознаки сигналів;

- оброблені сигнали далі використовують для виконання цільових функцій перетворення дійсності;
- нарешті, у головний мозок передається зворотний зв'язок для коректування функції.

Основні компоненти ВСІ керування курсором включають датчик для запису нейронних сигналів, декодер для інтерпретації намірів руху й комп'ютерний курсор, який взаємодіє з зовнішнім середовищем [44].

Реалізація двовимірного руху курсора на екрані використана для управління рухом кінцівки робота [45] і розвинута до управління складнішою поведінкою, такою, як схоплення, самопідтримка, бімануальна поведінка руху рук тощо [46, 47]. Крім того, розроблено безліч терапевтичних стратегій, щоб допомогти пацієнтам з інсультом відновити деяку функцію ураженої кінцівки. Ця технологія працює шляхом імплантації електродів або в моторну кору людини, або в ту область мозку, яка бере участь у плануванні й виконанні рухів. Використання імплантованих електродів дозволяє пацієнтам контролювати рухи з декількома ступенями свободи, допомагаючи їм робити складніші й функціональні рухи.

Дослідники розробили множину видів віртуальних клавіатур (включаючи керовані жестами) з ефективними можливостями введення тексту [48]. Такі пристрої інтерпретують нейронну активність, яка відбувається, коли люди мовчки виголошують слова, а потім використовують цю інформацію для генерації синтезованих мовних звуків [49].

Активно розбудовується і використовується технологія Eye-tracking (або окулографія) – технологія відстеження положення ока, також названа технологією відстеження ліній погляду або точок погляду [50, 51].

Умовно, айтрекери залежно від застосування можна поділити на 3 групи:

- ігрові пристрої. Найпоширеніші, відносно прості й доступні;
- професійні пристрої. Використовуються в нейромаркетингу, нейромедичних дослідженнях, спорті, освіті, науці, професійній підготовці пілотів, водіїв та ін.;
- реабілітаційні (абілітаційні) айтрекери допомагають людям з особливими потребами управляти комп'ютером очима (набирати текст, користуватись інтернетом, спілкуватись у соціальних мережах та ін.) без сторонньої допомоги. Повністю замінюють клавіатуру й «мишу», виправдане використання в системах реабілітації, зокрема, у випадках діагнозів: дитячий церебральний параліч; спинальна м'язова атрофія; синдром Ретта; травми хребта; черепно-мозкові травми; інші захворювання, пов'язані з порушенням мови й/або рухових функцій.

Звичайно, ми дивимось на об'єкт, коли збираємось маніпулювати ним. Таким чином, відстеження погляду можна використовувати для повідомлення про передбачувані дії. Інтерфейси на основі злиття погляду (Eye-tracking) спільно з ВСІ (ЕВСІ) дозволяють здійснювати взаємодію людини з комп'ютером без допомоги рук [52].

Пильний погляд – природний засіб для вираження намірів у соціальних взаємодіях і видається природним користуватись ним і у взаємодії з комп'ютерами. ЕВСІ на основі затримки погляду може стати інструментом для плавного перетворення намірів у дії без будь-якої участі рухової системи. В ідеалі такому ЕВСІ від користувача достатньо простого погляду й бажання діяти.

Усе більша увага приділяється нейрофізіологічним методам, які дозволяють детектувати когнітивні порушення на функціональному рівні задовго до того, як вони стануть помітними оточенню або самому хворому. Так, нейрофізіологічні дослідження показали, що зміни в реакціях мозку на звуковий стимул дозволяють із високою точністю детектувати ризик розвитку хвороби Альцгеймера (ХА) протягом наступних 10 років.

Інший перспективний метод роботи з Альцгеймером – це віртуальна реальність (VR). Головна перевага VR – це свобода у створенні будь-яких умов оточення й керування!

Наприклад, до появи перших симптомів ХА вченим удалося добитися найвищої точності у діагностиці захворювання за результатами проходження завдань у віртуальному музеї.

Широко вивчається метод AI для діагностики хвороби Альцгеймера за даними МРТ.

Незважаючи на те, що об'єднання BCI, VR і AI виглядає дуже привабливим, поки що зовсім небагато досліджень комплексних систем з ознаками цих методів. Недавно компанія Impulse Neiry розпочала розробку швидкого, зручного й ефективного методу діагностики ХА, помірних когнітивних порушень, деменції й порушень окремих когнітивних функцій на ранніх етапах, а також методу тренінгу для підтримки рівня когнітивних і рухових функцій при наявності захворювання. У планах є створення цікавого ігрового контенту для діагностики, моніторингу й реабілітації як в медичних центрах, так і в домашніх умовах [53].

8. Етичні проблеми використання нейротехнології

Застосування ЕЕГ-методів надзвичайно різноманітно і невпинно зростає. Порівняно з іншими неінвазивними методами ЕЕГ забезпечує безпеку, портативність, часовий дозвіл і економічну ефективність. Технології, що поєднують мозок із комп'ютерами, допомагають людям вже протягом десятиліть. Із ростом їхньої складності зростають і етичні проблеми їх використання. Серед етичних проблем найчастіше розглядають [54] такі.

Безпека й баланс ризику-користі. Основні побоювання пов'язані з негативними бічними ефектами щодо пластичності мозку при тривалому застосуванні пристроїв ЕЕГ і невідомими наслідками їхнього видалення. Відмови й помилки пристроїв можуть поставити користувачів у небезпечні ситуації із зростанням залежності від технологій.

Оскільки ЕЕГ вважається по своїй суті ризикованою технологією, яка може призвести до негативних соціальних наслідків, необхідні подальші дослідження прийнятних очікувань відносно користі й ризику.

Сприяння. Допоміжні технології можуть привести до розширення прав і можливостей користувачів, забезпечать їм більшу незалежність у взаємодії зі своїм оточенням, що веде до більш високих стандартів автономії й людської гідності. З іншого боку, використання BCI може привести до порушення самосвідомості.

Особистість. Переважна більшість вважає, що нейротехнології можуть порушити фізичну й психічну цілісність людини, зв'язуючи основні побоювання з інвазивним BCI. Наприклад, у ряді досліджень повідомлялося про зміни особистості або поведінки, які призводять до імпульсивності, гіперсексуальності, манії й азартних ігор.

Досконалість. Розробка складних технологій, які значно поліпшують людський інтелект і фізіологію, може змінити умови життя людини. Нерівний доступ до технологій може збільшити соціальну компетентність і несправедливість серед колег, тим самим породжуючи нові форми дискримінації.

Конфіденційність і захист даних. Пристрої ЕЕГ можуть розкривати різну інформацію про фізичну особу, починаючи від здоров'я й психічних захворювань і розладів, закінчуючи психологічними особливостями й психічними станами. Інформація мозку, ймовірно, найтаємніша й конфіденційніша з усієї інформації суспільства.

Збережені нейронні дані можуть бути украдені хакерами або використані неналежним чином компаніями, яким надано доступ. Щоб запобігти цьому, етика має бути інтегрована в початкові етапи проектування й розробки таких технологій, щоб максимізувати її переваги та мінімізувати їхню потенційну шкоду. Але втручання в мозок із благими намірами не завжди вітається. Соціальні норми вимагають, щоб фундаментальна межа між особистим мисленням і зовнішньою поведінкою була захищена [55].

9. Дослідження адаптивної нейротехнології

Установлено, що нейропластичність лежить в основі навчання, пам'яті; процес нейропластичності забезпечує функціонування мозку як високодинамічної структури протягом усього життя індивідууму. Нейропластичність виявляється на всіх рівнях організації нервової системи, вона охоплює весь мозок і визначає його поведінку.

Фокусом в області технічних досліджень і розробок Національного центру адаптивних нейротехнологій (NCAN) є адаптивні системи, які взаємодіють із ЦНС у режимі реального часу, для виконання трьох важливих проєктів [56]:

Проект 1 – Орієнтир по корисній пластичності.

Проект 2 – Мозок-комп'ютерний інтерфейс (BCI) – База реабілітації.

Проект 3 – Характеристика й зміна коркових процесів.

Ці три дослідницькі проєкти включають широкий спектр різних підходів, які можна згрупувати в п'ять дослідницьких областей залежно від того, як вони використовують адаптивні нейротехнології для допомоги людям.

Область досліджень 1 – Заміна втрачених здатностей, таких, як орфографія.

Область досліджень 2 – Відновлення втрачених функцій, таких, як хапання.

Область досліджень 3 – Поліпшення функцій, таких, як рух верхньої кінцівки.

Область досліджень 4 – Поліпшення природних функцій, наприклад, за допомогою виявлення помилок.

Область досліджень 5 – Доповнення природної функції такою, як «третя рука».

NCAN розробив ядро фізіологічних, поведінкових, анатомічних і клінічних методів взаємодії із ЦНС і застосував ці методи в дослідженнях реабілітаційної практики [57].

Грунтуючись на цих досягненнях, NCAN узагальнив і активно підтримує розвинену систему BCI2000 для фундаментальних і клінічних нейрофізіологічних досліджень взаємодії мозку з комп'ютером, яка у формі системи замкненого циклу (рис. 5) включає такі засоби: для збору й обробки даних у реальному часі, представляти стимули й зворотний зв'язок, а також управляти взаємодією з зовнішніми пристроями, такими, як роботизовані руки [58].

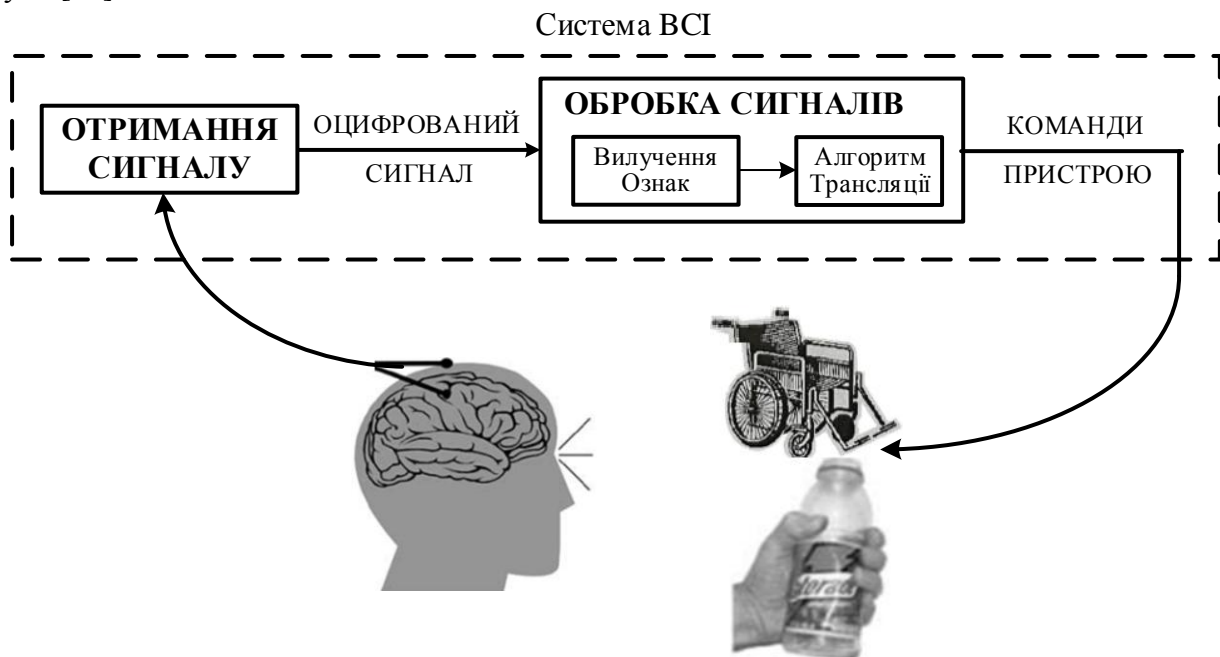


Рисунок 5 – Загальна структура BCI системи

З точки зору функціональності, BCI2000 складається з чотирьох взаємодіючих між собою модулів: оператора, джерела, обробки сигналів і додатка (рис. 6).

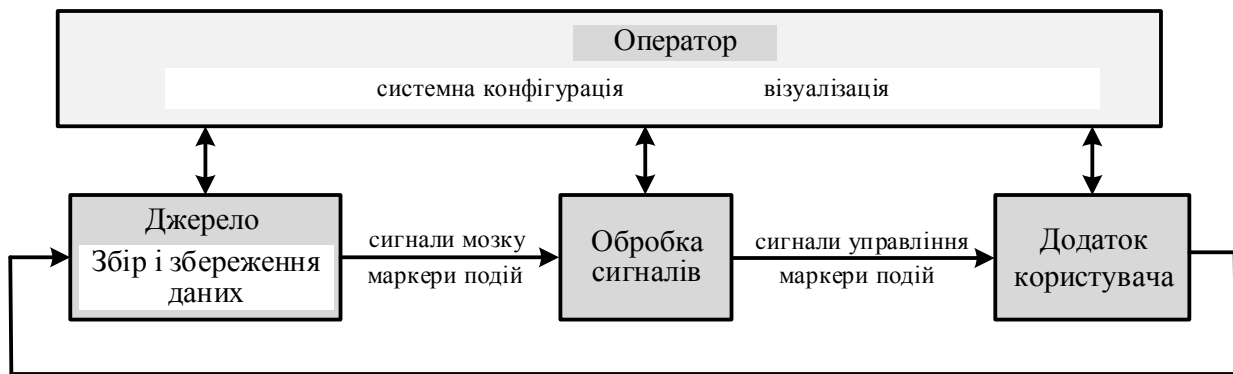


Рисунок 6 – Інформаційна структура BCI2000

Модуль оператора діє як центральний контролер для налаштування системи й онлайн-подання результатів дослідникові. Під час роботи інформація (тобто, сигнали, параметри або маркери подій) передається від джерела до обробки сигналів і далі до додатка й повернення до джерела.

BCI2000 – це універсальна програмна система для дослідження інтерфейсу мозок-комп'ютер. Інфраструктура BCI2000 включає онлайн-документацію і форум BCI2000 з більш ніж 6000 повідомленнями:

- Веб-сайт і завантаження: <http://bci2000.org/>.
- Документація: <http://doc.bci2000.org/>.
- Форум підтримки користувачів: <http://bbs.bci2000.org/>.

Система BCI2000 доступна безкоштовно для некомерційних дослідницьких і освітніх цілей. Вона надана більш 6000 користувачам по усьому світу і використана в більш ніж 1000 рецензованих публікаціях.

10. Пропозиції щодо вдосконалення систем БЗЗ-реабілітації

Всі відомі способи реалізації і використання в медичній реабілітації біологічного зворотного зв'язку не відповідають сучасним тенденціям створення уніфікованих, портативних і безпечних реабілітаційних систем нового покоління, які дозволять проводити лікувальні заходи різної природи не лише в медичних закладах, але й у побуті.

Вбачається, що кардинальне рішення проблеми підвищення ефективності медичної реабілітації з використанням БЗЗ можливе лише за рахунок розширення функціональних можливостей реалізації реабілітаційної БЗЗ-процедури, зокрема, уніфікації процесів і засобів реабілітації, використання засобів баз знань для формалізації, еволюції та подальших досліджень процесів реабілітації, процесів комунікації мозку людини з комп'ютером.

На рис. 7 наведено структуру апаратно-програмного комплексу, який реалізує вдосконалений спосіб реабілітації з використанням БЗЗ [59–61].

Вдосконалена реабілітаційна БЗЗ-процедура подається у три етапи:

1) носій знань (експерт у предметній області) разом з інженером по знаннях формують у текстовій (або графічній) формі базу знань KB (knowledge base) предметної області з наступною її трансляцією в машинну форму КВС (knowledge base computer);

2) користувач (реабілітолог) предметної бази знань:

а) попередньо, засобами середовища проектування і використання експертних систем реабілітації (СПВ ЕС), складає і веде персональні реабілітаційні карти;

б) формулює згідно з персональною реабілітаційною картою і передає в суб'єктно-предикатній формі $P(x)$ завдання до інтерпретатора КВС;

3) пошук розв'язку «у» завдання $P(x)$ у контурі «Пацієнт – СПВ ЕС» із можливим звертанням до користувача (реабілітолога) за додатковою інформацією.

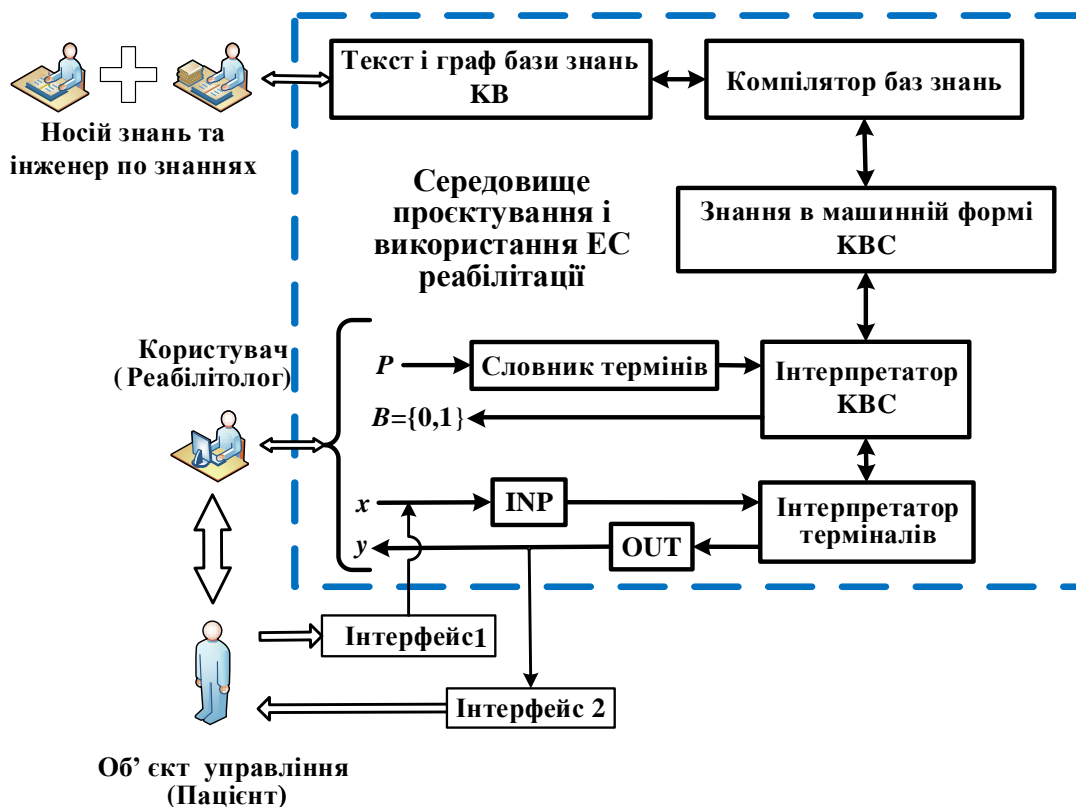


Рисунок 7 – Структура апаратно-програмного комплексу реалізації вдосконаленого способу реабілітації з використанням БЗЗ людей з обмеженими можливостями

Для здійснення вдосконаленої реабілітаційної БЗЗ-процедури СПВ ЕС приймає реальні значення фізіологічних показників пацієнта, які є результатом виконання завдання щодо уявного значення цих фізіологічних показників, здійснює розпізнавання корисної інформації та виробляє і передає пацієнтові інформацію для його направленої поведінки.

Конкретним прикладом реалізації СПВ ЕС є архітектура інструментального середовища CLIPS (C Language Integrated Production System – мова Си, інтегрована із продукційними системами) [62–64] або архітектура інформаційного комп'ютера з [65].

Окрім медичної реабілітації, ця реалізація може бути використана в діагностиці, в області комунікації мозку людини з комп'ютером, здійснюючи ресстрацію, аналіз та інтерпретацію ЕЕГ-сигналів головного мозку для безконтактного керування зовнішніми виконавчими пристроями, наприклад, курсором «миші» на екрані монітора, інвалідною коляскою або спеціалізованими протезами, а також може бути використана в операторській діяльності, у системах безпеки, індустрії розваг тощо.

11. Висновки

Біологічний зворотний зв'язок – технологія, яка включає комплекс процедур, у ході яких людині за допомогою зовнішнього ланцюга зворотного зв'язку надається інформація про стан і зміну власних фізіологічних процесів, яка дає можливість розвинути навички саморегуляції за рахунок тренування й підвищення лабільності регуляторних механізмів.

Сучасні технічні засоби дозволяють у реальному часі отримувати інформацію про роботу практично будь-якої системи організму людини. БЗЗ-терапія наочно демонструє, як використовувати людську свідомість для контролю над власним тілом, дозволяє природним способом оптимізувати нормальні фізіологічні і скорегувати порушені функції організму. Використання БЗЗ перетворює пацієнта з об'єкта лікарських втручань в активного і зацікавленого учасника лікувального процесу.

Найперспективнішим різновидом БЗЗ є нейробіоуправління, єдиним завданням якого є навчати мозок функціонувати ефективніше. У наш час нейробіоуправління широко використовується в медицині, спорті й стрес-менеджменті, ефективно для лікування й реабілітації дорослих і дітей, зокрема, для корекції порушень когнітивних функцій і при дефіциті уваги, а також у випадках різних залежностей (аддикцій). Це не лише область досліджень нейробіології, яка швидко розбудовується, а й технологія, яка привертає значну увагу й інвестиції завдяки чудовій безпеці, портативності й економічній ефективності порівняно з іншими неінвазивними методами.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Медицинская реабилитация в спорте. Руководство для врачей и студентов / под ред. В.Н. Сокрута, В.Н. Казакова. Донецк: Каштан, 2011. 620 с.
2. Медицинская реабилитация: учебн. для студентов и врачей / под ред. В.Н. Сокруты, Н.И. Яблучанского. Славянск: Ваш имидж, 2015. 576 с.
3. Rehabilitation. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation> (date of the access: 01.09.2021).
4. Физиология человека. Электронный учебно-методический комплекс для студентов специальности 1-89 01 01 – Туризм и гостеприимство. Брест: БрГУ имени А.С. Пушкина, 2018. URL: http://www.brsu.by/sites/default/files/anatomy/savanevskij_n.k.homich_g.e.savanevskaya_e.n._fiziologiya_cheloveka.pdf.
5. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Система_органів.
6. MicroExcel. Системы органов человеческого организма. URL: <https://microexcel.ru/sistemy-organov-cheloveka/>.
7. Презентація «Фізіологічні системи організму людини». URL: <https://naurok.com.ua/prezentaciya-fiziologichni-sistemi-organizmu-lyudini-125834.html>.
8. Поняття про гомеостаз і гомеокінез. URL: <https://moyaosvita.com.ua/biologija/ponyattya-pro-gomeostaz-i-gomeokinez/> (дата звернення: 20.04.2021).
9. URL: vozmozhnosti-biologicheskoy-obratnoy-svyazi.pdf (дата звернення: 20.04.2021).
10. URL: <https://biofeedback-neurofeedback-therapy.com/neurofeedback-therapy-training/> (дата звернення: 20.04.2021)
11. Basmajian J.V. The third therapeutic revolution: behavioral medicine. *Appl. Psychophysiology and Biofeedback*. 1999. Vol. 24. P. 107–116.
12. Клиника современной физиотерапии и реабилитации. URL: <http://medicwell.com.ua/> (дата звернення: 20.04.2021).
13. Клиника АТОС. URL: <https://atos.kiev.ua/metod/biologicheskaya-obratnaya-svyaz-bos-obsledovanie-bos-terapiya/> (дата звернення: 20.04.2021).
14. Ваш Врач. URL: <https://vashvrach.com.ua/bos-terapiya-biofeedback-nexus-10-mark/> (дата звернення: 20.04.2021).
15. Компания «Сиата». Медицинская техника и оборудование. URL: <http://www.siata.net.ua/> (дата звернення: 20.04.2021).
16. Научно-Производственный Центр «Ин Витро». URL: <http://amblyocor.ru/> (дата звернення: 20.04.2021).
17. URL: [Клиника «Альтернатива +» alternativaplust-medcentr@mail.ru](mailto:alternativaplust-medcentr@mail.ru) (дата звернення: 20.04.2021).
18. Метод биологической обратной связи. URL: <http://nczd.ru/metod-biologicheskoy-obratnoj-svjazi/> (дата звернення: 20.04.2021)
19. Багатопрофільна клініка «Медик Сити». URL: <https://www.mediccity.ru/directions/8> (дата звернення: 20.04.2021).
20. ООО «Клиника Института Мозга». URL: <https://www.neuro-ural.ru/patient/programmy/reakinezoterapiya-biologicheskoy-obratnoj-svyazyu.html> (дата звернення: 20.04.2021).
21. Суворов Н.Б., Чихиржин Г.М., Фролова Н.Л. Способ функциональной психофизиологической коррекции состояния человека и диагностики в процессе коррекции: пат. RU 2221477 C2; опубл. 20.01.04. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/39/91/a5/94b9212c58338a/RU2221477C2.pdf> (дата звернення: 20.04.2021).

22. Кузьмин А.А., Филист С.А., Пронин Т.В. Способ коррекции функционального состояния человека: пат. RU 2323681 С2; опубл. 10.05.08. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2323681> (дата звернення: 20.04.2021).
23. Балабанов Ю.В., Пинчук Д.Ю., Грачев А.В. Способ коррекции нарушений зрения посредством создания биологической обратной связи и аппаратный комплекс для его осуществления: пат. RU 2471453 С1; опубл. 10.01.2013.
24. Балабанов Ю.В. Спосіб корекції порушень зору і апаратний комплекс для його здійснення: пат. UA 102193 С2 Україна; опубл. 10.06.2013.
25. Патентно-аналітичне агентство «Форсайт». URL: <http://foresight-agency.com/page-index.html> (дата звернення: 20.04.2021).
26. Бирюкова Е.В., Люкманов Р.Х., Коршаков А.В., Турбина Л.Г., Черникова Л.А., Червяков А.В., Фролов А.А., Котов С.В., Мокиенко О.А., Бобров П.Д. Способ реабилитации больных после инсульта или травмы с использованием роботизированного комплекса, включающего экзоскелет конечности человека, управляемый через интерфейс мозг-компьютер посредством воображения движений: пат. RU 2622206 С2; опубл. 13.06.2017.
27. URL: <https://serincenter.com/the-difference-between-biofeedback-and-neurofeedback/>.
28. URL: <https://www.greelane.com/uk/наука-технологія-математика/соціальні-науки/operant-conditioning-definition-examples-4491210/>.
29. Gerardin E., Sirigu A., Leherici S. et al. Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements. *Cerebral Cortex*. 2000. Vol. 10. P. 1093.
30. Константинов К.В., Мирошников Д.Б., Сизов В.В. Способ биоакустичной коррекции психофизиологического состояния организма: пат. RU 2192777; опубл. 20.11.02.
31. Владимирский Б.М., Владимирский Б.Б., Кац М.Н., Шепелев И.Е. Способ классификации электроэнцефалографических сигналов в интерфейсе мозг – компьютер: пат. RU 2415642 С1; опубл. 10.04.2011.
32. Черникова Л.А., Мокиенко О.А., Рощин В.Ю., Бобров П.Д., Фролов А.А. Способ реабилитации больных, перенесших инсульт: пат. RU 2523349 С1; опубл. 20.07.2014.
33. Enriquez-Geppert S., Huster R.J., Herrmann Ch.S. EEG-Neurofeedback as a Tool to Modulate Cognition and Behavior: A Review Tutorial. *Front. Hum. Neurosci.* 2017. 22 February. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00051>.
34. Что такое ЭЭГ-БОС или нейробиоуправление? URL: info@colibri.group (дата звернення: 02.07.2019).
35. Ключев А.П., Королевич П.П., Докукина Т.В., Мисюк Н.Н., Осипов А.Н. Методика и аппаратно-программный комплекс биологической обратной связи для коррекции состояния центральной нервной системы. *Медэлектроника-2018. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии*: сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, Республика Беларусь, 5–6 декабря 2018 г.). Минск: БГУИР, 2018. 285 с. URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/33993> (дата звернення: 20.04.2021).
36. Peniston E.G., Kulkosky P.J. Neurofeedback in the treatment of addictive disorders. *Introduction to quantitative EEG and Neurofeedback* / J.R. Evans, A. Abarbanel (eds.). Academic Press, 1999. P. 157–179.
37. Pillai J., Sperling M.R. Interictal EEG and the diagnosis of epilepsy. *Epilepsia*. 2006. Vol. 47 (suppl. I). P. 12–14.
38. Laibow R. Medical applications of neurobiofeedback. *Introduction to quantitative EEG and Neurofeedback* / J.R. Evans, A. Abarbanel (eds.). Academic Press, 1999. P. 83–102.
39. Sterman M.B. EEG biofeedback in the treatment of epilepsy: An overview circa 1980. *Clinical Biofeedback: Efficacy and Mechanism* / L. White, B. Tursky (eds.). Guilford, NY, 1982. P. 330–331.
40. Zhang W., Tan Ch., Sun F., Wu H., Zhang B. A Review of EEG-Based Brain-Computer Interface Systems Design. 2019. April 2. DOI: <https://doi.org/10.26599/BSA.2018.9050010>.
41. Lee M.B., Kramer D.R., Peng T. et al. Brain-Computer Interfaces in Quadriplegic Patients. *Neurosurg Clin N Am*. 2019. Vol. 30. P. 275–281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nec.2018.12.2009>.
42. Zhang X., Ma Z., Zheng H., Li T., Chen K. et al. The combination of brain-computer interfaces and artificial intelligence: applications and challenges. *Annals of Translational Medicine*. 2020. Vol. 8, N 11. DOI: <https://doi.org/10.21037/atm.2019.11.109>.

43. Silva G.A. A New Frontier: The Convergence of Nanotechnology, Brain Machine Interfaces, and Artificial Intelligence. *Front Neurosci.* 2018. Vol. 12. P. 843. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00843>.
44. Daly J.J., Wolpaw J.R. Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation. *Lancet Neurol.* 2008. Vol. 7. P. 1032–1043.
45. Bacher D., Jarosiewicz B., Masse N.Y. et al. Neural Point-and-Click Communication by a Person With Incomplete Locked-In Syndrome. *Neurorehabil Neural Repair.* 2015. Vol. 29. P. 462–471.
46. Carmena J.M., Lebedev M.A., Crist R.E. et al. Learning to Control a Brain «Machine Interface for Reaching and Grasping by Primates». *PLoS Biol.* 2003. N 1. E42.
47. Velliste M., Perel S., Spalding M.C. et al. Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding. *Nature.* 2008. N 453. P. 1098–1101.
48. Wills S.A., Mackay D.J. DASHER – an efficient writing system for brain-computer interfaces. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2006. N 14. P. 244. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2006.875573>.
49. Brumberg J.S., Nieto-Castanon A., Kennedy P.R. et al. Brain-Computer Interfaces for Speech Communication. *Speech Commun.* 2010. N 52. P. 367–379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.specom.2010.01.001>.
50. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Окулография>.
51. Курдогло С. Что такое ай-трекинг (eye-tracking) и зачем он нужен? URL: <https://vc.ru/future/204188-что-такое-ay-treking-eye-tracking-i-zachem-on-nuzhen> (дата звернення: 03.02.2021).
52. Evain A., Argelaguet F., Casiez G., Roussel N., Lécuyer A. Design and Evaluation of Fusion Approach for Combining Brain and Gaze Inputs for Target Selection. *Front. Neurosci.* DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00454> (date of the access: 07.10.2016).
53. Alexk_Neuro. Vr-Нейроинтерфейс для людей з Альцгеймером. URL: <https://habr.com/ru/post/511398/> (date of the access: 17.07.2020).
54. Lopez C.A.F., Li G., Zhang D. Beyond Technologies of Electroencephalography-Based Brain-Computer Interfaces: A Systematic Review From Commercial and Ethical Aspects. *Front. Neurosci.* DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.611130> (date of the access: 17.12.2020).
55. Агентство и алгоритм. *Nature.* 2019. Vol. 571. S. 19. URL: <https://media.nature.com/original/magazine-assets/d41586-019-02214-2/d41586-019-02214-2.pdf>.
56. URL: <https://www.neurotechcenter.org/>.
57. URL: <https://www.neurotechcenter.org/technology-overview> (date of the access: 01.09.2021).
58. Schalk G., McFarland D.J., Hinterberger T., Birbaumer N., Wolpaw J.R. BCI2000: A General-Purpose Brain-Computer Interface (BCI) System, *IEEE Trans Biomed Eng.* 2004. Vol. 51 (6). DOI: <https://doi.org/10.1109/TBME.2004.827072> (date of the access: 01.09.2021).
59. Кургаев О.П., Палагін О.В., Малахов К.С., Семікопна Т.В. Пристрій реабілітації людей з обмеженими можливостями. Пат. 151356 Україна: МПК (2022.01) А61В 5/00 А61В 5/24 (2021.01). № u2021 02702; заявл. 24.05.2021; опубл. 13.07.2022, Бюл. № 28.
60. Kurgaev A., Palagin O. 2 Rehabilitation According to the Biological Feedback. *IEEE 11th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications* (Cracow, Poland, September 22–25, 2021). Cracow, Poland: Cracow University of Technology, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5635711>.
61. Кургаев О.П., Палагін О.В. Біологічний зворотний зв'язок для реабілітації людей з обмеженими можливостями. *Український журнал фізичної та реабілітаційної медицини.* 2021. Vol. 9, Issue 3–4. P. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.54601/2523-479X.2021.0.9.3-4.9>.
62. Джарратано Дж., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. 4-ое изд. / пер. с англ. Москва, Санкт-Петербург, Киев: 000 «И.Д. Вильямс», 2007. 1152 с.
63. Кургаев О.П. Характеристика інструментального середовища CLIPS. *Практика використання інструментального середовища CLIPS*: навч. посіб. Київ: НУХТ, 2013. С. 5–64. ISBN 978-966-612-149-6.
64. CLIPS: A Tool for Building Expert Systems. URL: <http://www.clipsrules.net/index.html> (date of the access: 20.04.2021).
65. Кургаев А.Ф. Концепт информации. Ч. 2: Функции научной теории. *Проблемы управления и информатики.* 2020. № 2. С. 124–140. DOI: <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v52.i4.60>.

Стаття надійшла до редакції 19.07.2022