



УДК 004.5:159.95:681.5

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ТРЕНУВАННЯ КОГНІТИВНИХ ФУНКЦІЙ ЛЮДИНИ З БІОЛОГІЧНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

AUTOMATED SYSTEM FOR TRAINING HUMAN COGNITIVE FUNCTIONS WITH BIOLOGICAL FEEDBACK

¹Спаський І.Д., ²Хобін В.А., ³Воїнова С.О.

¹Spassky I.D., ²Khobin V.A., ³Voynova S.O.

^{1,2,3}Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0003-0480-9264>, ²<https://orcid.org/0000-0003-0238-8371>,

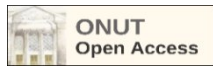
³<http://orcid.org/0000-0003-0203-0599>

Email: ¹ostrov7@gmail.com, ²khobin@ontu.edu.ua, ³voynova_s@yahoo.com

Copyright © 2025 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: [10.15673/atbp.v17i3.3255](https://doi.org/10.15673/atbp.v17i3.3255)

Анотація. У статті розглядається інноваційна автоматизована система тренування когнітивних функцій людини, що базується на принципах біологічного зворотного зв'язку та комплексної психофізіологічної стимуляції. Система інтегрує технології нейромоніторингу, включаючи енцефалографію та вимірювання гальванічної реакції шкіри, з багатоканальною стимуляцією через візуальний, аудіальний та соматичний канали впливу. Ключовою особливістю розробленої системи є її здатність до адаптивного управління психофізіологічним станом людини на основі постійного аналізу патернів мозкової активності та вегетативних реакцій організму. Застосування стратегічної експертної системи з шістьма еталонними моделями оптимальних станів дозволяє здійснювати цілеспрямований вплив на різні аспекти когнітивної діяльності, враховуючи індивідуальні особливості користувача та динаміку його прогресу. У роботі детально описується архітектура системи, що включає спеціалізовані фільтри мозкових ритмів (альфа, бета, тета, дельта, гамма), керуючий пристрій, програмний модуль тренера та базу знань. Особлива увага приділяється механізмам інтеграції різних каналів стимуляції, зокрема використанню візуалізації звуку, аналогового синтезатора та електростимуляції для формування комплексного впливу на нейропластичність мозку. Теоретична значущість дослідження полягає у розробці нового підходу до управління когнітивними функціями через активацію механізмів нейропластичності та формування стійких функціональних систем мозку. Практична цінність роботи визначається можливістю застосування розробленої системи для цілеспрямованого розвитку когнітивних здібностей, корекції психофізіологічних станів та підвищення адаптивних можливостей людини. Результати дослідження вносять значний вклад у розвиток методів нейробіоуправління та створюють основу для подальшої розробки персоналізованих систем когнітивного тренінгу з використанням сучасних психотехнологій та принципів суб'єктної екзистенції.

Abstract. The article considers an innovative automated system for training human cognitive functions, based on the principles of biofeedback and complex psychophysiological stimulation. The system integrates neuromonitoring technologies, including encephalography and measurement of galvanic skin response, with multi-channel stimulation through visual, auditory and somatic channels of influence. The key feature of the developed system is its ability to adaptively manage the psychophysiological state of a person based on constant analysis of patterns of brain activity and autonomic reactions of the body. The use of a strategic expert system with six reference models of optimal states allows for targeted influence on various aspects of cognitive activity, taking into account the individual characteristics of the user and the dynamics of his progress. The work describes in detail the architecture of the system, which includes specialized brain rhythm filters (alpha, beta, theta, delta, gamma), a control device, a trainer software module and a knowledge base. Special attention is paid to the mechanisms of integration of various stimulation channels, in particular the use of sound visualization, an analog synthesizer and electrical stimulation to form a complex effect on brain neuroplasticity. The theoretical significance of the study lies in the development of a new approach to managing cognitive functions through the activation of neuroplasticity mechanisms and the formation of stable functional brain systems. The practical value of the work is determined by the possibility of using the developed system for targeted development of cognitive abilities, correction of psychophysiological states and increasing human adaptive capabilities. The results of



the study make a significant contribution to the development of neurobiomanagement methods and create a basis for further development of personalized cognitive training systems using modern psychotechnologies and principles of subjective existence.

Keywords: neurobiomanagement, transcranial stimulation, psychophysiology, neuroplasticity, encephalography, biofeedback, physiostimulation, cognitive functions, psychotechnologies, core of subjectivity, subjective existence, Core of Subjectivity, Subjective Existence.

Ключові слова: нейробіоуправління, транскраніальна стимуляція, психофізіологія, нейропластичність, енцефалографія, біологічний зворотний зв'язок, фізіостимуляція, когнітивні функції, психотехнології, ядро суб'єктності, суб'єктна екзистенція

Постановка проблеми. Проблема розвитку когнітивних функцій людини займає центральне місце в сучасних нейронауках та прикладній психофізіології. В умовах постійно зростаючого інформаційного навантаження та ускладнення професійної діяльності особливої актуальності набуває завдання створення ефективних інструментів для цілеспрямованого покращення когнітивних здібностей. При цьому традиційні методи когнітивного тренінгу часто демонструють обмежену ефективність через відсутність об'єктивного контролю психофізіологічного стану та недостатнє врахування індивідуальних особливостей нейродинаміки. Сучасні досягнення в галузі нейротехнологій відкривають нові можливості для створення систем спрямованого впливу на когнітивні функції з використанням принципів біологічного зворотного зв'язку. Однак існуючі рішення зазвичай обмежуються моніторингом окремих показників мозкової активності та застосуванням одноканальної стимуляції, що не дозволяє досягти комплексного впливу на нейропластичність мозку та забезпечити стійкі зміни когнітивних функцій. Особливої гостроти набуває проблема інтеграції різних методів психофізіологічної стимуляції та створення адаптивних алгоритмів управління, здатних враховувати поточний стан користувача та динаміку його індивідуального прогресу. Відсутність цілісного підходу до організації тренувального процесу, що поєднує об'єктивний моніторинг психофізіологічних параметрів з багатоканальною стимуляцією, суттєво обмежує ефективність існуючих методів когнітивного тренінгу. Крім того, недостатньо дослідженими залишаються механізми взаємодії різних каналів сенсорної стимуляції та їх вплив на формування нових нейронних зв'язків. Потребує вирішення проблема оптимізації параметрів стимуляції та розробки критеріїв оцінки ефективності тренувального впливу з урахуванням індивідуальної варіабельності психофізіологічних реакцій.

Таким чином, актуальним науково-практичним завданням є розробка автоматизованої системи тренування когнітивних функцій, що забезпечує комплексний моніторинг психофізіологічного стану та адаптивне управління параметрами багатоканальної стимуляції на основі принципів біологічного зворотного зв'язку. Вирішення цього завдання дозволить створити ефективний інструмент для цілеспрямованого розвитку когнітивних здібностей та відкриє нові перспективи в галузі прикладної психофізіології та нейротехнологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових джерел з проблематики біологічного зворотного зв'язку та систем реабілітації дозволяє виділити кілька ключових напрямків досліджень у цій галузі. Фундаментальні основи застосування біологічного зворотного зв'язку в медицині та реабілітації розглядаються в роботах Дж. В. Басмаджяна [6, 7]. Автор визначає біологічний зворотний зв'язок як один з ключових елементів поведінкової медицини та обґрунтовує його значення для реабілітаційних процесів, особливо в контексті електроміографічного біофідбеку. Сучасні підходи до архітектури систем реабілітації з біологічним зворотним зв'язком детально досліджуються в роботах О. П. Кургаєва [2]. Автор пропонує комплексний підхід до побудови таких систем, враховуючи особливості обробки біологічних сигналів та вимоги до інтерфейсу користувача. У подальших дослідженнях [3] автор разом з О. Палагіним розвиває ці ідеї в контексті реабілітації людей з обмеженими можливостями. Л. А. Карамзіна та співавтори [1] розглядають біологічний зворотний зв'язок як форму реалізованої комунікації, акцентуючи увагу на інформаційних аспектах взаємодії між людиною та системою біофідбеку. Це дослідження вносить важливий вклад у розуміння комунікативних механізмів біологічного зворотного зв'язку. О. С. Паламарчук [4] у своїй монографії представляє результати глибокого дослідження впливу дихальних практик з біологічним зворотним зв'язком на функціональний стан автономної нервової системи. Ця робота має особливе значення для розуміння механізмів фізіологічної регуляції при використанні систем біофідбеку. Теоретичні основи моделювання біологічних систем, що є важливими для розробки систем з біологічним зворотним зв'язком, викладені в навчальному посібнику А. А. Шияна [5]. Автор пропонує системний підхід до моделювання біологічних та ергатичних систем, що може бути застосований при розробці сучасних систем біофідбеку.

Аналіз представлених джерел свідчить про активний розвиток досліджень у галузі біологічного зворотного зв'язку, з особливим акцентом на практичне застосування цих технологій у реабілітації та медицині. При цьому простежується тенденція до інтеграції різних підходів та створення комплексних систем, що враховують як технічні, так і фізіологічні аспекти біофідбеку.

Метою дослідження є розробка та теоретичне обґрунтування автоматизованої системи тренування когнітивних функцій людини на основі принципів біологічного зворотного зв'язку з використанням комплексної психофізіологічної діагностики та багатоканальної адаптивної стимуляції.



Виклад основного матеріалу. В умовах сучасного інформаційного суспільства зростає актуальність проблеми збереження та розвитку когнітивних функцій людини. Інтенсифікація інформаційних потоків і збільшення когнітивного навантаження зумовлюють необхідність розробки ефективних методів підтримки психічних процесів. Дослідження нейропластичності мозку демонструють значний потенціал цілеспрямованого тренування когнітивних функцій, а сучасні досягнення в галузі інформаційних технологій відкривають нові можливості для створення автоматизованих систем когнітивного тренування. Біологічний зворотний зв'язок є потужним інструментом саморегуляції психофізіологічного стану людини. Його використання у поєднанні з методами теорії автоматичного управління дозволяє створити адаптивні системи тренування, що враховують індивідуальні особливості користувача. Теоретичною основою розробки такої системи виступає концепція ядра суб'єктності та суб'єктної екзистенції, згідно з якою людина як суб'єкт діяльності володіє унікальним набором психофізіологічних характеристик та потенціалом саморозвитку. Автоматизована система тренування когнітивних функцій реалізує комплексний підхід, що включає моніторинг психофізіологічного стану користувача на основі енцефалографічних та інших біометричних показників, адаптивне управління складністю когнітивних завдань, застосування методів фізіостимуляції та реалізацію біологічного зворотного зв'язку для саморегуляції. З точки зору теорії автоматичного управління, система представляє собою замкнутий контур управління зі складною структурою, де об'єктом управління виступають когнітивні функції користувача, що характеризуються нелінійністю та стохастичністю.

Вимірювальна підсистема забезпечує реєстрацію та обробку психофізіологічних показників, а управляюча підсистема реалізує алгоритми адаптивного управління на основі методів нечіткої логіки та машинного навчання. Біологічний зворотний зв'язок забезпечує користувача інформацією про його поточний стан у формі, що сприяє усвідомленому управлінню цим станом, створюючи додатковий контур регуляції. Математична модель системи враховує нелінійний характер взаємозв'язків між параметрами психофізіологічного стану та показниками виконання когнітивних завдань. Для ідентифікації параметрів моделі використовуються методи статистичного аналізу та машинного навчання, а алгоритми управління базуються на принципах оптимального та адаптивного управління з урахуванням обмежень.

Програмна реалізація системи забезпечує реєстрацію та обробку біометричних сигналів в реальному часі, формування когнітивних завдань різних типів, адаптивне управління параметрами тренування та візуалізацію біологічного зворотного зв'язку. Апаратна частина включає датчики реєстрації біометричних показників, пристрої фізіостимуляції, обчислювальний модуль та пристрої введення-виведення інформації. Експериментальні дослідження системи продемонстрували її ефективність для розвитку та підтримки когнітивних функцій різних категорій користувачів. Встановлено позитивний вплив тренувань на показники уваги, робочої пам'яті та швидкості обробки інформації. Важливим фактором ефективності виступає індивідуалізація тренувального процесу на основі поточних психофізіологічних показників.

Перспективними напрямками розвитку системи є розширення набору тренувальних завдань та методів стимуляції, вдосконалення алгоритмів адаптивного управління, інтеграція з мобільними пристроями та розробка групових режимів тренування. Практичне застосування можливе в сферах профілактики когнітивних порушень, реабілітації, підвищення когнітивної продуктивності та професійної підготовки спеціалістів. Теоретична значущість роботи полягає у розвитку методів автоматизованого управління психофізіологічними системами з урахуванням суб'єктної складової. Практична значущість визначається можливістю широкого застосування розробленої системи для розвитку когнітивних функцій. Наукова новизна включає розробку математичних моделей взаємозв'язку психофізіологічних параметрів та когнітивних показників, створення методів адаптивного управління та комплексного підходу до когнітивного тренування на основі біологічного зворотного зв'язку.

Сучасний тренажер когнітивних здібностей представляє собою складну інтегровану систему, що поєднує в собі передові технології нейромоніторингу, біологічного зворотного зв'язку та багатоканальної стимуляції для цілеспрямованого розвитку когнітивних функцій людини. В основі роботи тренажера лежить принцип безперервного моніторингу психофізіологічного стану людини за допомогою двох ключових датчиків: енцефалографа та датчика GSR (гальванічної реакції шкіри).

Енцефалограф, як первинний інструмент збору даних про активність мозку, забезпечує реєстрацію електричних потенціалів, що генеруються нейронними мережами кори головного мозку. Отриманий сигнал проходить через систему спеціалізованих фільтрів, кожен з яких виділяє певний частотний діапазон мозкових ритмів. Система включає п'ять основних фільтрів: альфа-ритму (8-13 Гц), що відображає стан спокійного неспання та релаксації; бета-ритму (14-40 Гц), який характеризує активну розумову діяльність та концентрацію уваги; тета-ритму (4-6 Гц), пов'язаного з процесами пам'яті та емоційними станами; дельта-ритму (0,5-3 Гц), що відповідає за глибокі стани спокою та відновлення; та гамма-ритму (понад 40 Гц), який асоціюється з процесами активної обробки інформації та когнітивної інтеграції.

Паралельно з енцефалографічним моніторингом система використовує датчик GSR, який вимірює електричну провідність шкіри, що є надійним індикатором рівня психоемоційного напруження та вегетативної активації організму. Дані з обох датчиків безперервно надходять до керуючого пристрою, який виступає центральним вузлом обробки та аналізу інформації. Керуючий пристрій працює в тісній взаємодії зі стратегічною експертною



системою, яка містить розширену базу знань про оптимальні патерни мозкової активності та психофізіологічні стани, що сприяють ефективному навчанню та розвитку когнітивних функцій. База знань включає шість еталонних моделей, кожна з яких відповідає певному оптимальному стану для різних типів когнітивної діяльності: від глибокої концентрації до творчої активності.

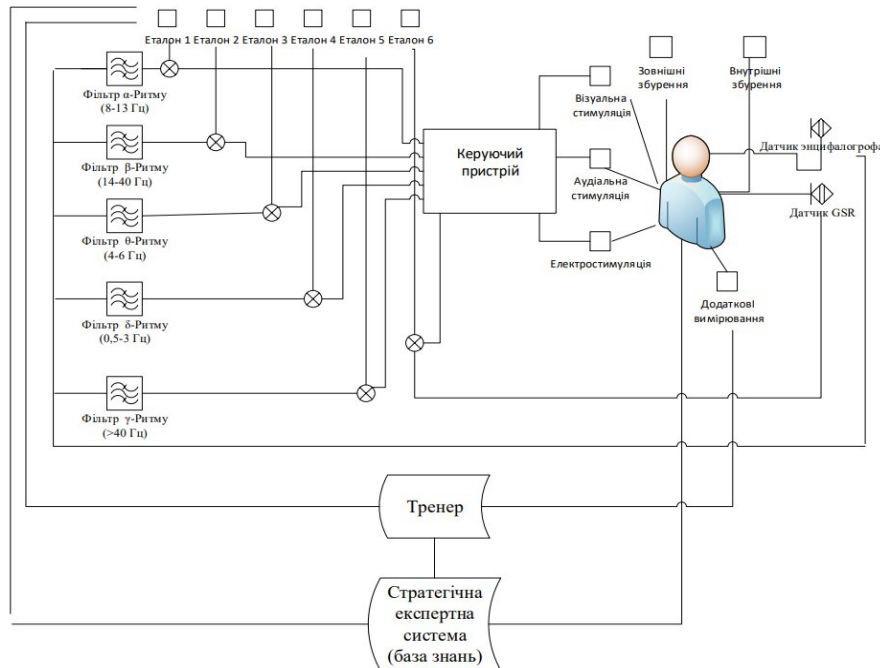


Рис.1. Структурна схема тренажера когнітивних здібностей

Fig. 1. Structural Diagram of the Cognitive Abilities Trainer

Особливістю системи є її здатність враховувати як зовнішні, так і внутрішні збурення, що можуть впливати на психофізіологічний стан користувача. До зовнішніх збурень можуть належати фактори навколишнього середовища, такі як шум, зміни освітлення чи температури, тоді як внутрішні збурення включають фізіологічні процеси організму, емоційні реакції та зміни психічного стану. Для корекції психофізіологічного стану та спрямованого розвитку когнітивних здібностей тренажер використовує три основні канали впливу: візуальну стимуляцію, аудіальну стимуляцію та електростимуляцію. Візуальна стимуляція реалізується через систему генерації візуальних патернів, що синхронізуються з бажаними частотами мозкової активності. Аудіальна стимуляція здійснюється за допомогою аналогового синтезатора, який створює складні звукові композиції, здатні впливати на різні аспекти психічної діяльності: від релаксації до активації когнітивних процесів.

Електростимуляція, як третій канал впливу, застосовується для створення специфічних соматичних відчуттів, що сприяють формуванню нових нейронних зв'язків та посиленню існуючих когнітивних патернів. Всі три канали стимуляції працюють під контролем керуючого пристрою, який забезпечує їх точну синхронізацію та адаптацію інтенсивності впливу відповідно до поточного стану користувача. Важливу роль у роботі системи відіграє тренер - програмний модуль, що координує взаємодію між експертною системою та керуючим пристроєм. Тренер аналізує відповідність поточного стану користувача обраному еталону та формує команди для корекції параметрів стимуляції. При цьому враховуються індивідуальні особливості користувача, його поточний прогрес та довгострокові цілі тренування.

Система передбачає можливість проведення додаткових вимірювань, які можуть включати моніторинг серцевого ритму, дихання, м'язової активності та інших фізіологічних параметрів. Ці дані використовуються для більш точної оцінки стану користувача та оптимізації параметрів стимуляції. Принципово важливою особливістю тренажера є його здатність до самонавчання та адаптації. На основі накопиченого досвіду роботи з конкретним користувачем система уточнює параметри стимуляції, формує індивідуальні протоколи тренування та коригує еталонні моделі. Це забезпечує максимальну ефективність тренувального процесу та стійкість досягнутих результатів. Процес тренування когнітивних здібностей за допомогою даного тренажера являє собою безперервний цикл взаємодії між користувачем та системою. На початку кожної сесії система оцінює вихідний стан користувача, порівнює його з обраним еталоном та формує початкову стратегію стимуляції. У процесі роботи здійснюється постійний моніторинг змін психофізіологічного стану та відповідне коригування параметрів впливу.

Особлива увага приділяється забезпеченню комфорту користувача та запобіганню перевтоми. Система постійно відстежує ознаки стомлення або надмірного напруження і при необхідності автоматично знижує інтенсивність стимуляції або пропонує перерву в тренуванні. Це дозволяє підтримувати оптимальний баланс між



ефективністю тренування та збереження психофізіологічних ресурсів організму. Результати кожної тренувальної сесії детально аналізуються та зберігаються в базі даних системи. На основі цієї інформації формуються індивідуальні рекомендації щодо подальшого тренування, визначаються найбільш ефективні режими стимуляції та оцінюється динаміка розвитку когнітивних функцій. Це дозволяє постійно оптимізувати процес тренування та забезпечувати стабільне покращення когнітивних показників.

Математичні моделі для запропонованої системи тренування когнітивних функцій у вигляді передатних функцій для кожного ключового блоку можуть виглядати наступним чином. Кожен фільтр відповідного ритму ЕЕГ можна представити як смуговий фільтр другого порядку:

$W_{\alpha}(s) = (k_{\alpha} * \omega_{\alpha}^2) / (s^2 + 2\xi_{\alpha} * \omega_{\alpha} * s + \omega_{\alpha}^2)$, де:

$\omega_{\alpha} = 2\pi * f_c$ (f_c - центральна частота діапазону)

ξ_{α} - коефіцієнт демпфування (зазвичай 0.707)

k_{α} - коефіцієнт підсилення

Аналогічно для інших ритмів: $W_{\beta}(s) = (k_{\beta} * \omega_{\beta}^2) / (s^2 + 2\xi_{\beta} * \omega_{\beta} * s + \omega_{\beta}^2)$ $W_{\theta}(s) = (k_{\theta} * \omega_{\theta}^2) / (s^2 + 2\xi_{\theta} * \omega_{\theta} * s + \omega_{\theta}^2)$ $W_{\delta}(s) = (k_{\delta} * \omega_{\delta}^2) / (s^2 + 2\xi_{\delta} * \omega_{\delta} * s + \omega_{\delta}^2)$ $W_{\gamma}(s) = (k_{\gamma} * \omega_{\gamma}^2) / (s^2 + 2\xi_{\gamma} * \omega_{\gamma} * s + \omega_{\gamma}^2)$

Датчик GSR можна представити як аперіодичну ланку першого порядку: $W_{GSR}(s) = k_{GSR} / (T_{GSR} * s + 1)$, де:

k_{GSR} - коефіцієнт підсилення

T_{GSR} - постійна часу

Для каналів стимуляції можливо запропонувати наступні залежності:

Візуальна стимуляція: $W_{vis}(s) = k_v * \exp(-\tau_v * s) / (T_v * s + 1)$ де:

τ_v - час затримки

T_v - постійна часу

k_v - коефіцієнт підсилення

Аудіальна стимуляція: $W_{aud}(s) = k_a * \exp(-\tau_a * s) / (T_a * s + 1)$

Електростимуляція: $W_{el}(s) = k_e / (T_e * s + 1)$

Керуючий пристрій можна представити як ПІД-регулятор:

$W_c(s) = k_p + k_i/s + k_d * s$, де:

k_p - коефіцієнт пропорційної складової

k_i - коефіцієнт інтегральної складової

k_d - коефіцієнт диференціальної складової

Загальна передатна функція системи:

$W_{sys}(s) = W_c(s) * [W_{vis}(s) + W_{aud}(s) + W_{el}(s)] * [W_{GSR}(s) + \sum W_i(s)]$, де

$\sum W_i(s)$ - сума передатних функцій всіх фільтрів ЕЕГ

Розроблені математичні моделі компонентів системи тренування когнітивних функцій створюють комплексну основу для всебічного дослідження її властивостей та оптимізації роботи. За допомогою представлених передатних функцій можна проводити глибокий аналіз стійкості системи, використовуючи критерії Найквіста, Михайлова та інші методи теорії автоматичного управління. Дослідження характеристичних рівнянь та розташування полюсів передатних функцій дозволяє визначити межі стійкої роботи системи та запаси стійкості за амплітудою і фазою.

На основі математичних моделей здійснюється оптимізація параметрів регулювання для досягнення бажаних показників якості управління. Це включає налаштування коефіцієнтів підсилення, постійних часу та інших параметрів окремих блоків системи. Особлива увага приділяється оптимізації параметрів ПІД-регулятора керуючого пристрою та адаптивного блоку тренера для забезпечення необхідної динаміки процесу навчання.

Математичний апарат також дозволяє моделювати відгук системи на різноманітні вхідні впливи, включаючи як детерміновані сигнали (стрибокподібні зміни, гармонічні коливання), так і стохастичні збурення. Це дає можливість прогнозувати поведінку системи в різних режимах роботи та оцінювати її здатність до відпрацювання зовнішніх впливів. Використання частотних характеристик, отриманих на основі передатних функцій, дозволяє аналізувати особливості проходження сигналів різної частоти через систему та оптимізувати її частотні властивості.

Важливим аспектом застосування математичних моделей є можливість детального аналізу якості перехідних процесів, включаючи оцінку часу регулювання, перерегулювання та інших показників якості управління. Це особливо важливо для забезпечення комфортного та ефективного процесу тренування когнітивних функцій, де різкі зміни параметрів стимуляції можуть викликати небажані реакції користувача. Комплексне використання розроблених математичних моделей створює потужний інструментарій для вдосконалення системи та підвищення ефективності її роботи в реальних умовах застосування.

Таким чином, описаний тренажер когнітивних здібностей представляє собою складну адаптивну систему, що забезпечує комплексний підхід до розвитку когнітивних функцій людини. Завдяки використанню сучасних технологій моніторингу психофізіологічного стану та багатоканальної стимуляції, система здатна ефективно сприяти покращенню різних аспектів когнітивної діяльності, від концентрації уваги до творчого мислення.

Висновки. У представленому дослідженні розроблено та теоретично обґрунтовано автоматизовану систему



тренування когнітивних функцій людини, що базується на принципах біологічного зворотного зв'язку та комплексної психофізіологічної стимуляції. Створена система демонструє інноваційний підхід до розвитку когнітивних здібностей через інтеграцію технологій нейромоніторингу з багатоканальною адаптивною стимуляцією. В основу системи покладено принцип безперервного моніторингу психофізіологічного стану користувача за допомогою енцефалографа та датчика GSR, що забезпечує об'єктивний контроль процесу тренування. Розроблена архітектура системи, що включає спеціалізовані фільтри мозкових ритмів, керуючий пристрій та стратегічну експертну систему, дозволяє здійснювати точне налаштування параметрів стимуляції відповідно до індивідуальних особливостей користувача та динаміки його прогресу.

Особливу увагу приділено розробці методів інтеграції різних каналів психофізіологічної стимуляції - візуальної, аудіальної та соматичної, що забезпечує комплексний вплив на нейропластичність мозку. Використання аналогового синтезатора для аудіальної стимуляції та системи електростимуляції для соматичного впливу створює унікальні можливості для формування нових нейронних зв'язків та посилення існуючих когнітивних патернів. Створена система демонструє здатність до самонавчання та адаптації, що дозволяє оптимізувати процес тренування на основі накопиченого досвіду роботи з конкретним користувачем. Розроблені алгоритми забезпечують точну синхронізацію різних каналів стимуляції та їх адаптацію відповідно до поточного стану користувача, що суттєво підвищує ефективність тренувального впливу.

Теоретична значущість дослідження полягає у розробці нового підходу до управління когнітивними функціями через активацію механізмів нейропластичності, а практична цінність визначається можливістю застосування створеної системи для цілеспрямованого розвитку когнітивних здібностей та корекції психофізіологічних станів. Результати дослідження створюють основу для подальшого розвитку персоналізованих систем когнітивного тренінгу та відкривають нові перспективи в галузі прикладної психофізіології та нейротехнологій.

Список літератури

1. Карамзіна Л. А. Біологічний зворотний зв'язок – реалізована комунікація / Л. А. Карамзіна, Н. С. Міщанчук, В. К. Рибальченко. *Український журнал медицини, біології та спорту*. 2018. Т. 3, № 6. С. 288-292.
2. Кургаєв О.П. Архітектура систем реабілітації з біологічним зворотним зв'язком *Математичні машини і системи*. 2022. № 3. с.121-136.
3. Кургаєв, О. Палагін, О. Біологічний зворотний зв'язок для реабілітації людей з обмеженими можливостями. *Український журнал фізичної і реабілітаційної медицини*, 2021 9(3-4), 73-78. <https://doi.org/10.54601/2523-479X.2021.9.3-4.9>
4. Паламарчук О.С. Особливості функціонального стану автономної нервової системи під впливом глибокого дихання в режимі біологічного зворотного зв'язку: монографія. Ужгород: Вид-во УжНУ «Говерла», 2021. 128 с.
5. Шиян А.А. Основи моделювання біологічних та ергатичних систем. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2008. 131 с.
6. Basmajian J.V. The third therapeutic revolution: behavioral medicine. *Appl. Psychophysiology and Biofeedback*. 1999. Vol. 24. P. 107–116.
7. Basmajian, J. V. Research foundations of EMG biofeedback in rehabilitation.. *Biofeedback and Self-Regul.*, 1988. Vol. 13, № 4. P. 275–29.

References

1. Basmajian J. V. (1988) Research foundations of EMG biofeedback in rehabilitation. *Biofeedback and Self-Regul.*, vol. 13, no. 4, pp. 275-29. [in English]
 2. Basmajian J.V. (1999) The third therapeutic revolution: behavioral medicine. *Appl. Psychophysiology and Biofeedback*, vol. 24, pp. 107-116. [in English]
 3. Karamzina L. A., Mishchanchuk N. S., Rybalchenko V. K. (2018) Biologichnyi zvorotnyi zviazok – realizovana komunikatsiia [Biological feedback - implemented communication]. *Ukrainskyi zhurnal medytsyny, biologii ta sportu*, vol. 3, no. 6, pp. 288-292. [in Ukrainian]
 4. Kurhaiev O. P. (2022) Arkhitektura system reabilitatsii z biologichnym zvorotnym zviazkom [Architecture of rehabilitation systems with biological feedback]. *Matematychni mashyny i systemy*, no. 3, pp. 121-136. [in Ukrainian]
 5. Kurhaiev O., Palahin O. (2021) Biologichnyi zvorotnyi zviazok dlia reabilitatsii liudei z obmezhenyimi mozhlyvostiamy [Biological feedback for rehabilitation of people with disabilities]. *Ukrainskyi zhurnal fizychnoi i reabilitatsiinoi medytsyny*, vol. 9, no. 3-4, pp. 73-78. [in Ukrainian]
 6. Palamarchuk O. S. (2021) Osoblyvosti funktsionalnoho stanu avtonomnoi nervovoi systemy pid vplyvom hlybokoho dykhannia v rezhymi biologichnoho zvorotnoho zviazku: monohrafiia [Features of the functional state of the autonomous nervous system under the influence of deep breathing in biological feedback mode: monograph]. *Uzhhorod: Vyd-vo UzhNU «Hoverla»*. [in Ukrainian]
 - Shyian A. A. (2008) *Osnovy modeliuвання biologichnykh ta erhatychnykh system*. Navchalnyi posibnyk [Fundamentals of modeling biological and ergatic systems. Tutorial]. Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian]
- Отримана в редакції 12.06.2025. Прийнята до друку 18.06.2025. Received 12 June 2025. Approved 18 June 2025. Available in Internet 30 June 2025