

УДК 004.5:7.05

DOI <https://doi.org/10.24919/2308-4863/79-2-11>

Денис ПОГОРЕЛЬЧУК,
orcid.org/0009-0008-8706-634X
аспірант кафедри дизайну середовища
Харківської державної академії дизайну та мистецтв
(Харків, Україна) *dr.pogorelchuk@gmail.com*

ДИЗАЙН НЕЙРОКОМП'ЮТЕРНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ: ІСТОРІЯ ТА СУЧАСНІСТЬ

У дослідженні розглядається розвиток дизайну нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКИ), починаючи від ранніх прототипів середини ХХ ст. до сучасних інтегрованих систем, які значно вдосконалилися завдяки інноваціям у сенсорних технологіях та штучному інтелекті. Проблема, на якій зосереджено увагу, полягає у складності створення ефективного та інтуїтивного дизайну для взаємодії мозку з комп'ютерними системами, що вимагає від дизайнера оптимізації як апаратних, так і програмних компонентів.

Мета статті полягає в аналізі розвитку дизайну нейрокомп'ютерних інтерфейсів, охоплюючи їх історичний контекст, технологічні основи, принципи функціонування та сучасні тенденції. Окрема увага приділяється розгляду впливу таких факторів, як обробка мозкових сигналів, мінімізація перешкод, адаптивність інтерфейсів завдяки штучному інтелекту, а також інтеграція нейрокомп'ютерних інтерфейсів з іншими технологіями, такими як віртуальна (VR) та доповнена реальність (AR). Значну увагу приділено ергономіці, зокрема, фізичному та психологічному комфорту користувачів, що досягається завдяки вдосконаленню дизайну гарнітур та матеріалів.

Узагальнені результати показують, що розвиток дизайну НКИ безпосередньо залежить від технічних інновацій у галузі сенсорів, алгоритмів обробки сигналів та застосування штучного інтелекту, які дозволяють створювати інтуїтивно зрозумілі й точні інтерфейси. Перспективи подальших досліджень охоплюють розробку дизайнерських рішень для інтеграції НКИ з іншими технологіями, розвиток мобільних і портативних систем, а також створення біологічно інтегрованих інтерфейсів для медичних і реабілітаційних цілей. Стаття обґрунтовує важливість міждисциплінарного підходу в розробці НКИ, що дозволить досягти нових висот у створенні більш точних, функціональних та зручних інтерфейсів для широкого спектра застосувань.

Ключові слова: нейрокомп'ютерний інтерфейс, цифрові системи, бездротові технології, інклюзивний дизайн, штучний інтелект.

Denys POGORELCHUK,
orcid.org/0009-0008-8706-634X
PhD student at the Department of Design of Environment
Kharkiv State Academy of Design and Arts
(Kharkiv, Ukraine) *dr.pogorelchuk@gmail.com*

DESIGN OF BRAIN-COMPUTER INTERFACES: HISTORY AND PRESENT

The study examines the development of brain-computer interfaces (BCI), starting from early prototypes in the mid-20th century to modern integrated systems that have significantly improved due to innovations in sensor technologies and artificial intelligence. The focus of the issue is on the complexity of creating an effective and intuitive design for brain-computer interaction, which requires the designer to optimize both hardware and software components.

The aim of the article is to analyze the development of brain-computer interface design, covering their historical context, technological foundations, principles of operation, and current trends. Particular attention is paid to the impact of factors such as brain signal processing, minimizing interference, interface adaptability through artificial intelligence, and the integration of brain-computer interfaces with other technologies, such as virtual reality (VR) and augmented reality (AR). Significant emphasis is placed on ergonomics, particularly the physical and psychological comfort of users, achieved through the improvement of headset designs and materials.

The summarized results show that the development of BCI design is directly dependent on technical innovations in the field of sensors, signal processing algorithms, and the application of artificial intelligence, which enable the creation of intuitive and accurate interfaces. The prospects for further research encompass the development of design solutions for integrating BCIs with other technologies, the advancement of mobile and portable systems, and the creation of biologically integrated interfaces for medical and rehabilitation purposes. The article emphasizes the importance of an interdisciplinary approach in the development of BCIs, which will allow for new heights in creating more accurate, functional, and user-friendly interfaces for a wide range of applications.

Key words: brain-computer interface, digital systems, wireless technologies, inclusive design, artificial intelligence.

Постановка проблеми. Нейрокомп'ютерний інтерфейс (НКИ), або Brain-Computer Interface (BCI) – це інноваційна технологія, що дозволяє здійснювати прямий обмін інформацією між мозком людини та зовнішніми пристроями. Проте, незважаючи на величезний потенціал цієї технології, її широке впровадження обмежується рядом проблем. Однією з них є відсутність ефективного, інтуїтивного та привабливого дизайну, а також інтеграції з іншими сучасними технологіями такими як штучний інтелект (ШІ), системи віртуальної (VR) та доповненої (AR) реальності. Ретроспективний огляд НКИ дозволяє простежити еволюцію концепцій, технологій і методів, які стали фундаментом для сучасних дизайнерських рішень у цій галузі, а також висвітлити основні віхи на шляху від теоретичних моделей до реальних застосувань, що дозволить краще зрозуміти поточні виклики та окреслити перспективи розвитку дизайну НКИ.

Аналіз досліджень. Останні дослідження у сфері дизайну нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКИ) зосереджені на вдосконаленні конструкторських принципів, на яких базується дизайн технологій взаємодії між мозком та комп'ютерними системами. Роботи вітчизняних дослідників Михальчука (2022), Глибовця та ін. (2024) підкреслюють важливість дизайну, орієнтованого на інтеграцію з іншими цифровими системами та оптимізацію взаємодії з користувачами. У дослідженні Belwafi та співавторів (2021) значну увагу приділено ергономіці пристроїв, які забезпечують комфорт користувачів, особливо в медичних і реабілітаційних цілях. Крім того, технологічні аспекти НКИ, які впливають на зручність та зниження навантаження на користувача, описані у роботі Ortiz-Rosario (2013). Одним з ключових аспектів є точність обробки ЕЕГ сигналів та оптимізація вибору каналів для підвищення ефективності НКИ, що підкреслюється у роботах Abdullah та Islam (2022). Важливість адаптивного дизайну, що враховує індивідуальні особливості мозкової активності, також стала об'єктом вивчення Mitsea та ін. (2023). Дослідження вказують на необхідність подальшого розвитку дизайну НКИ з акцентом на ергономічність, адаптивність та точність, що сприятиме створенню комфортних та ефективних систем для взаємодії мозку з комп'ютерами.

Мета статті — аналіз розвитку дизайну нейрокомп'ютерних інтерфейсів, охоплюючи їх історичний контекст, технологічні основи, принципи функціонування та сучасні тенденції.

Виклад основного матеріалу. Розвиток дизайну нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКИ) відображає багаторічний шлях розвитку техноло-

гії, починаючи з перших концептуальних моделей і до сучасних високотехнологічних рішень. Перші дослідження у цій галузі розпочалися в середині ХХ століття, коли науковці почали розуміти принципи електричної активності мозку. Одним з ранніх досягнень було виявлення можливості зчитування електроенцефалограми (ЕЕГ), що стало основою для створення перших прототипів НКИ. У цих ранніх системах акцент робився на зчитування простих мозкових сигналів з метою управління базовими комп'ютерними операціями.

На ранніх етапах (у 1940-х – 60-х рр.) дизайн НКИ був переважно експериментальним і обмежувався громіздким обладнанням з електродами, що кріпилися до шкіри голови для зчитування сигналів ЕЕГ. Пристрої мали низьку точність, а їх використання було обмежено лабораторними умовами через технічну складність і громіздкість. Основний акцент у дизайні був на забезпеченні функціональності, з мінімальним увагою до зручності користувача.

У 1980-х роках відбулося значне вдосконалення в розумінні мозкових процесів, а також в обробці сигналів. Зокрема, розробка технологій більш точного зчитування та інтерпретації мозкових сигналів дозволила розширити можливості НКИ. Підходи до дизайну стали більш зосередженими на зменшенні розмірів обладнання та поліпшенні його функціональних характеристик. Тоді ж почали з'являтися спроби створення більш компактних і мобільних пристроїв, що дозволяло використовувати їх не лише в лабораторіях, але й у клінічних умовах. Було розроблено кілька пристроїв для реабілітації пацієнтів з обмеженими можливостями (Глибовець та ін., 2024: 49).

Початок ХХІ століття став періодом прориву в дизайні НКИ завдяки розвитку цифрових технологій та обчислювальних потужностей. Це дозволило значно зменшити розміри пристроїв та поліпшити їхню ергономіку. Зокрема, з'явилися гарнітури з електродами, що можна було легко надягати та використовувати без складного налаштування. На цьому етапі акцент у дизайні почав зміщуватися з чисто функціональної складової на забезпечення зручності для користувача. Важливим аспектом стало забезпечення більш природної та інтуїтивної взаємодії між користувачем та НКИ. Також дизайн почав враховувати різні сценарії використання, наприклад, у медицині, іграх та комунікаціях.

Сучасний етап розвитку НКИ характеризується значною мініатюризацією та поліпшенням дизайну з точки зору ергономіки та естетики. Інтерфейси стали легшими, бездротовими та більш адаптованими до щоденного використання. Дизайн став

бути орієнтованим на зручність, естетичну привабливість та персоналізацію. Новітні нейрогарнітури мають інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що дозволяє користувачам легко налаштовувати систему під власні потреби. Сучасні НКІ активно інтегруються з іншими технологіями, такими як доповнена реальність, штучний інтелект та інтернет речей (IoT), що вимагає подальшого вдосконалення дизайну для забезпечення безшовної взаємодії між користувачем та пристроєм (Ortiz-Rosario, 2013: 4–5).

Технологічні основи та принципи дизайну нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКІ) базуються на двох ключових складових: апаратній та програмній:

– Апаратна частина включає сенсори для зчитування мозкової активності, найчастіше використовуються електроенцефалограми (ЕЕГ). Електроди можуть бути як неінвазивними (закріплені на поверхні шкіри), так і інвазивними (впроваджені у мозок). Дизайн апаратних засобів зосереджений на забезпеченні точного вимірювання сигналів, мінімізації перешкод і забезпеченні комфорту користувача. Бездротові сенсори стають дедалі популярнішими для підвищення мобільності системи.

– Програмна частина базується на алгоритмах обробки сигналів, які дозволяють виділяти корисну інформацію з мозкових хвиль. Алгоритми фільтрації шумів, класифікації та машинного навчання забезпечують точну інтерпретацію мозкових сигналів. Це впливає на дизайн системи, оскільки вимагає оптимізації інтерфейсу для швидкого зворотного зв'язку та адаптації до індивідуальних особливостей мозкової активності користувача (Belwafi et al., 2021).

Слід зазначити, що ергономіка та зручність використання нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКІ) є критичними аспектами дизайну, оскільки безпосередньо впливають на ефективність та прийняття технології користувачами. Фізичний комфорт визначається, перш за все, зручністю носіння електродів і гарнітури. Сучасні НКІ гарнітури розробляються з легких, гнучких і дихаючих матеріалів, що дозволяють зменшити тиск на шкіру голови й уникнути подразнень при тривалому використанні. Використання неінвазивних електродів з м'якими контактами підвищує комфорт під час налаштування системи.

Зручність форми пристроїв також важлива для адаптації до різних типів голови та забезпечення стійкого контакту електродів з шкірою для кращого зчитування сигналів. Модульність дизайну дозволяє адаптувати гарнітури до індивідуальних потреб користувача.

Психологічний комфорт досягається завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу та мінімізації когнітивного навантаження. Оптимізація дизайну для створення дружнього до користувача досвіду, включаючи простоту взаємодії та ненав'язливість гарнітури, сприяє позитивному сприйняттю НКІ і його ефективному використанню в різних сферах, від медицини до розваг (Mitsea et al., 2023).

Мінімізація перешкод у дизайні нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКІ) є важливим завданням для забезпечення точності зчитування та передачі мозкових сигналів. Оскільки мозкові сигнали слабкі й легко піддаються впливу зовнішніх шумів, зокрема електромагнітних перешкод та рухових артефактів, розробники зосереджуються на оптимізації як апаратної, так і програмної складових.

Апаратна оптимізація:

1. Використання високочутливих електродів з мінімальним опором сприяє покращенню точності зчитування сигналів. Інвазивні електроди можуть забезпечити більш чисті сигнали, однак у неінвазивних системах використовуються вдосконалені матеріали, такі як сухі електроди, що не потребують гелів, для покращення контакту зі шкірою та зменшення артефактів.

2. Інтеграція захисних екранів або фільтрів для зменшення впливу зовнішніх електромагнітних полів (наприклад, від мобільних пристроїв або електричних приладів) дозволяє мінімізувати зовнішній шум. Це особливо важливо для забезпечення точності під час використання НКІ в умовах з великою кількістю електронних пристроїв.

3. Дизайн гарнітури, що забезпечує надійну фіксацію електродів на шкірі голови, допомагає уникнути шумів, пов'язаних з рухом електродів. Регульовані, але стабільні конструкції мінімізують артефакти від мікрорухів, таких як моргання очей чи напруга м'язів (Simon et al., 2021).

Програмна оптимізація:

1. Використання цифрових фільтрів дозволяє очищати сигнали від низькочастотних (0–1 Гц) або високочастотних перешкод, таких як артефакти від м'язової активності або електричної інтерференції. Фільтри, наприклад, смуговий фільтр або фільтр Гільберта, є важливими для очищення даних та зниження рівня шумів.

2. Алгоритми видалення артефактів, такі як незалежний компонентний аналіз (ICA) або головні компоненти (PCA), дозволяють автоматично виділяти й усувати артефакти, спричинені морганням, рухами м'язів або іншими незначними рухами, що покращує точність обробки мозкових сигналів.

Алгоритми машинного навчання можуть бути використані для навчання системи розпізнаванню типових шумів та артефактів, що дозволяє автоматично адаптувати систему до конкретних користувачів. Це зменшує вплив індивідуальних особливостей, таких як частота моргання чи рухів голови, на точність роботи НКІ (Abdullah, Islam, 2022: 726–727).

Деякі сучасні НКІ використовують гібридні підходи, де поєднуються кілька методів мінімізації шуму. Наприклад, паралельне використання різних типів сенсорів, таких як ЕЕГ разом з магнітоенцефалографією (МЕГ), дозволяє більш точно визначати джерело сигналу й мінімізувати вплив зовнішніх шумів. Цей підхід забезпечує більшу точність, але значно ускладнює дизайн системи.

Мінімізація перешкод залишається одним із ключових викликів у розвитку НКІ. Подальші інновації можуть включати розвиток нових матеріалів для сенсорів, глибше використання штучного інтелекту для адаптації до шумів у реальному часі та інтеграцію нових методів захисту від перешкод, що сприятиме покращенню точності та надійності НКІ (Михальчук, 2022: 40).

Використання штучного інтелекту (ШІ) у дизайні нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКІ) відіграє вирішальну роль у створенні адаптивних, інтуїтивних і персоналізованих інтерфейсів, що суттєво покращують досвід користувача.

ШІ дозволяє НКІ автоматично адаптуватися до індивідуальних особливостей мозкової активності користувача. Мозкові сигнали можуть відрізнятися у різних людей через такі фактори, як вік, стан здоров'я або рівень концентрації. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє НКІ навчатися на базі сигналів конкретного користувача, коригуючи зчитування і обробку даних. Це покращує точність інтерфейсу, роблячи його більш індивідуалізованим.

Алгоритми ШІ здатні розпізнавати та класифікувати складні патерни мозкових сигналів, що робить НКІ більш чутливими і точними. Наприклад, глибоке навчання може використовуватися для ідентифікації специфічних станів мозку, таких як зосередженість чи розслабленість, що відкриває можливості для широкого застосування НКІ, включаючи медицину та ігрову індустрію (Belwafi et al., 2021).

Завдяки ШІ, НКІ можуть ставати більш інтуїтивними у взаємодії з користувачем. Це означає, що інтерфейс може передбачати дії користувача на основі попереднього досвіду та контексту. Наприклад, в адаптивних системах НКІ для управління пристроями ШІ аналізує поведінкові патерни

користувача і може запропонувати найбільш ймовірні команди або дії, мінімізуючи необхідність в активних взаємодіях і скорочуючи час на прийняття рішень.

Інтерфейси, які навчаються на основі мозкових сигналів, дозволяють ШІ постійно вдосконалювати взаємодію, полегшуючи роботу користувача і знижуючи когнітивне навантаження. Це критично важливо для тих, хто використовує НКІ для реабілітації чи управління пристроями, оскільки зменшує кількість помилкових команд і збільшує точність виконання завдань.

У практичному контексті ШІ дозволяє створювати НКІ, які легко інтегруються у повсякденні завдання. Наприклад, у системах для людей з обмеженими можливостями НКІ, підсилені ШІ, можуть вивчати індивідуальні моделі нейронної активності, що дозволяє безпомилково керувати технологіями, такими як колісні крісла або комп'ютери.

Хоча ШІ відкриває нові можливості для розвитку НКІ, є і технічні виклики, пов'язані з вимогами до обчислювальних потужностей і потребою у великих масивах даних для навчання моделей. Однак, подальші дослідження у цій галузі дозволять зробити НКІ ще більш адаптивними і легкими у використанні, інтегруючи їх у різноманітні сфери життя.

Перспективи розвитку дизайну нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКІ) визначаються низкою інноваційних тенденцій, що об'єднують новітні технології та підходи до інтерактивного дизайну. Основними напрямками розвитку є інтеграція з іншими інтерфейсами, такими як віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR), та розширення функціональних можливостей НКІ для різних сфер застосування.

Віртуальна реальність може підвищити ефективність тренувань, реабілітаційних програм та ігрових застосувань, де користувачі керують об'єктами або рухами віртуальних персонажів за допомогою своїх думок. Це суттєво зменшує залежність від фізичних контролерів та робить взаємодію більш природною.

У AR НКІ можуть використовуватися для управління доповненими об'єктами, зокрема для професійних або освітніх завдань, наприклад, у хірургії, де лікар може керувати візуалізацією медичних даних без необхідності торкатися пристроїв (Mitsea et al., 2023).

Перспективним напрямком є розвиток мультинтерфейсних систем, де НКІ поєднуються з іншими видами інтерфейсів, такими як голосові команди або тактильні сигнали. Це створює

гібридні системи, де різні інтерфейси працюють синхронно для поліпшення користувацького досвіду. Наприклад, користувач може одночасно використовувати НКІ для навігації та голос для введення команд. Такий підхід підвищує зручність і функціональність систем.

Ще однією важливою тенденцією є розробка мобільних та портативних НКІ, що можуть бути використані в повсякденному житті. З розвитком бездротових технологій, НКІ стають менш громіздкими, що дозволяє легко інтегрувати їх у повсякденні пристрої, такі як смартфони або смарт-окуляри. Це значно розширює потенційні застосування НКІ, роблячи їх доступними для масового користувача (Belwafi et al., 2021).

Перспективним напрямком також є розробка біологічно інтегрованих НКІ, де системи можуть інтегруватися з нервовими тканинами для більш точного зчитування сигналів та зворотного зв'язку. Це відкриває шлях до створення інтерфейсів для протезів або медичних імплантатів, що керуються мозковою активністю (Simon et al., 2021).

Інтеграція НКІ із застосуванням принципів нейропластичності – здатності мозку адаптуватися до нових умов – є ще одним перспективним напрямком. Це дозволить створювати інтерфейси, що сприяють навчанню мозку новим функціям і поліпшенню нейронних зв'язків, що особливо корисно у медичній реабілітації.

На практиці ці тенденції можуть застосовуватися у різних сферах. У медичній галузі НКІ можуть інтегруватися з протезами кінцівок, дозволяючи пацієнтам управляти ними за допомогою мозкових сигналів. В галузі освіти VR та AR технології разом із НКІ можуть використовуватися для підвищення ефективності навчання. Ігрова індустрія та розваги також є великим полем для застосування інтуїтивних і адаптивних НКІ, що поліпшить взаємодію з віртуальними світами (Михальчук, 2022: 42–43).

Висновки. Підсумовуючи зазначене вище, можемо констатувати, що нейрокомп'ютерні інтерфейси (НКІ) є ключовою технологією майбутнього, яка активно розвивається на перетині нейронаук, інженерії та дизайну. Історичний огляд розвитку НКІ показує значні зміни в підходах до дизайну систем, починаючи з простих експериментальних прототипів до складних і високотехнологічних систем, інтегрованих з іншими інтерфейсами, такими як віртуальна та доповнена реальність.

Сучасний дизайн НКІ базується на технологічних основах, що включають сенсори для зчитування мозкової активності та алгоритми обробки сигналів. Розвиток цих компонентів суттєво впливає на ергономіку, зручність використання і точність систем. У процесі вдосконалення дизайну увага приділяється мінімізації перешкод і шумів, що покращує передачу сигналів і ефективність взаємодії.

Штучний інтелект (ШІ) відіграє вирішальну роль у створенні адаптивних і персоналізованих інтерфейсів, здатних навчатися на основі індивідуальних особливостей користувачів. Завдяки цьому НКІ стають більш інтуїтивними та простими у використанні, що розширює їх застосування у різних галузях, від медицини до розваг.

Інтеграція НКІ з технологіями віртуальної та доповненої реальності, а також розвиток мобільних і портативних систем відкриють нові горизонти для використання НКІ у повсякденному житті. Крім того, розвиток біологічно інтегрованих інтерфейсів та використання нейропластичності матиме велике значення для реабілітаційних програм та медичних імплантатів.

Таким чином, подальші дослідження та розробки у сфері дизайну НКІ повинні спрямовуватися на покращення користувацького досвіду, інтеграцію різних технологій і забезпечення адаптивності інтерфейсів, а також мати міждисциплінарний характер, що значно розширить їх потенціал у різних галузях людської діяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Глибовець А. М., Хмель С. М., Печкурова О. М. Використання нейрокомп'ютерних інтерфейсів для збирання та накопичення інформації про користувачів веб-ресурсів. *NRPCOMP*. 2024. Т. 6. С. 48–56.
2. Михальчук В. Перспективи розвитку нейрокомп'ютерних інтерфейсів у електронному суспільстві. *Управління розвитком складних систем*. 2022. № 50. С. 39–43.
3. Abdullah F. I., Islam M. R. EEG Channel Selection Techniques in Motor Imagery Applications: *A Review and New Perspectives*. *Bioengineering*. 2022. № 9. P. 726–727.
4. Belwafi K., Gannouni S., Aboalsamh H. Embedded Brain Computer Interface: State-of-the-Art in Research. *Sensors*. 2021. № 21. P. 1–20.
5. Mitsea El., Drigas Ath., Skianis Ch. Brain-computer interfaces in digital mindfulness training for metacognitive, emotional and attention regulation skills: a literature review. *Research, Society and Development*. 2023. № 3. P. 1–25.
6. Ortiz-Rosario Al., Adeli H. Brain-computer interface technologies: from signal to action. *Rev Neuroscience*. 2013. vol. 24, № 5. P. 537–552.
7. Simon C., Bolton D. A. E., Kennedy N. C. et al. Challenges and Opportunities for the Future of Brain-Computer Interface in Neurorehabilitation. *Frontiers in Neuroscience*. 2021. № 15. P. 1–8.

REFERENCES

1. Hlybovets, A. M., Khmel, S. M., & Piechkurova, O. M. (2024). Vykorystannia neirokompiuternykh interfeysiv dlia zbyrannia ta nakopychennia informatsii pro korystuvachiv veb-resursiv [The use of neurocomputer interfaces for collecting and accumulating information about web resource users]. *NRPCOMP*, 6, 48–56. [in Ukrainian].
2. Mykhalchuk, V. (2022). Perspektyvy rozvytku neirokompiuternykh interfeysiv u elektronnomu suspilstvi [Perspectives on the development of neurocomputer interfaces in an electronic society]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system -Management of Complex Systems Development*, (50), 39–43. [in Ukrainian].
3. Abdullah, F. I., & Islam, M. R. (2022). EEG channel selection techniques in motor imagery applications: A review and new perspectives. *Bioengineering*, 9, 726–727.
4. Belwafi, K., Gannouni, S., & Aboalsamh, H. (2021). Embedded brain computer interface: State-of-the-art in research. *Sensors*, 21, 1–20.
5. Mitsea, El., Drigas, Ath., & Skianis, Ch. (2023). Brain-computer interfaces in digital mindfulness training for metacognitive, emotional, and attention regulation skills: A literature review. *Research, Society and Development*, 3, 1–25.
6. Ortiz-Rosario, A., & Adeli, H. (2013). Brain-computer interface technologies: From signal to action. *Rev Neuroscience*, 24 (5), 537–552.
7. Simon, C., Bolton, D. A. E., Kennedy, N. C., et al. (2021). Challenges and opportunities for the future of brain-computer interface in neurorehabilitation. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 1–8.