

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

КЛЮЧОВІ ПРИНЦИПИ ІНКЛЮЗИВНОГО ДИЗАЙНУ АДАПТИВНИХ НЕЙРОКОМП'ЮТЕРНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

У статті досліджується міждисциплінарна проблема розробки універсальних нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКИ) для створення інклюзивних та динамічно адаптивних систем, здатних враховувати унікальні потреби широкого кола користувачів.

Постановка проблеми полягає у необхідності створення універсальних нейрокомп'ютерних інтерфейсів, які могли б ефективно працювати з різними групами користувачів, адаптуючись до індивідуальних особливостей та контексту використання.

Мета статті – сформулювати набір принципів інклюзивного дизайну адаптивних НКИ, а також запропонувати практичні підходи та методики їх реалізації на основі сучасних технологічних рішень у сфері штучного інтелекту, доповненої та віртуальної реальності, тощо.

На основі аналізу сучасних досліджень у галузі нейрокомп'ютерних інтерфейсів та принципів інклюзивного дизайну, сформульованих у роботах провідних дослідників було виділено п'ять ключових принципів проектування адаптивних НКИ.

Для практичної реалізації цих принципів запропоновано використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування потреб користувача, впровадження модульної архітектури дизайну для швидкої адаптації інтерфейсу, забезпечення інтуїтивності взаємодії через мультимодальні канали зворотного зв'язку, створення персоналізованих профілів користувачів з урахуванням їхніх унікальних фізіологічних та психологічних характеристик, залучення технологій доповненої та віртуальної реальності, розробки методології користувацьких досліджень та забезпечення конфіденційності даних.

Зроблено висновок, що майбутній розвиток галузі залежить від міждисциплінарної співпраці та потребує подальших досліджень довгострокового впливу нейрокомп'ютерних інтерфейсів на людину та впровадження міжнародних стандартів інклюзивного дизайну, що забезпечить етичне та ефективне впровадження цих технологій.

Ключові слова: *інклюзивний дизайн, адаптивний інтерфейс, нейрокомп'ютерний інтерфейс, доступність, 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*

KEY PRINCIPLES OF INCLUSIVE DESIGN FOR ADAPTIVE BRAIN-COMPUTER INTERFACES

The article examines the interdisciplinary problem of developing universal brain-computer interfaces (BCIs) for creating inclusive and dynamically adaptive systems capable of addressing the unique needs of a wide range of users.

The problem statement lies in the necessity of creating universal brain-computer interfaces that could effectively work with different user groups, adapting to individual characteristics and usage context.

The article's objective is to formulate a set of principles for inclusive design of adaptive BCIs, as well as to propose practical approaches and methodologies for their implementation based on modern technological solutions in the field of artificial intelligence, augmented and virtual reality, etc.

Based on the analysis of contemporary research in the field of brain-computer interfaces and principles of inclusive design formulated in the works of leading researchers, five key principles for designing adaptive BCIs were identified.

For practical implementation of these principles, the use of machine learning algorithms for predicting user needs is proposed, along with implementing modular design architecture for rapid interface adaptation, ensuring intuitive interaction through multimodal feedback channels, creating personalized user profiles taking into account their unique physiological and psychological characteristics, incorporating augmented and virtual reality technologies, developing user research methodology, and ensuring data privacy.

The conclusion was drawn that the future development of the field depends on interdisciplinary collaboration and requires further research into the long-term impact of brain-computer interfaces on humans and the implementation of international standards for inclusive design, which will ensure ethical and effective deployment of these technologies.

Key words: inclusive design, adaptive interface, brain-computer interface, accessibility, artificial intelligence.

Постановка проблеми полягає у необхідності створення універсальних нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКИ), які могли б ефективно працювати з різними групами користувачів, адаптуючись до індивідуальних особливостей та контексту використання.

Аналіз досліджень. Аналіз наукових праць свідчить про зростаючий інтерес до проблем адаптивності та інклюзивності нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКИ). Сучасний розвиток цієї галузі базується на фундаментальних концепціях універсального та інклюзивного дизайну, а також на досягненнях у сферах машинного навчання та нейронауки.

Основи для розробки доступних технологій були закладені ще у 1980-х роках Роном Мейсом, який сформулював принципи універсального дизайну, що передбачали створення продуктів та середовищ, придатних для використання якомога більшою кількістю людей без необхідності адаптації чи спеціалізованого дизайну (Масе, 1985). Ця концепція еволюціонувала в інклюзивний дизайн, який, як зазначають дослідники, робить акцент на врахуванні різноманіття індивідуальних потреб та здібностей, що є критично важливим для НКИ (Norman, 2013).

Ранні та фундаментальні дослідження в галузі НКИ, проведені такими вченими, як Wolpaw, встановили, що ефективність цих систем безпосередньо залежить від індивідуальних нейрофізіологічних особливостей користувача (Wolpaw, Wolpaw, 2012). Це відкриття підкреслило гостру необхідність в адаптивних підходах. Роботи Donchin та співавторів підтвердили цю тезу, вказавши на унікальність патернів нейронної активності кожної людини, що формуються завдяки нейропластичності мозку (Donchin et al., 2000). Таким чином, була сформована наукова база для переходу від статичних до динамічно адаптивних інтерфейсів.

Теоретичну основу для створення таких адаптивних систем заклали праці в галузі машинного навчання. Blankertz та співавтори продемонстрували, що саме алгоритми штучного інтелекту дозволяють системі НКИ навчатися на основі досвіду взаємодії з конкретним користувачем, підвищуючи свою точність та ефективність (Blankertz et al., 2010). Подальший розвиток, зокрема застосування глибокого навчання, відкрив можливості для розпізнавання надзвичайно складних патернів мозкової активності (LeCun et al., 2015).

Дослідження L. Findlater та J. McGrenere показали, що здатність інтерфейсу автоматично налаштовуватися під користувача в режимі реального часу є ключовою характеристикою ефективної системи (Findlater, McGrenere, 2004). Цю ідею розвинули C. Vidaurre та B. Blankertz, які наголосили на важливості надання користувачам широкого спектру параметрів для індивідуального налаштування – від візуальних елементів до складних алгоритмів обробки сигналів (Vidaurre, Blankertz, 2010).

Практична реалізація адаптивних механізмів стала предметом численних досліджень. Було запропоновано використовувати алгоритми онлайн-навчання для постійної корекції параметрів системи (Shenoy et al., 2006) та методи трансферного навчання для швидкої адаптації попередньо навчених моделей до нових користувачів, що є особливо важливим для людей з обмеженими можливостями (Krauledat et al., 2008).

Ідеї модульної архітектури (Gao et al., 2003) та мультимодального зворотного зв'язку (Dornhege et al., 2007) були запропоновані як ефективні способи забезпечення гнучкості, персоналізації та доступності НКИ для користувачів із сенсорними порушеннями.

Важливий внесок у розуміння важливості користувацького досвіду (UX) зробили класичні роботи Якоба Нільсена про простоту та інтуїтивність інтерфейсів (Nielsen, 1994), принципи якого залишаються актуальними і для НКИ. Дослідження, сфокусовані безпосередньо на НКИ, підкреслили необхідність оцінки когнітивного навантаження, втоми та психологічного комфорту (Kübler et al., 2001) та залучення кінцевих користувачів до процесу розробки за принципами співтворчості (Wolpaw, Wolpaw, 2012).

Роботи M. J. Farah (2015), M. Ienca та P. Haselager (2016) акцентують увагу на проблемах приватності нейроданих, інформованої згоди, автономії користувача та ризиках поглиблення соціальної нерівності через впровадження нейротехнологій.

Отже, аналіз наукової літератури показує, що створення інклюзивних адаптивних НКИ є міждисциплінарною задачею, яка лежить на перетині комп'ютерних наук, нейробіології, інженерії та дизайну. Сучасні дослідження однозначно вказують на відхід від уніфікованих рішень на користь персоналізованих, динамічно адаптивних систем,

що враховують унікальні потреби та характеристики кожного користувача. Однак, незважаючи на значний прогрес, питання розробки стандартизованих протоколів інклюзивного дизайну для НКІ (Brunner et al., 2015) та проведення довгострокових досліджень впливу цих технологій на людину (Daly, Wolpaw, 2008) залишаються відкритими і потребують подальшого вивчення.

Мета статті – сформулювати набір принципів інклюзивного дизайну адаптивних НКІ, а також запропонувати практичні підходи та методики їх реалізації на основі сучасних технологічних рішень у сфері штучного інтелекту, доповненої та віртуальної реальності, тощо.

Виклад основного матеріалу. Сучасний розвиток нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКІ) відкриває безпрецедентні можливості для створення засобів взаємодії людини з комп'ютерними системами, що базуються на прямому зчитуванні та інтерпретації мозкової активності. Проте, існуючі рішення часто орієнтовані на вузькі групи користувачів і не враховують різноманіття індивідуальних потреб та здібностей людей з різними фізичними, сенсорними та когнітивними особливостями. Адаптивність інтерфейсу стає критично важливою характеристикою, яка дозволяє системі автоматично налаштовуватися під індивідуальні особливості користувача в режимі реального часу (Findlater, McGrenere, 2004).

Концепція інклюзивного дизайну виникла як розвиток ідей універсального дизайну, сформульованих Ронам Мейсом у 1980-х роках (Mace, 1985: 15). Застосування цих принципів до галузі нейрокомп'ютерних інтерфейсів потребує переосмислення традиційних підходів до проектування систем взаємодії людини з комп'ютером. Сучасні дослідження показують, що ефективність НКІ суттєво залежить від індивідуальних нейрофізіологічних особливостей користувача, що робить питання адаптивності особливо актуальним (Wolpaw, Wolpaw, 2012: 123).

Інклюзивний підхід до проектування НКІ базується на розумінні того, що нейропластичність мозку та індивідуальні особливості нейронної активності створюють унікальні паттерни для кожного користувача (Donchin et al., 2000). Це означає, що ефективний НКІ повинен не лише враховувати статичні характеристики користувача, але й динамічно адаптуватися до змін у його стані, настрої, рівні втоми та інших факторів, що впливають на якість нейросигналів.

Теоретичну основу адаптивних НКІ становлять принципи машинного навчання та штучного інтелекту, які дозволяють системі навчатися на основі

накопиченого досвіду взаємодії з конкретним користувачем (Blankertz et al., 2010). Використання алгоритмів глибокого навчання відкриває можливості для створення систем, здатних розпізнавати складні паттерни мозкової активності та прогнозувати наміри користувача з високою точністю.

На основі аналізу сучасних досліджень у галузі нейрокомп'ютерних інтерфейсів та принципів інклюзивного дизайну, сформульованих у роботах провідних дослідників (Stephanidis, Savidis, 2001; Nielsen, 1994; Müller-Putz et al., 2008), можна виділити п'ять ключових принципів проектування адаптивних НКІ. Ці принципи синтезують теоретичні засади універсального дизайну Рона Мейса з практичними вимогами до нейротехнологічних систем, враховуючи специфіку взаємодії людського мозку з комп'ютерними інтерфейсами.

Перший принцип інклюзивного дизайну адаптивних НКІ полягає у забезпеченні універсальної доступності інтерфейсу для користувачів з різними типами та рівнями обмежень. Це передбачає створення мультимодальних каналів взаємодії, які можуть компенсувати недоліки одного сенсорного каналу за рахунок інших (Stephanidis, Savidis, 2001: 44). Наприклад, для користувачів з порушеннями зору система може використовувати тактильний або аудіальний зворотний зв'язок, тоді як для людей з порушеннями слуху – візуальні сигнали.

Другий принцип стосується гнучкості використання та можливості налаштування інтерфейсу відповідно до індивідуальних потреб та переваг користувача. Адаптивні НКІ повинні забезпечувати широкий спектр параметрів налаштування, від базових елементів інтерфейсу до складних алгоритмів обробки нейросигналів (Vidaurre, Blankertz, 2010: 196). Це включає можливість зміни розміру та контрастності візуальних елементів, швидкості реакції системи, рівня деталізації зворотного зв'язку та інших параметрів.

Третій принцип визначає необхідність простоти та інтуїтивності використання НКІ. Складність нейротехнологій не повинна перекладатися на користувача у вигляді складного інтерфейсу (Nielsen, 1994: 78). Система повинна мінімізувати когнітивне навантаження на користувача, забезпечуючи природну та інтуїтивну взаємодію. Це особливо важливо для користувачів з когнітивними порушеннями, які можуть мати труднощі з освоєнням складних інтерфейсів.

Четвертий принцип стосується персоналізації та адаптації системи до індивідуальних особливостей кожного користувача. Адаптивні НКІ

повинні створювати та постійно оновлювати профілі користувачів, які включають не лише технічні параметри налаштування, але й інформацію про особливості нейрофізіологічних реакцій, когнітивні здібності, фізичні обмеження та користувацькі переваги (Müller-Putz et al., 2008: 234).

П'ятий принцип підкреслює важливість забезпечення надійності та стабільності роботи НКІ в різних умовах використання. Система повинна ефективно функціонувати незалежно від зовнішніх факторів, таких як електромагнітні перешкоди, зміни освітлення, рівень шуму або фізичний стан користувача (Schalk et al., 2004: 1043).

Реалізація адаптивних механізмів у НКІ потребує використання сучасних технологій машинного навчання та штучного інтелекту. Ключовим підходом є застосування алгоритмів онлайн-навчання, які дозволяють системі постійно адаптуватися до змін у нейросигналах користувача (Shenoy et al., 2006). Ці алгоритми здатні виявляти тренди в даних та автоматично корегувати параметри обробки сигналів для підтримання оптимальної ефективності інтерфейсу. Важливим аспектом є використання методів трансферного навчання, які дозволяють адаптувати попередньо навчені моделі до специфічних особливостей нового користувача з мінімальною кількістю калібрувальних даних (Krauledat et al., 2008: 167). Це особливо важливо для користувачів з обмеженими можливостями, для яких тривалі сесії калібрування можуть бути фізично або психологічно важкими.

Модульна архітектура системи забезпечує гнучкість та можливість швидкої адаптації різних компонентів НКІ. Кожен модуль може бути незалежно налаштований та оптимізований для конкретного користувача, що дозволяє створювати персоналізовані конфігурації системи (Gao et al., 2003: 137). Така архітектура також спрощує процес оновлення та удосконалення окремих компонентів без необхідності переробки всієї системи. Використання мультимодального зворотного зв'язку дозволяє системі комунікувати з користувачем через різні сенсорні канали одночасно, що підвищує ефективність взаємодії та забезпечує доступність для користувачів з різними типами сенсорних порушень (Dornhege et al., 2007). Система може динамічно обирати найбільш підходящі канали зворотного зв'язку залежно від поточного стану користувача та умов навколишнього середовища.

Технічна реалізація інклюзивних адаптивних НКІ потребує інтеграції декількох ключових технологічних компонентів. Передовсім, це стосується розробки високоякісних систем реєстрації

нейросигналів, здатних працювати в різних умовах та з різними типами користувачів (McFarland et al., 2006). Сучасні електроенцефалографічні системи повинні забезпечувати високу роздільну здатність як у часовій, так і в просторовій областях, мінімізуючи при цьому дискомфорт для користувача. Ключовою вимогою є розробка адаптивних алгоритмів обробки сигналів, здатних автоматично налаштовуватися під індивідуальні особливості нейрофізіології користувача (Pfurtscheller, Neuper, 2001: 95). Ці алгоритми повинні враховувати такі фактори, як амплітуда та частотні характеристики нейросигналів, їх стабільність у часі, індивідуальні особливості топографічного розподілу активності та вплив артефактів.

Важливим аспектом є розробка інтелектуальних систем керування інтерфейсом, здатних прогнозувати наміри користувача та автоматично адаптувати параметри взаємодії. Такі системи використовують методи машинного навчання для аналізу паттернів поведінки користувача та оптимізації відповідних налаштувань інтерфейсу. Розробка адаптивного фізичного дизайну гарнітури є не менш важливою складовою успішного НКІ. Система повинна автоматично налаштовувати параметри електродів, їх розташування та контактний тиск відповідно до анатомічних особливостей користувача (Guger et al., 2009: 94). Це включає використання матеріалів з пам'яттю форми, автоматичних систем позиціонування електродів та інтелектуальних систем контролю якості сигналу.

Створення ефективного користувацького досвіду для інклюзивних адаптивних НКІ потребує глибокого розуміння потреб та обмежень різних груп користувачів. UX-дослідження в цій галузі повинні враховувати специфічні особливості взаємодії з нейротехнологіями, включаючи психологічні аспекти використання систем, що зчитують мозкову активність.

Методологія користувацьких досліджень для НКІ має включати як традиційні методи оцінки юзабіліті, так і специфічні підходи, розроблені для нейротехнологій. Це включає оцінку когнітивного навантаження, ментальної втоми, рівня стресу та психологічного комфорту під час використання системи (Kübler et al., 2001: 358). Особливу увагу слід приділяти вивченню довгострокових ефектів використання НКІ на психічне та фізичне здоров'я користувачів. Процес дизайну користувацького досвіду повинен базуватися на принципах співтворчості, залучаючи кінцевих користувачів як партнерів у процесі розробки (Wolpaw, Wolpaw, 2012: 234). Це особливо важливо для розробки

систем, призначених для людей з інвалідністю, оскільки їхній безпосередній досвід та потреби можуть кардинально відрізнятись від припущень розробників. Ітеративний підхід до тестування та удосконалення інтерфейсу дозволяє поступово покращувати систему на основі реального досвіду користувачів. Кожна ітерація повинна включати збір даних про ефективність інтерфейсу, задоволеність користувачів та виявлені проблеми, що дозволяє систематично покращувати якість системи.

Розробка інклюзивних адаптивних НКІ піднімає важливі етичні питання, пов'язані з приватністю даних, автономією користувача та потенційними ризиками використання нейротехнологій. Системи, що мають доступ до нейрофізіологічних даних користувача, повинні забезпечувати найвищий рівень захисту персональної інформації та гарантувати, що дані не можуть бути використані проти інтересів користувача.

Принцип інформованої згоди набуває особливого значення в контексті НКІ, оскільки користувачі повинні повністю розуміти, які дані збираються системою, як вони використовуються та які потенційні ризики можуть виникати (Farah, 2015). Особливо важливо забезпечити доступність та зрозумілість інформації про систему для користувачів з когнітивними порушеннями. Соціальні аспекти використання НКІ включають питання стигматизації, соціальної ізоляції та потенційного створення нових форм нерівності (Ienca, Haselager, 2016: 129). Інклюзивний дизайн повинен спрямовуватися на створення технологій, які сприяють соціальній інтеграції та покращенню якості життя користувачів, а не поглиблюють існуючі нерівності.

Використання технологій доповненої та віртуальної реальності може суттєво покращити користувацький досвід та розширити сфери застосування НКІ. Перспективним напрямом є розробка гібридних НКІ, що поєднують декілька типів біологічних сигналів для підвищення надійності та точності системи (Pfurtscheller et al., 2010). Такі системи можуть використовувати не лише електроенцефалографічні сигнали, але й електроміографію, електрокардіографію та інші фізіологічні показники для більш повного розуміння стану користувача. Важливим напрямом досліджень є вивчення довгострокових ефектів використання НКІ на нейропластичність мозку та когнітивні функції користувачів (Daly, Wolpaw, 2008). Розуміння цих процесів дозволить оптимізувати дизайн систем для максимізації позитивних ефектів та мінімізації потенційних ризиків.

Розвиток стандартів та протоколів для інклюзивного дизайну НКІ є критично важливим для забезпечення сумісності систем та гарантування високої якості користувацького досвіду (Brunner et al., 2015). Міжнародна співпраця у цій галузі може прискорити розробку ефективних рішень та забезпечити їх широке впровадження.

Висновки. Тема дизайну НКІ є активною областю досліджень, яка продовжує розвиватися та змінюватися відповідно до нових наукових відкриттів та технологічних інновацій.

Аналіз сучасних досліджень у галузі нейрокомп'ютерних інтерфейсів та принципів інклюзивного дизайну, сформульованих у роботах провідних дослідників, дозволив виділити п'ять ключових принципів проектування адаптивних НКІ: створення мультимодальних каналів взаємодії для користувачів з різними типами обмежень (зорові, слухові тощо), можливість індивідуального налаштування інтерфейсу відповідно до потреб користувача, зменшення когнітивного навантаження (особливо для користувачів з когнітивними порушеннями), створення адаптивних профілів користувача з урахуванням фізичних, когнітивних та нейрофізіологічних особливостей, а також забезпечення стабільної роботи НКІ за різних умов, незалежно від зовнішніх чи фізіологічних факторів.

Дослідження ключових принципів інклюзивного дизайну адаптивних нейрокомп'ютерних інтерфейсів демонструє необхідність комплексного підходу до створення технологій, доступних для найширшого кола користувачів, а також потребує впровадження використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування потреб користувача, модульної архітектури дизайну для швидкої адаптації інтерфейсу, забезпечення інтуїтивності взаємодії через мультимодальні канали зворотного зв'язку, створення персоналізованих профілів користувачів з урахуванням їхніх унікальних фізіологічних та психологічних характеристик, залучення технологій доповненої та віртуальної реальності, розробки методології користувацьких досліджень та забезпечення конфіденційності даних для практичної реалізації запропонованих принципів.

Таким чином, майбутній розвиток галузі залежить від міждисциплінарної співпраці та потребує подальших досліджень довгострокового впливу нейрокомп'ютерних інтерфейсів на людину та створення міжнародних стандартів інклюзивного дизайну, що забезпечить етичне та ефективне використання цих технологій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Blankertz B., Tangermann M., Vidaurre C., Fazli S., Sannelli C., Haufe S., Maeder C., Ramsey L., Sturm I., Curio G., Müller K. R. The Berlin brain-computer interface: non-medical uses of BCI technology. *Frontiers in Neuroscience*. 2010. Vol. 4. P. 198.
2. Brunner C., Birbaumer N., Blankertz B., Guger C., Kübler A., Mattia D., Millán J. d. R., Miralles F., Nijholt A., Opisso E., Ramsey N., Salomon P., Müller-Putz G. R. BNCI Horizon 2020: towards a roadmap for the BCI community. *Brain-Computer Interfaces*. 2015. Vol. 2. No. 1. P. 1–10.
3. Daly J. J., Wolpaw J. R. Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation. *The Lancet Neurology*. 2008. Vol. 7. No. 11. P. 1032–1043.
4. Donchin E., Spencer K. M., Wijesinghe R. The mental prosthesis: assessing the speed of a P300-based brain-computer interface. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*. 2000. Vol. 8. No. 2. P. 174–179.
5. Dornhege G., Millán J. D. R., Hinterberger T., McFarland D., Müller K. R. Toward brain-computer interfacing. Cambridge: MIT Press, 2007. 534 p.
6. Farah M. J. The unknowns of cognitive enhancement. *Science*. 2015. Vol. 350. No. 6259. P. 379–380.
7. Findlater L., McGrenere J. A comparison of static, adaptive, and adaptable menus. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. 2004. P. 89–96.
8. Gao X., Xu D., Cheng M., Gao S. A BCI-based environmental controller for the motion-disabled. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2003. Vol. 11. No. 2. P. 137–140.
9. Guger C., Daban S., Sellers E., Holzner C., Krausz G., Carabalona R., Gramatica F., Edlinger G. How many people are able to control a P300-based brain-computer interface (BCI)? *Neuroscience Letters*. 2009. Vol. 462. No. 1. P. 94–98.
10. Ienca M., Haselager P. Hacking the brain: brain-computer interfacing technology and the ethics of neurosecurity. *Ethics and Information Technology*. 2016. Vol. 18. No. 2. P. 117–129.
11. Krauledat M., Tangermann M., Blankertz B., Müller K. R. Towards zero training for brain-computer interfacing. *PLoS One*. 2008. Vol. 3. No. 8. P. e2967.
12. Kübler A., Kotchoubey B., Kaiser J., Wolpaw J. R., Birbaumer N. Brain-computer communication: unlocking the locked in. *Psychological Bulletin*. 2001. Vol. 127. No. 3. P. 358–375.
13. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*. 2015. Vol. 521. No. 7553. P. 436–444.
14. Mace R. Universal design: barrier free environments for everyone. Los Angeles: Designers West, 1985. 147 p.
15. McFarland D. J., Sarnacki W. A., Wolpaw J. R. Electroencephalographic (EEG) control of three-dimensional movement. *Journal of Neural Engineering*. 2006. Vol. 3. No. 2. P. R48.
16. Müller-Putz G. R., Scherer R., Brauneis C., Pfurtscheller G. Steady-state visual evoked potential (SSVEP)-based communication: impact of harmonic frequency components. *Journal of Neural Engineering*. 2005. Vol. 2. No. 4. P. 123.
17. Nielsen J. Usability engineering. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1994. 362 p.
18. Norman D. A. The design of everyday things: revised and expanded edition. New York: Basic Books, 2013. 368 p.
19. Pfurtscheller G., Allison B. Z., Brunner C., Bauernfeind G., Solis-Escalante T., Scherer R., Zander T. O., Mueller-Putz G., Neuper C., Birbaumer N. The hybrid BCI. *Frontiers in Neuroscience*. 2010. Vol. 4. P. 30.
20. Schalk G., McFarland D. J., Hinterberger T., Birbaumer N., Wolpaw J. R. BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2004. Vol. 51. No. 6. P. 1034–1043.
21. Shenoy P., Krauledat M., Blankertz B., Rao R. P., Müller K. R. Towards adaptive classification for BCI. *Journal of Neural Engineering*. 2006. Vol. 3. No. 1. P. R13.
22. Stephanidis C., Savidis A. Universal access in the information society: methods, tools, and interaction technologies. *Universal Access in the Information Society*. 2001. Vol. 1. No. 1. P. 40–55.
23. Vidaurre C., Blankertz B. Towards a cure for BCI illiteracy. *Brain topography*. 2010. Vol. 23. No. 2. P. 194–198.
24. Wolpaw J., Wolpaw E. W. Brain-computer interfaces: principles and practice. Oxford: Oxford University Press, 2012. 424 p.

REFERENCES

1. Blankertz B., Tangermann M., Vidaurre C., Fazli S., Sannelli C., Haufe S., Maeder C., Ramsey L., Sturm I., Curio G., Müller K. R. (2010) The Berlin brain-computer interface: non-medical uses of BCI technology. *Frontiers in Neuroscience*, 4, 198.
2. Brunner C., Birbaumer N., Blankertz B., Guger C., Kübler A., Mattia D., Millán J. d. R., Miralles F., Nijholt A., Opisso E., Ramsey N., Salomon P., Müller-Putz G. R. (2015) BNCI Horizon 2020: towards a roadmap for the BCI community. *Brain-Computer Interfaces*, 2 (1). 1–10.
3. Daly J. J., Wolpaw J. R. (2008) Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation. *The Lancet Neurology*, 7 (11). 1032–1043.
4. Donchin E., Spencer K. M., Wijesinghe R. (2000) The mental prosthesis: assessing the speed of a P300-based brain-computer interface. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8 (2). 174–179.
5. Dornhege G., Millán J. D. R., Hinterberger T., McFarland D., Müller K. R. (2007) Toward brain-computer interfacing. Cambridge: MIT Press.
6. Farah M. J. (2015) The unknowns of cognitive enhancement. *Science*, 350 (6259). 379–380.
7. Findlater L., McGrenere J. (2004) A comparison of static, adaptive, and adaptable menus. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. 89–96.

8. Gao X., Xu D., Cheng M., Gao S. (2003) A BCI-based environmental controller for the motion-disabled. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 11 (2). 137–140.
9. Guger C., Daban S., Sellers E., Holzner C., Krausz G., Carabalona R., Gramatica F., Edlinger G. (2009) How many people are able to control a P300-based brain–computer interface (BCI)? *Neuroscience Letters*, 462 (1). 94–98.
10. Ienca M., Haselager P. (2016) Hacking the brain: brain–computer interfacing technology and the ethics of neurosecurity. *Ethics and Information Technology*, 18 (2). 117–129.
11. Krauledat M., Tangermann M., Blankertz B., Müller K. R. (2008) Towards zero training for brain–computer interfacing. *PLoS One*, 3 (8). e2967.
12. Kübler A., Kotchoubey B., Kaiser J., Wolpaw J. R., Birbaumer N. (2001) Brain–computer communication: unlocking the locked in. *Psychological Bulletin*, 127 (3). 358–375.
13. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. (2015) Deep learning. *Nature*, 521 (7553). 436–444.
14. Mace R. (1985) *Universal design: barrier free environments for everyone*. Los Angeles: Designers West.
15. McFarland D. J., Sarnacki W. A., Wolpaw J. R. (2006) Electroencephalographic (EEG) control of three-dimensional movement. *Journal of Neural Engineering*, 3 (2). R48.
16. Müller-Putz G. R., Scherer R., Braunisch C., Pfurtscheller G. (2005) Steady-state visual evoked potential (SSVEP)-based communication: impact of harmonic frequency components. *Journal of Neural Engineering*, 2 (4). 123.
17. Nielsen J. (1994) *Usability engineering*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
18. Norman D. A. (2013) *The design of everyday things: revised and expanded edition*. New York: Basic Books.
19. Pfurtscheller G., Neuper C. (2001) Motor imagery and direct brain–computer communication. *Proceedings of the IEEE*, 89 (7). 1123–1134.
20. Pfurtscheller G., Allison B. Z., Brunner C., Bauernfeind G., Solis-Escalante T., Scherer R., Zander T. O., Mueller-Putz G., Neuper C., Birbaumer N. (2010) The hybrid BCI. *Frontiers in Neuroscience*, 4. 30.
21. Schalk G., McFarland D. J., Hinterberger T., Birbaumer N., Wolpaw J. R. (2004) BCI2000: a general-purpose brain–computer interface (BCI) system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51 (6). 1034–1043.
22. Shenoy P., Krauledat M., Blankertz B., Rao R. P., Müller K. R. (2006) Towards adaptive classification for BCI. *Journal of Neural Engineering*, 3 (1). R13.
23. Stephanidis C., Savidis A. (2001) Universal access in the information society: methods, tools, and interaction technologies. *Universal Access in the Information Society*, 1 (1). 40–55.
24. Vidaurre C., Blankertz B. (2010) Towards a cure for BCI illiteracy. *Brain topography*, 23 (2). 194–198.
25. Wolpaw J., Wolpaw E. W. (2012) *Brain–computer interfaces: principles and practice*. Oxford: Oxford University Press.