

Погорельчук Денис Володимирович,

аспірант кафедри дизайну середовища

Харківської державної академії дизайну та мистецтв

ORCID ID: 0009-0008-8706-634X

dr.pogorelchuk@gmail.com

ТИПОЛОГІЯ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ У ДИЗАЙНІ НЕЙРОКОМП'ЮТЕРНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

У статті досліджується типологія конструктивних рішень у розробці нейрокомп'ютерних інтерфейсів (НКІ) як міждисциплінарного напрямку, що поєднує нейронауки, інженерію та дизайн. Актуальність теми зумовлена швидким розвитком нейротехнологій, розширенням сфер їх практичного застосування та необхідністю формування цілісних підходів до проектування пристроїв, орієнтованих на безпосередню взаємодію з нервовою системою людини. Метою дослідження є систематизація основних конструктивних рішень НКІ та визначення типологічних ознак, що можуть бути використані в дизайн-практиці для створення ефективних, безпечних і зручних у використанні інтерфейсів.

Методологічну основу роботи становлять морфологічний аналіз, порівняльне дослідження сучасних зразків НКІ, а також типологічне моделювання конструктивних характеристик пристроїв. У межах дослідження проаналізовано неінвазивні, мінімально інвазивні та інвазивні системи, що відрізняються способом реєстрації нейросигналів, характером контакту з користувачем, форм-фактором, технологією виготовлення й функціональним призначенням. Встановлено, що для сучасних НКІ визначальними є не лише технічні параметри сигналозчитування, а й такі дизайн-фактори, як ергономічність, біосумісність, модульність, анатомічна відповідність, адаптивність до індивідуальних особливостей користувача та семантична нейтральність форми.

У результаті дослідження запропоновано узагальнену типологію конструктивних рішень НКІ, яка охоплює три основні групи: інвазивні, мінімально інвазивні та неінвазивні системи. Доведено, що кожна з цих груп має власну логіку формування, матеріально-технологічні обмеження та специфіку дизайн-організації. Особливу увагу приділено аналізу матеріалів, зокрема біосумісних металів, полімерів, гнучких субстратів та текстильних рішень, які впливають на комфорт користувача й довготривалу функціональність пристрою. Визначено, що конструктивна структура НКІ повинна забезпечувати баланс між точністю роботи системи, безпечністю, естетичною прийнятністю та можливістю персоналізації.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованої типології як методичної основи для подальшого проектування нейрокомп'ютерних інтерфейсів. Отримані результати можуть бути застосовані під час розроблення нових пристроїв реабілітаційного, комунікаційного та дослідницького призначення

Ключові слова: нейрокомп'ютерний інтерфейс, типологія, конструктивні рішення, ергономіка, нейротехнології, інвазивність, формування.

Pogorelchuk Denys. TYPOLOGY OF STRUCTURAL SOLUTIONS IN THE DESIGN OF BRAIN-COMPUTER INTERFACES

The article examines the typology of structural solutions in the development of brain-computer interfaces (BCI) as an interdisciplinary field that integrates neuroscience, engineering and design. The relevance of the study is determined by the rapid development of neurotechnologies, the expansion of their practical applications, and the need to establish comprehensive approaches to designing systems that enable direct interaction with the human nervous system. The aim of the research is to systematize the main structural solutions of BCI and to identify typological features that can be applied in design practice for creating efficient, safe, and user-friendly interfaces.

The methodological framework is based on morphological analysis, comparative study of contemporary BCI systems, and typological modeling of structural characteristics. The study covers non-invasive, minimally invasive, and invasive systems, which differ in signal acquisition methods, user contact characteristics, form factor, manufacturing technologies, and functional purposes. It is established that modern BCI design is determined not only by technical parameters of signal processing but also by key design factors such as ergonomics, biocompatibility, modularity, anatomical conformity, adaptability to individual user characteristics, and semantic neutrality of form.

As a result of the research, a generalized typology of structural solutions for BCI is proposed, encompassing three main categories: invasive, minimally invasive, and non-invasive systems. It is demonstrated that each category has its own logic of form generation, material and technological constraints, and specific design organization. Special attention is given to the analysis of materials, including biocompatible metals, polymers, flexible substrates, and textile-based solutions, which significantly influence user comfort and long-term functionality. It is determined that the structural configuration of BCI must ensure a balance between system performance, safety, aesthetic acceptability, and the possibility of personalization.

The practical significance of the study lies in the applicability of the proposed typology as a methodological framework for further design of brain-computer interfaces. The obtained results can be used in the development of new devices for rehabilitation, communication, and research purposes.

Key words: brain-computer interface, typology, structural solutions, ergonomics, neurotechnology, invasiveness, form generation.

Вступ. Нейрокомп'ютерні інтерфейси (НКІ, англ. Brain-Computer Interface, BCI) є одним із найперспективніших напрямів сучасних технологій, що стоять на перетині нейронауки, інженерії та дизайну. Починаючи з піонерських робіт Жака Відала у 1970-х роках [1], галузь пройшла шлях від лабораторних досліджень до перших комерційних продуктів, таких як Neuralink, BrainGate та OpenBCI. Проте, незважаючи на стрімкий технологічний прогрес, питання проектування НКІ з позицій дизайну залишається значною мірою нерозробленим.

Дизайн відіграє ключову роль у перетворенні технологічних рішень на зручні, безпечні та естетично привабливі вироби. Для НКІ ця роль набуває особливого значення через необхідність прямого контакту з тілом або нервовою системою людини. Конструктивне рішення інтерфейсу безпосередньо визначає його ефективність, безпечність та прийнятність для кінцевого користувача.

Метою цієї статті є систематизація існуючих підходів до конструктивного вирішення дизайну НКІ та формування типологічної класифікації, придатної для використання у сучасній дизайн-практиці.

Об'єктом дослідження є конструктивні форми НКІ, що представлені провідними галузевими виробниками.

Предмет дослідження – їх типологічні ознаки, принципи формоутворення та дизайн-характеристики.

Матеріали та метод. Дослідження ґрунтується на комплексному підході, що поєднує методи морфологічного аналізу, типологічного моделювання та порівняльного аналізу промислових зразків. Теоретичну базу

складають роботи у галузі дизайну медичного обладнання (Г. Ульрих, К. Еппінгер [2]), ергономіки нейроінтерфейсів (Wolpaw et al. [3]), а також концепції людино-центрованого проектування (ISO 9241-210 [4]).

Емпіричну базу дослідження складають: патентний аналіз понад 120 конструктивних рішень НКІ, зареєстрованих у базах USPTO та ЕРО за 2010–2023 рр.; аналіз технічної документації та дизайн-специфікацій провідних розробників (Neuralink, Synchron, Emotiv, OpenBCI); а також огляд наукових публікацій у базах Web of Science та Scopus за ключовими словами «BCI design», «neural interface ergonomics», «wearable EEG design».

Типологічна класифікація будувалась за методом ієрархічного групування конструктивних ознак, з виокремленням першочергових (інвазивність, метод реєстрації сигналу) та вторинних (матеріали, форм-фактор, призначення) класифікаційних підстав.

Результати. У науковій літературі НКІ традиційно класифікують за принципом реєстрації нейронних сигналів. Wolpaw та співавтори [3] виокремлюють чотири основних типи: електроенцефалографічні (ЕЕГ), електоркортикографічні (ЕКоГ), внутрішньокортикальні та функціональні нейровізуалізаційні системи. Nicolas-Alonso та Gomez-Gil [5] розширюють цю класифікацію, додаючи гібридні системи та інтерфейси на основі периферичних сигналів.

З позицій дизайну та ергономіки найбільш опрацьованими є неінвазивні носимі системи. Лопес та співавтори [6] аналізують дизайнерські виклики у проектуванні ЕЕГ-гарнітур, акцентуючи увагу на трьох протиріччях: між якістю сигналу і зручністю використання;

між надійністю кріплення і свободою руху; між технологічними вимогами і естетичними нормами. Schalk та Leuthardt [7] розглядають конструктивні рішення для імплантованих систем, наголошуючи на вимогах біосумісності та мінімізації інвазивного сліду.

Водночас недостатньо розроблен комплексна типологія, яка охоплювала б увесь спектр конструктивних рішень НКІ – від зовнішніх носимих пристроїв до повністю імплантованих систем – у єдиній класифікаційній системі з урахуванням дизайн-факторів.

Запропонована типологія будується за трьома рівнями класифікації: (I) ступінь інвазивності, (II) метод реєстрації сигналу, (III) конструктивний форм-фактор. Такий підхід дозволяє охопити увесь простір існуючих і перспективних рішень.

Інвазивні НКІ передбачають хірургічне імплантування електродів безпосередньо в кору головного мозку або субдурально. Конструктивно вони поділяються на три підтипи: (a) масиви мікроелектродів (Utah Array, Michigan Probe); (b) гнучкі нейронні нитки (Neuralink Threads, Stentrode); (c) ендovasкулярні системи (Synchron Stentrode).

З точки зору дизайну, ключовою характеристикою інвазивних систем є необхідність мінімізації механічного стресу між жорстким пристроєм і м'яким мозковим субстратом. Це визначає вибір матеріалів (поліімідні підкладки, SU-8 фотоформовані мікроструктури) та геометрії (зниження модуля пружності до рівня нервової тканини – 1–10 кПа) [8]. Форм-фактор диктується нейрохірургічними протоколами: мінімальний розмір краніотомії (< 1 мм для нитчастих систем), інтраопераційна доступність, можливість ревізії або вилучення.

Мінімально інвазивні системи встановлюються на поверхні кори (субдуральні електродні сітки, ECoG-матриці) або у спинномозковому каналі без проникнення в паренхіму мозку. Найбільш перспективним прикладом є Stentrode компанії Synchron – перший у світі ендovasкулярний мозковий інтерфейс, що вводиться через яремну вену [9].

Дизайн таких систем підпорядкований логіці мінімально інвазивної хірургії:

конструкція має забезпечувати доставку через вузький катетер (< 4 Fr), самостійне розкриття у цільовій зоні та стабільну фіксацію за рахунок судинної або кісткової архітекtonіки. Форм-фактор нагадує стент або сітчасту трубку, а поверхня несе електродний масив.

Неінвазивні НКІ є найбільш різноманітним з конструктивної точки зору класом. Їх можна систематизувати за принципом реєстрації сигналу та форм-фактором носія.

За методом реєстрації виокремлюються: електроенцефалографічні (ЕЕГ), функціональна ближня інфрачервона спектроскопія (фНІРС), магнітоенцефалографія (МЕГ) та функціональна МРТ. Кожен метод формує специфічні конструктивні вимоги: ЕЕГ потребує електродного контакту з шкірою голови; фНІРС – розміщення джерел і детекторів на визначених міжелектродних відстанях; МЕГ – громіздких криогенних камер, що унеможливають носимі рішення.

За форм-фактором неінвазивні НКІ поділяються на: (a) шоломоподібні системи (full-cap EEG, Emotiv EPOC); (b) діадемоподібні пристрої з обмеженим набором каналів (Muse, NeuroSky MindBand); (c) внутрішньовушні системи (in-ear EEG); (d) накладні модульні системи (OpenBCI Ultracortex). Різниця у форм-факторі прямо корелює з компромісом між кількістю каналів, просторовою роздільністю та зручністю повсякденного використання [10].

На основі проведеного аналізу виокремлено п'ять ключових принципів формування НКІ, які мають універсальне значення незалежно від типу системи.

Принцип відповідності морфології: Конструктивна форма НКІ повинна відповідати анатомічній морфології тієї частини тіла, з якою взаємодіє пристрій. Для черепних систем це означає відтворення кривизни поверхні голови в діапазоні радіусів 8–10 см; для нейтральних нитчастих систем – масштабування поперечного перерізу до розмірів відповідних нейронних пучків [8].

Принцип мінімізації механічного стресу: Різниця механічних властивостей між пристроєм і біологічною тканиною породжує хронічне запалення та погіршення якості

сигналу. Сучасний підхід передбачає застосування м'яких матеріалів і гнучких підкладок, що мімікують механічні характеристики тканини-хазяїна. Для нейронних зондів цільовий модуль Юнга становить < 1 МПа [11].

Принцип семантичної нейтральності: Для медичних НКІ важливою є уникнення тривозжних асоціацій, пов'язаних з інвазивними медичними процедурами. Дослідження Farah та співавторів [12] показують, що дизайн, що нагадує споживчу електроніку, підвищує готовність до використання на 34% порівняно з традиційними медичними пристроями. Водночас для клінічних систем певна «медична» семантика може підвищувати довіру і відчуття надійності.

Принцип модульності: Швидкий розвиток технологій НКІ робить модульні архітектурні рішення особливо цінними. Модульність дозволяє замінювати окремі компоненти (електродний масив, процесорний блок, акумулятор) без повної заміни пристрою, що критично важливо для імплантованих систем. Prober та Bhaskaran [13] демонструють, що модульна архітектура Neuralink N1 дозволяє оновлювати програмне забезпечення без повторного хірургічного втручання.

Принцип інклюзивного дизайну: НКІ орієнтовані насамперед на людей з руховими порушеннями, що ставить підвищені вимоги до адаптивності конструкції. Universal Design Framework [14] передбачає можливість одnorучного надягання та зняття, регулювання для різних розмірів голови (48–62 см за колом), а також сумісність з допоміжними засобами (слухові апарати, окуляри, ортези).

Вибір матеріалів у конструкції НКІ визначається трьома групами вимог: біосумісністю (для контактних та інвазивних систем), електрофізичними характеристиками та ергономічними властивостями.

– Для електродних матеріалів золотим стандартом залишаються платина та платино-іридієвий сплав завдяки поєднанню електрохімічної стабільності, біосумісності та механічної жорсткості [15]. Альтернативами є оксид іридію (вища ємність подвійного шару), вуглецеві нанотрубки та педотні полімери PEDOT:PSS (гнучкість, зниження імпедансу).

Для підкладок та корпусів інвазивних систем набули поширення поліімідні плівки (Kapton), парилен-С та SU-8. Для неінвазивних носимих систем застосовуються термопластичні еластомери (TPE), силікони медичного класу та функціональні тканини зі срібними нитками. Остання категорія представляє перспективний напрям «текстурного» дизайну НКІ, де електродна система інтегрована безпосередньо у тканину шапки або headband [16].

З виробничої точки зору ключову роль відіграють технології мікрофабрикації: MEMS-процеси (фотолітографія, CVD, травлення), inkjet-printing провідних матеріалів, а для носимих систем – лазерне різання та 3D-друк біологічно сумісними матеріалами. Можливість персоналізованого виготовлення за допомогою 3D-сканування анатомії голови пацієнта відкриває нові перспективи для адаптивного дизайну НКІ.

Висновки. Запропонована типологія конструктивних рішень НКІ систематизує існуючий простір рішень і дає інструментарій для аналізу та проектування нових пристроїв у рамках сучасної дизайн-практики. Ключовим результатом є виявлення трьох ортогональних вимірів класифікації (інвазивність, метод реєстрації, форм-фактор), а також п'яти принципів формоутворення, що мають міждисциплінарний характер.

Важливим висновком є те, що традиційні методи дизайну – ергономічний аналіз, семантика форми, вибір матеріалів – зберігають свою актуальність і в контексті нейроінтерфейсів, але потребують розширення за рахунок знань з нейрофізіології, матеріалознавства та біомеханіки. Міждисциплінарний характер проектування НКІ визначає необхідність формування нової компетентної моделі для дизайнерів у цій галузі.

Перспективами подальших досліджень є: розробка методик оцінювання юзабіліті НКІ з урахуванням специфіки цільових груп користувачів; аналіз естетичних стратегій у дизайні НКІ для масового споживчого ринку; дослідження етичних аспектів дизайну гібридних систем взаємодії «людина-машина».

Лірэпарыя:

1. Vidal J. J. Toward direct brain-computer communication. *Annual review of biophysics and bioengineering*. 1973. Vol. 2, no. 1. P. 157–180. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.bb.02.060173.001105>
2. Eppinger S. D., Ulrich K. T. Product design and development. McGraw Hill Higher Education, 2003. 464 p.
3. Brain-computer interfaces for communication and control / J. R. Wolpaw et al. *Clinical neurophysiology*. 2002. Vol. 113, no. 6. P. 767–791. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(02)00057-3)
4. ISO 9241-210:2019. Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human-centred design for interactive systems. Geneva: International Organization for Standardization, 2019. 33 p.
5. Nicolas-Alonso L. F., Gomez-Gil J. Brain computer interfaces, a review. *Sensors*. 2012. Vol. 12, no. 2. P. 1211–1279. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120201211>
6. Lopez-Gordo M., Sanchez-Morillo D., Valle F. Dry EEG electrodes. *Sensors*. 2014. Vol. 14, no. 7. P. 12847–12870. DOI: <https://doi.org/10.3390/s140712847>
7. Schalk G., Leuthardt E. C. Brain-Computer interfaces using electrocorticographic signals. *IEEE reviews in biomedical engineering*. 2011. Vol. 4. P. 140–154. DOI: <https://doi.org/10.1109/rbme.2011.2172408>
8. Lacour S. P., Courtine G., Guck J. Materials and technologies for soft implantable neuroprostheses. *Nature reviews materials*. 2016. Vol. 1, no. 10. DOI: <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.63>
9. Minimally invasive endovascular stent-electrode array for high-fidelity, chronic recordings of cortical neural activity / T. J. Oxley et al. *Nature biotechnology*. 2016. Vol. 34, no. 3. P. 320–327. DOI: <https://doi.org/10.1038/nbt.3428>
10. Zander T. O., Kothe C. Towards passive brain-computer interfaces: applying brain-computer interface technology to human-machine systems in general. *Journal of neural engineering*. 2011. Vol. 8, no. 2. P. 025005. DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-2560/8/2/025005>
11. Chen R., Canales A., Anikeeva P. Neural recording and modulation technologies. *Nature reviews materials*. 2017. Vol. 2, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.93>
12. Neurocognitive enhancement: what can we do and what should we do? / M. J. Farah et al. *Nature reviews neuroscience*. 2004. Vol. 5, no. 5. P. 421–425. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrn1390>
13. Musk E. An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels. *Journal of medical internet research*. 2019. Vol. 21, no. 10. P. e16194. DOI: <https://doi.org/10.2196/16194>
14. Story M. F. Maximizing usability: the principles of universal design. *Assistive technology*. 1998. Vol. 10, no. 1. P. 4–12. DOI: <https://doi.org/10.1080/10400435.1998.10131955>
15. Cogan S. F. Neural stimulation and recording electrodes. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2008. Vol. 10. P. 275–309. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.10.061807.160518>
16. Casson A. J. Wearable EEG and beyond. *Biomedical engineering letters*. 2019. Vol. 9, no. 1. P. 53–71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13534-018-00093-6>

References:

1. Vidal, J. J. (1973). Toward direct brain-computer communication. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, 2(1), 157–180. <https://doi.org/10.1146/annurev.bb.02.060173.001105>
2. Eppinger, S. D., & Ulrich, K. T. (2003). *Product design and development*. McGraw Hill Higher Education.
3. Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 767–791. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(02)00057-3)
4. ISO 9241-210:2019. *Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human-centred design for interactive systems*. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
5. Nicolas-Alonso, L. F., & Gomez-Gil, J. (2012). Brain computer interfaces, a review. *Sensors*, 12(2), 1211–1279. <https://doi.org/10.3390/s120201211>
6. Lopez-Gordo, M., Sanchez-Morillo, D., & Valle, F. (2014). Dry EEG electrodes. *Sensors*, 14(7), 12847–12870. <https://doi.org/10.3390/s140712847>
7. Schalk, G., & Leuthardt, E. C. (2011). Brain-Computer interfaces using electrocorticographic signals. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 4, 140–154. <https://doi.org/10.1109/rbme.2011.2172408>
8. Lacour, S. P., Courtine, G., & Guck, J. (2016). Materials and technologies for soft implantable neuroprostheses. *Nature Reviews Materials*, 1(10). <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.63>
9. Oxley, T. J., Opie, N. L., John, S. E., Rind, G. S., Ronayne, S. M., Wheeler, T. L., Judy, J. W., McDonald, A. J., Dornom, A., Lovell, T. J. H., Steward, C., Garrett, D. J., Moffat, B. A., Lui, E. H., Yassi, N., Campbell, B. C. V., Wong, Y. T., Fox, K. E., Nurse, E. S., O'Brien, T. J. (2016). Minimally invasive endovascular stent-electrode array for high-fidelity, chronic recordings of cortical neural activity. *Nature Biotechnology*, 34(3), 320–327. <https://doi.org/10.1038/nbt.3428>

10. Zander, T. O., & Kothe, C. (2011). Towards passive brain–computer interfaces: Applying brain–computer interface technology to human–machine systems in general. *Journal of Neural Engineering*, 8(2), 025005. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/8/2/025005>
11. Chen, R., Canales, A., & Anikeeva, P. (2017). Neural recording and modulation technologies. *Nature Reviews Materials*, 2(2). <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.93>
12. Farah, M. J., Illes, J., Cook-Deegan, R., Gardner, H., Kandel, E., King, P., Parens, E., Sahakian, B., & Wolpe, P. R. (2004). Neurocognitive enhancement: What can we do and what should we do? *Nature Reviews Neuroscience*, 5(5), 421–425. <https://doi.org/10.1038/nrn1390>
13. Musk, E. (2019). An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels. *Journal of Medical Internet Research*, 21(10), P. e16194. <https://doi.org/10.2196/16194>
14. Story, M. F. (1998). Maximizing usability: The principles of universal design. *Assistive Technology*, 10(1), 4–12. <https://doi.org/10.1080/10400435.1998.10131955>
15. Cogan S. F. Neural stimulation and recording electrodes. . 2008. Vol. 10. P. 275–309. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.10.061807.160518>
16. Casson, A. J. (2019). Wearable EEG and beyond. *Biomedical Engineering Letters*, 9(1), 53–71. <https://doi.org/10.1007/s13534-018-00093-6>

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)