

УДК 612.67

Р. І. БІЛИЙ, В. В. ЛЕВИЦЬКИЙ

## АНАЛІЗ ТА ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ БІОНІЧНИМ ПРОТЕЗОМ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОЕНЦЕФАЛОГРАФІЇ (АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД)

*Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна*

*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна*

**Анотація.** Ця стаття надає огляд сучасних досліджень у напрямку методу керування біонічним протезом за допомогою електроенцефалографії (ЕЕГ), який є важливою та перспективною галуззю в сфері реабілітації. Використання інтуїтивних та інтелектуальних методів управління на базі ЕЕГ дозволяє значно відновити функціональність верхньої кінцівки у пацієнтів, що втратили кінцівки внаслідок травм або захворювань. У статті розглядаються найновіші досягнення в цій галузі, зосереджуючись на методах визначення намірів руху, класифікації дискретних та неперервних рухів, а також на підходах до однонаканального управління, управління зворотним зв'язком та комбінованого управління. Аналізуються результати численних досліджень, які демонструють ефективність систем на основі ЕЕГ для керування біонічними протезами. Особлива увага приділяється впливу розташування датчиків та розрізненню між внутрішньом'язовою та поверхневою ЕЕГ. Значна частина статті присвячена огляду методів, які використовуються для розшифровки рухових намірів та їх подальшої інтерпретації для керування протезом. Серед таких методів виділяються алгоритми машинного навчання та глибокого навчання, які забезпечують високу точність та швидкість обробки сигналів. Розглядаються також дослідження, що використовують поєднання ЕЕГ з іншими методами, такими як електроокулографія (ЕОГ), для підвищення надійності та безпеки систем керування. Виявлено, що методи на основі ЕЕГ мають великий потенціал для реалізації ефективного та інтуїтивного керування біонічним протезом, що відкриває нові можливості у реабілітації пацієнтів з втратою функцій верхньої кінцівки. Подальші дослідження та розробки в цій галузі сприятимуть створенню більш точних, швидких та надійних систем управління, які забезпечать кращу інтеграцію біонічних протезів у повсякденне життя користувачів, значно покращуючи їх якість життя та автономність.

**Ключові слова:** біонічні протези, електроенцефалографія (ЕЕГ), реабілітація верхніх кінцівок, методи керування, наміри рухів, дискретні рухи, неперервні рухи, однонаправлене керування, зворотній зв'язок, комбіноване керування, розташування сенсорів, внутрішньом'язова ЕЕГ, поверхнева ЕЕГ, технології реабілітації.

**Abstract.** This article provides an overview of contemporary research in the direction of controlling bionic prostheses using electroencephalography (EEG), which is an important and promising field in the rehabilitation sphere. The use of intuitive and intelligent control methods based on EEG enables significant restoration of upper limb functionality in patients who have lost limbs due to injuries or diseases. The results of numerous studies demonstrating the effectiveness of EEG-based systems for controlling bionic prostheses are analyzed. Special attention is given to the impact of sensor placement and differentiation between intramuscular and surface EEG. A significant portion of the article is devoted to reviewing methods used for decoding movement intentions and their subsequent interpretation for prosthesis control. Among these methods, machine learning and deep learning algorithms stand out for their high accuracy and signal processing speed. Additionally, research combining EEG with other methods, such as electrooculography (EOG), to enhance the reliability and safety of control systems is examined. It is found that EEG-based methods have great potential for implementing effective and intuitive bionic prosthesis control, opening up new possibilities in the rehabilitation of patients with upper limb disabilities. Further research and development in this field will contribute to the creation of more precise, faster, and more reliable control systems, which will better integrate bionic prostheses into users' everyday lives, significantly improving their quality of life and autonomy.

**DOI: 10.31649/1681-7893-2024-47-1-198-212**

**ВСТУП**

Електроенцефалографія (ЕЕГ) є методом вимірювання електричної активності мозку, яка виникає внаслідок струмів, що генеруються нейронами. Даний сигнал може бути зафіксований неінвазивним шляхом, за допомогою розміщення електродів на поверхні шкіри голови. Ця характеристика пояснює широке застосування ЕЕГ як найпоширенішого методу вимірювання активності мозку. Крім того, цей метод відносно доступний і має високу часову роздільну здатність (близько 1 мс). Однак його сигнал має низьку інтенсивність і схильний до різних артефактів, а також володіє обмеженою просторовою роздільною здатністю.

Під час вимірювання ЕЕГ реєструються різні форми хвиль, які відображають кортикальну електричну активність. Інтенсивність сигналу активності ЕЕГ зазвичай досить низька і вимірюється в мікрвольтах (мкВ). Основні ритми ЕЕГ класифікуються залежно від частотного діапазону, до яких вони належать, включаючи альфа ( $\alpha$ ), бета ( $\beta$ ), дельта ( $\delta$ ), тета ( $\theta$ ) і гамма, як зазначено в таблиці 1[1].

**Таблиця 1**

**Частоти ЕЕГ**

ЕЕГ	Частоти	Опис
Дельта $\delta$	0,5-4	З'являються в дитячому і глибокому сні
Тета $\theta$	4-8	У дітей з'являються на часткових і скроневих ділянках
Альфа $\alpha$	8-13	Виникають у неспання дорослих особин в тім'яній і лобовій області волосистої частини голови
Бета $\beta$	13-30	Ці хвилі пов'язані з рухами і зазвичай з'являються в лобовій і центральній частках. Зниження бета-ритму вказує на рух, підготовку рухів, планування руху або уяву руху. Це зниження є найбільш домінуючим у контралатеральній моторній корі. Це ослаблення бета-хвиль називається десинхронізацією, пов'язаною з подіями. Ритми посилюються після руху і відомі як пов'язана з подіями синхронізація.
Гамма $\gamma$	>30	Це вищі ритми, які мають частоти більше 30 Гц.

Біонічні протези на основі електроенцефалографії характеризуються трьома важливими аспектами: типами сигналів, що отримуються від ЕЕГ, частиною протезної руки, які піддаються керуванню, і методами трансформації сигналів ЕЕГ у команди для управління протезом. Основні компоненти цієї системи представлені на малюнку 1.

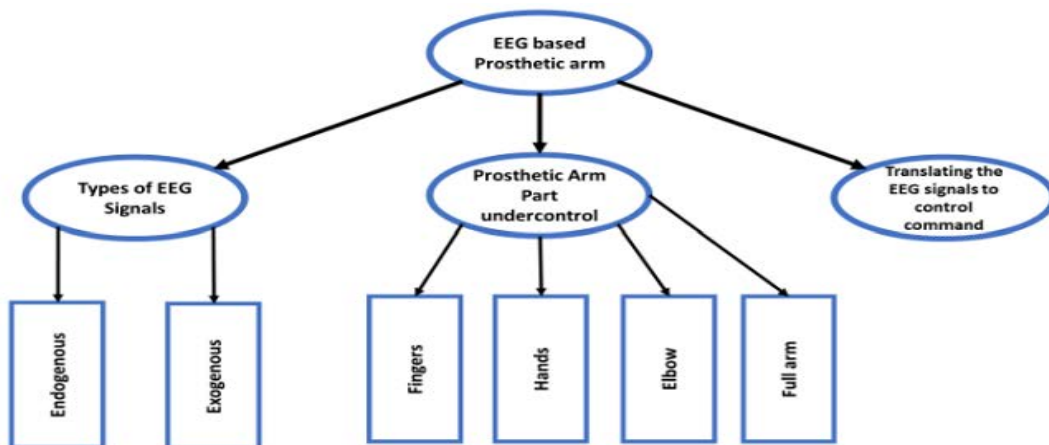


Рисунок 1 - Елементи дослідження [2]

В залежності від характеру руху, протез може бути керований шляхом екзогенних або ендогенних сигналів ЕЕГ. Різниця між цими двома типами сигналів наведена в наблиці 2[3].

## БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Таблиця 2

Типи сигналів ЕЕГ

сигнал ЕЕГ	Опис	Переваги	Недоліки	Типи	Опис
Екзогенний	Створюється шляхом застосування зовнішніх подразників, наприклад слухових або віртуальних підказок	Мінімальна підготовка учасників	1- Вимагають багато уваги. 2- Учасники можуть бути дуже виснажені сильними подразниками.	Стаціонарний візуально викликаний потенціал (SSVEP)	Реакція на подразники різної частоти. Якщо учасник дивиться на миготливе світло з певною частотою, сигнал ЕЕГ від зорової кори буде на тій же частоті
				Інтерфейс на основі Р-300	Те саме, що SSVEP, але швидкість передачі даних нижча
Ендогенний	Не потребує зовнішніх подразників	Учасники з неврологічними проблемами можуть автоматично керувати протезом	1- Потрібно більше навчання 2- Швидкість передачі даних нижча	Сенсомоторні ритми (SMR)	Витримувати два види амплітудної модуляції, відомі як десинхронізація, пов'язана з подією (ERD) і пов'язана з подією синхронізація (ERS).
				Повільні кортикальні потенціали (SCP)	Повільні події зсуви електроенцефалограми постійним струмом. Повільні зсуви кіркового потенціалу в електрично негативному напрямку відображають деполаризацію великих кіркових клітинних вузлів, знижуючи їх поріг збудження.

Управління протезом характеризується різними парадигмами, які визначаються областями, що піддаються керуванню, такими як пальці, кисть, лікоть або повна рука. Для кожної з цих областей необхідні різні типи сигналів.

Кожна з людських рук складається з чотирьох пальців і великого пальця. Пальці можуть виконувати два основних рухи: згинання та розгинання. Згинання в основному використовується для захоплення, тоді як розгинання - для відкриття. Згинання може бути різним, включаючи згинання, стискання кулака, захоплення, захоплення та складання пальців, тоді як розгинання може бути вказівним, розтягнутим або розчепірим. Великий палець, який відповідає за половину функцій руки, має два суглоби, які згинаються та розгинаються, схоже до пальців, але також володіє унікальними рухами, такими як циркумдукція, абдукція, аддукція та ретропульсія.

Руки включають не лише рухи пальців, але і зап'ястя. Зап'ястний суглоб може згинатися, розгинатися, а також відхилятися радіально та ульнарно (від боку до мізинця). Ці рухи можна використовувати, наприклад, під час махування молотком.

Лікоть є ключовою частиною руки, оскільки він дозволяє руці рухатися в різних положеннях, забезпечуючи можливість виконувати різноманітні дії. Лікоть володіє двома основними рухами: згинанням та розгинанням.

Декодування сигналу електроенцефалографії (ЕЕГ) передбачає кілька етапів для досягнення очікуваного результату, включаючи попередню обробку, витягування ознак та класифікацію. Кожен із цих загальних етапів вимагає застосування відповідного алгоритму.

ЕЕГ фіксує електричні потенціали, які генеруються нейронними клітинами. Електроди розташовані на шкірі голови та реєструють підсилені сигнали. Отримані дані відображаються у вигляді

## БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

безперервного графіка з просторовим розподілом змін напруги з плином часу. Для перетворення мозкової активності на команди необхідно виконати три кроки. Спочатку мозкова активність реєструється за допомогою пристрою для збору даних. Потім артефакти, які представляють собою небажані аномалії сигналу, вилучаються з сигналу.

Відповідні ознаки виділяються за допомогою різних методів, таких як швидке перетворення Фур'є (ШПФ), вейвлет-перетворення (WT) і власні вектори, розподіл частоти в часі та авторегресійний метод. У Таблиці 3 наведено кожний згаданий метод разом з його перевагами та недоліками[4].

**Таблиця 3**

**Методи виділення ознак**

Назва	Переваги	Недоліки
БПФ	1- Хороший інструмент для стаціонарної обробки сигналів 2- Він більше підходить для вузькосмугових сигналів, таких як синусоїда 3- Він має підвищену швидкість порівняно з усіма іншими доступними методами в програмах реального часу	1- Не підходить для нестационарних сигналів, таких як ЕЕГ. 2- Страждає від високої чутливості до шуму
WT	1- Краще підходить для аналізу раптових і перехідних змін сигналу	Необхідно вибрати відповідний материнський вейвлет
Власний вектор	Забезпечує відповідну роздільну здатність для оцінки синусоїди з даних	Найменше власне значення може генерувати помилкові нулі, коли використовується метод Писаренка
Часовий частотний розподіл	1- Це дає можливість досліджувати великі безперервні сегменти сигналу ЕЕГ 2- TFD аналізує лише чисті сигнали для хороших результатів	1- Частотно-часові методи орієнтовані на концепцію стаціонарності; як наслідок, у модулі попередньої обробки потрібен віконний процес 2- Він досить повільний (через обчислення градієнтного сходження) 3- Витягнуті функції можуть залежати одна від одної
Авторегресійний	1- AR обмежує втрату спектральних проблем і забезпечує покращену роздільну здатність за частотою 2- Забезпечує хорошу роздільну здатність за частотою 3- Спектральний аналіз на основі моделі AR є особливо вигідним, коли аналізуються короткі сегменти даних, оскільки частотна роздільна здатність аналітично отриманого спектру AR є нескінченна і не залежить від довжини аналізованих даних	1- Порядок моделі в спектральній оцінці AR важко вибрати 2- Метод AR дасть погану спектральну оцінку, якщо оцінювана модель не підходить, а порядок моделей вибрано неправильно 3- Він легко сприйнятливий до сильних зміщень і навіть велика варіативність

Класифікатор використовує значення незалежних змінних (ознак) як вхідні дані для прогнозування класу, до якого належить незалежна змінна. Він має набір параметрів, які потребують навчання на навчальному наборі даних. Навчений класифікатор моделює зв'язок між класами та відповідними функціями і здатний ідентифікувати нові екземпляри в тестовому наборі даних. Методи класифікації представлені у таблиці 4 [5].

**Таблиця 4**

**Типи класифікації**

Назва	Метод	Опис
1	SVM	SVM — це контрольований алгоритм навчання, який використовує трюк ядра для перетворення вхідних даних у простір вищих розмірів, після чого відокремлює дані за допомогою гіперплану з максимальними полями. Завдяки своїй здатності керувати великими наборами даних, алгоритм широко використовується для задач бінарної класифікації в машинному навчанні.
2	MLP	MLP — це метод на основі нелінійної нейронної мережі, що складається з трьох послідовних рівнів: вхідного, прихованого та вихідного відповідно, де прихований рівень передає вхідні дані на вихідний рівень. Однак модель MLP може спричинити надмірну підгонку через недостатню або надмірну кількість нейронів.
3	NB	Класифікатор NB забезпечує просту й ефективну імовірнісну класифікацію на основі теореми Байєса, яка стверджує, що виділені ознаки не є залежними. Модель NB використовує (i) алгоритм максимальної ймовірності для визначення класу попередніх ймовірностей і (ii) розподіл ймовірностей ознаки з навчального набору даних. Потім результати використовуються з максимізованим апостеріорним деревом рішень, щоб знайти мітку конкретного класу для нового екземпляра тесту.
4	K-НН	K-найближчий сусід — це контрольований алгоритм навчання, який визначає клас тестової вибірки відповідно до більшості класів k-найближчих навчальних вибірок; тобто мітка класу призначається новому екземпляру найпоширенішого класу серед KNN у просторі «функцій». У цьому дослідженні значення k було встановлено на три.
5	K-кратна перехресна перевірка	Усі моделі класифікації в цій роботі були навчені та перевірені за допомогою даних ЕЕГ, а потім підтверджені за допомогою k-кратної перехресної перевірки, яка є загальноживаним методом, який порівнює (i) продуктивність двох алгоритмів класифікації або (ii) оцінює продуктивність один класифікатор для даного набору даних (Wong, 2015). Перевагою є використання всіх екземплярів у наборі даних для навчання або тестування, де кожен екземпляр використовується для перевірки точно один раз.
6	LDA	Він складається зі статистичних властивостей даних, обчислених для кожного класу. Для однієї вхідної змінної (x) це середнє значення та дисперсія змінної для кожного класу. Для кількох змінних це однакові властивості, обчислені за багатofакторним Гауссом, а саме середнє значення та коваріаційна матриця. Ці статистичні властивості оцінюються на основі даних і підключаються до рівняння LDA, щоб робити прогнози. Це значення моделі, які будуть збережені у файлі моделі.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Bridges та співавтори[10] проводять огляд архітектури інтерфейсу людина-машини. У статті міститься кількість інформації про систему контролю.

Yanagisawa та інші [61] демонструють новий метод керування протезом руки за допомогою сигналів електрокортикографії (ECoG). Система продемонструвала свою ефективність у розшифровці руху руки пацієнта, що переніс інсульт, та використовувала ці сигнали для керування протезом руки.

Дослідження проведене Таһа та його колегами[5], стосується системи, яка використовує сигнали ЕЕГ для керування розумним тривимірним протезом руки. Система продемонструвала відмінні результати і стала надійною альтернативою інвазивним системам.

Дослідники Bright та інші[11] розробили систему керування на основі ЕЕГ для протезу руки за допомогою інтерфейсу мозково-комп'ютерного інтерфейсу (BCI) Neurosky. Система досягла точності на рівні 80%.

Команда Elstob та Secco [17] керувала роботизованою рукою з п'ятьма ступенями свободи. Вони використовували дві програмні рамки, що продемонстрували гарні результати з технічної і економічної точок зору.

---

---

## БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

---

---

Agashe та співавтори [43] провели дослідження щодо того, як пацієнти з трансрадіальною ампутацією можуть контролювати захоплення в протезі руки за допомогою системи інтерфейсу мозково-комп'ютерного. Результати показали, що ця система є можливим рішенням.

Учасники дослідження, проведеного Vidaurre та співавторами [56], змогли використовувати неінвазивне мозкове-комп'ютерне інтерфейсне зображення ВСІ для досягнення лінійного контролю нейропротеза верхньої кінцівки, керованого функціональною електричною стимуляцією.

Rashid та співавтори [29] розробили вбудовану систему для керування рухом пальця протеза руки з використанням сигналів електроенцефалографії (ЕЕГ). Точність класифікації сигналу в цьому дослідженні досягла прийняттого рівня у 79%.

Faiman та інші [18] досліджували, чи може функціональний зв'язок у стані спокою передбачити ступінь моторної адаптації правої (домінантної) верхньої кінцівки. Спонтанну нейронну активність виміряли за допомогою електроенцефалографії у стані спокою у здорових дорослих перед одноразовим сеансом рухової адаптації.

Noël та Snider [41] використовували глибокі нейронні мережі для керування протезом руки. Модель досягла точності на рівні 63,3%.

Gannouni та співавтори [23] презентували дослідження, що використовує машинне навчання для передбачення руху всіх п'яти пальців. Запропонована система досягла точності класифікації сигналу на рівні 81%.

Chinta та інші [14] розробили та впровадили систему керування протезом руки за допомогою сигналів ЕЕГ для виконання згинання та розгинання пальців.

Chaudhry та колеги [13] обговорювали алгоритми контролю ЕЕГ для протезів рук. Вони розробили дешевий тривимірний протез руки, який, однак, був лише прототипом і не мав можливості застосовуватися для людей з ампутуваними кінцівками.

Xu та інші [59] розробили систему реабілітації для пацієнта з інсультом верхньої кінцівки, де допоміжний пристрій базувався на моторній уявній електроенцефалографії. Система виявилася практичною та повністю здатною досліджувати рухові ініціативи пацієнта та направляти їх для ефективного проведення реабілітаційного навчання.

Команди Ramos-Murguialday та інші [56] розробили роботизований інтерфейс мозок-комп'ютер на основі екзоскелета руки для керування пальцями під час їх згинання та розгинання.

Witkowski та співавтори [49] представили та випробували нову гібридну систему взаємодії між мозком і нейронним комп'ютером (BNCI), яка поєднує електроенцефалографію (ЕЕГ) і електроокулографію (ЕОГ) для підвищення надійності та безпеки безперервних хватальних рухів, керованих екзоскелетом руки.

Looned та інші [36] представили портативну систему, яка складається з нового легкого роботизованого протеза для руки (RAO), системи функціональної електричної стимуляції (FES) і простого бездротового інтерфейсу мозок-комп'ютер (BCI). Ця система здатна обробляти електроенцефалографічні (ЕЕГ) сигнали та перетворювати їх на рухи пошкодженої руки.

Дослідники Hortal та інші [27] створили систему на основі гібридного екзоскелета верхньої кінцівки для неврологічної реабілітації, рух якої контролювався ІМТ на основі ЕЕГ.

Brauchle та його команда [9] перевірили можливість використання 3D-робота-помічника для створення рухів за допомогою багатосуглобового екзоскелета під час МІ-синхронізації сенсомоторних коливань у В-діапазоні.

Elnady та інші [16] перевірили доцільність використання FES для підтримки виконання рухових завдань у постінсультних осіб.

Comani та інші [15] представили нову систему нейромоторної реабілітації верхніх кінцівок, яка була валідована у пацієнтів з підгострим постінсультним станом.

Soekadar та інші [49] представили нову систему взаємодії мозку та нейронно-комп'ютерної системи (BNCI), яка об'єднує електроенцефалографію (ЕЕГ) і електроокулографію (ЕОГ) для покращення контролю над допоміжною робототехнікою в повсякденному житті.

Bhagat та інші [6] продемонстрували доцільність виявлення рухового наміру за мозковою активністю пацієнтів з хронічним інсультом за допомогою асинхронного інтерфейсу головного мозку (ІМТ) на основі ЕЕГ.

Tang та інші [53] досліджували використання самоіндукованих варіацій електроенцефалограми (ЕЕГ) для контролю екзоскелета верхньої кінцівки.

Steinisch та співавтори [50] розробили систему нейромоторної реабілітації верхніх кінцівок для пацієнтів, що перенесли інсульт. Ця система включає пасивний роботизований пристрій (Tackhold) для кінематичного відстеження та компенсації сили тяжіння, п'ять спеціалізованих додатків віртуальної

---

---

## БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

---

---

реальності (VR) для тренування чітких патернів рухів та ЕЕГ високої роздільної здатності для синхронного моніторингу активності кори мозку.

Shedeed та співавтори [48] представили систему ІМТ на основі сигналів ЕЕГ для контролю трьох рухів (відкриття руки, закриття руки та рука в зведеному положенні), досягнувши точності класифікації сигналу на рівні 91%.

Bhattacharyya та інші [7] запропонували новий метод керування положенням руки робота за допомогою ЕЕГ шляхом використання рухових зображень, демонструючи ефективність системи в процесі реабілітації.

Команда дослідників під керівництвом Ху [60] розробила онлайн-систему керування роботом на основі ВСІ, яка була успішно випробувана на 30 учасниках і досягла загальної точності на рівні 91%.

Meng та співавтори [38] розробили систему для керування робототехнічною рукою на основі неінвазивної технології ВСІ, яка була успішно випробувана на 13 учасниках і показала можливість контролю руки шляхом модуляції мозкової активності під час навчання.

Karakos та співавтори [31] розробили роботизовану руку з використанням програмного забезпечення Solidwork, яка була успішно керована за допомогою мозкових хвиль, але цей пристрій був лише прототипом і не використовувався на практиці.

Bousseta та співавтори [8] запропонували нову систему ВСІ, що передбачає управління рукою робота на основі думок користувача, випробувавши її на 4 учасниках і показавши успішність концепції.

На рисунку 2 зображено розподіл наукових статей, у сфері контролю на основі ЕЕГ для протезів верхніх кінцівок, таких як протези рук, роботизовані руки або допоміжні пристрої. За період від 2013 року до середини 2016 року спостерігалось збільшення зацікавленості науковців у цьому напрямку досліджень.

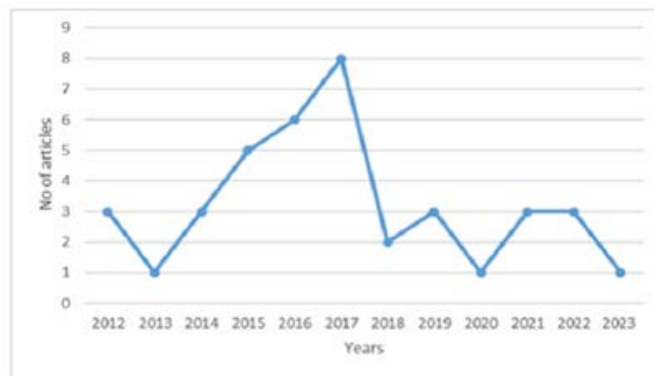


Рисунок 2 - Розповсюдження публікацій

Під час аналізу наукових публікацій було встановлено, що сигнали ЕЕГ використовуються не лише для управління протезами, але й для керування різноманітними пристроями, такими як роботизовані руки, екзоскелети та інші. На рисунку 3 наведено порівняння кількості наукових досліджень, присвячених розробці протезів руки, екзоскелетів та роботизованих рук.

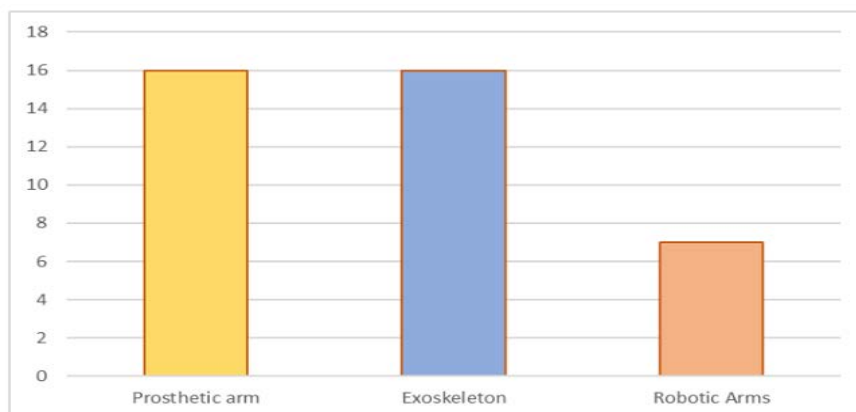


Рисунок 3 - Статті, присвячені застосуванню ЕЕГ

## БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Результати аналізу наукових публікацій щодо протезів руки, екзоскелетів та роботизованих рук представлені відповідно у таблицях 5, 6 та 7.

**Таблиця 5**

### Статті в напрямку протезу руки

Автори	Метод вилучення ЕЕГ	Контролер використовується	Кількість рухів	рік
Бріджес та інші,	Не визначено	Не визначено	Хватити	2011
Янагісава та ін.,	Вилучення функцій: смуговий фільтр (швидке перетворення Фур'є) Класифікатор: підтримка векторної машини SVM	Не визначено	Хват, розгинання другого і третього пальців (форма ножиць)	2011
<u>Бейрут та інші,</u>	Не визначено	Raspberry Pi + Arduino	Закрити і розкрити руку	2016
Брайт та інші	Не визначено	Arduino UNO	Згинання, розгинання, щипки	2016
Elstob & Secco,	Просторовий фільтр CSP для вилучення Лінійний дискримінантний аналіз LDA для класифікатора	Arduino UNO	Відкрити, закрити	2016
Агаше та інші	Високочастотні та низькочастотні фільтри Баттерворта другого порядку	Вбудований контролер	Хватити	2016
Vidaurre та інші	Смуговий фільтр для вилучення, LDA як класифікатор	Не визначено	Керування, праворуч або ліворуч	2016
Рашид та інші	Обробка даних: фільтр низьких і високих частот Вилучення функцій: розрахунок потужності діапазону з PSD Класифікація: мережа класифікатора логістичної регресії	Arduino UNO	Згинання та розгинання пальців	2018
Файман та інші	Дані були відфільтровані за допомогою смугового та режекторного фільтрів. Вилучення даних за допомогою швидкого перетворення Фур'є	Не визначено	Досягаючи	2018
Ноель і Снайдер	Екстракція та аналіз: Спектральна густина потужності. Класифікація: Машина опорних векторів	Не визначено	Згинання і розгинання пальців	2019
Gannouni та інші	Витяг класифікації CSP: LDA	Не визначено	Рухи пальцями	2020
Чінта та інші	Класифікація: LSTM (модель довгострокової пам'яті).	Не визначено	Руки рук вгору і вниз	2020
Фуентес-Гонсалес та інші	Не визначено	Arduino UNO	Розкрити і закрити руку	2020



## БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Алі та інші	Не визначено	Не визначено	Рухи руками, пальці розкриваються і змикаються	2021
Setiawan та інші	RC фільтр операційного підсилювача для вилучення сигналу	Arduino UNO	Згинання і розгинання пальців	2021
Чодрі та інші	Екстракція: FFT Класифікація: SVM	Arduino UNO	Згинання та розгинання пальців	2022

**Таблиця 6**

### Статті в напрямку екзоскелету

Автори	Метод вилучення ЕЕГ	Контролер використовується	Кількість рухів	рік
Сю та ін.	Екстракція: WT Класифікація: LDA	Не визначено	Права і ліва рука	2011
Ramos-Murguialday та інші	Просторовий фільтр	Не визначено	Згинання та розгинання пальців	2012
Формаджо та інші	Вибірка: смуговий фільтр і ШПФ	Не визначено	Рух руки	2013
Tung та ін.		Не визначено	Рух верхньої частини руки	2013
Krichner та інші	Вибірка: смуговий фільтр FFT і просторовий фільтр. Класифікація: SVM	Не визначено	Рух верхньої частини руки	2014
Вітковський та інші	Попередня обробка смугового фільтра вибірки: фільтр Лапласа	Не визначено	Рух руки	2014
Looned та інші	Вилучення: просторовий фільтр Класифікатор: лінійний класифікатор	Не визначено	Рух і захоплення рук	2014
Hortal та ін.	Вибірка: режекторний фільтр, вилучення: смуговий фільтр, класифікатор: SVM	Не визначено	Згинання та розгинання ліктя	2015
Brauchle та інші	Оцифровка: Класифікація фільтра високих частот: Лінійна класифікація	Не визначено	Рука досягає руху	2015
Elnady та інші	Екстракт: загальний просторовий шаблон Алгоритм Класифікатор: Лінійний дискримінантний аналіз LDA	Не визначено	Згинання ліктьового суглоба, розгинання кисті відкриваються і закриваються	2015
Комані та ін.	Вибірки: режекторний і смуговий фільтр	Не визначено	Рух верхньої частини руки	2015

## БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Soekadar та інші	Попередня обробка смугового фільтра вибірки: +-фільтр Лапласа	Не визначено	Рух верхньої частини руки	2015
Бхагат та інші	Вибірка: високий, потім низький фільтр Класифікація: SVM	Не визначено	Розгинання ліктьового згинання	2016
Танг та інші	Вибірка: режекторний і смуговий фільтр, класифікатор: LDA, SVM, BPNN	Не визначено	Рух правою і лівою рукою Рух обома ногами	2016
Фролов та ін.	Вилучення: Класифікація смугового фільтра: Байєсівський класифікатор	Не визначено	Рука відкрити і закрити	2017
Buerkle та інші	Екстракція: ШПФ Класифікація: SVM	Не визначено	Права і ліва рука	2021

**Таблиця 7**

### Статті в напрямку роботизованої руки

Автори	Метод вилучення ЕЕГ	Контролер використовується	Кількість рухів	Рік
Steinisch та інші	Вибірка: режекторний і смуговий фільтр	Не визначено	Рух рукою	2013
Шедід та інші	Екстракція: WT, FFT, PCA Класифікатор: SVM	Не визначено	Закрити і розкрити руку Закрити руку	2014
Bhattacharyya та інші	Вилучення: FFT Класифікатор: SVM	Не визначено	Рухи руками вліво, вправо і вперед	2014
Xu et al.	Видобуток: WT Класифікатор: LDA	Не визначено	Рухи рухаються вгору і вниз	2015
Meng та ін.	Не визначено	Не визначено	Рухи рук: вліво, вправо, вгору, вниз	2016
Каракоч та інші	Не визначено	Arduino	Розкрити і закрити руку	2017
Буссета та інші	Вилучення: FFT Класифікатор: SVM	Не визначено	Основа руки права, ліва Лікоть вгору і вниз	2018

В останні роки було проведено кілька досліджень з використанням сигналів електроенцефалограми (ЕЕГ) для аналізу рухів пальців. Раек та співавтори [43] розглядали можливість розшифрування рухів згину пальців з використанням ЕЕГ-сигналів шкіри голови, виявивши, що кінематика пальців може бути виведена з ЕЕГ-сигналів з використанням лінійних декодерів з пам'яттю. Ketenci та Kayıkcıoğlu [32] вивчали вплив тета-хвиль мозку на виявлення руху, доводячи, що тета-сигнали впливають на виконання руху. Mohamed і Aharonson [39] досліджували рух зап'ястя та пальців, показуючи, що поєднання класифікаторів і функцій з різних частотних діапазонів може покращити продуктивність ВСІ для керування біонічною рукою. Rashid та співавтори [46] розробили систему для керування пальцями протезів кінцівок з використанням ЕЕГ-сигналів, досягнувши точності до 70%. Команда Javed [29] представила метод класифікації рухів чотирьох пальців правої руки на основі даних ЕЕГ, досягнувши точності 65%. Liao та співавтори [35] досліджували розрізнення окремих пальців однієї руки за допомогою неінвазивної ЕЕГ, досягнувши точності класифікації до 77,11%.

Дослідження з виявленням руху зап'ястя було проведено Ghaniet та інші [24] досягнувши точності до 91,93%. Huong та співавтори [28] використовували компоненти P300 та розширені функції для класифікації сигналів ЕЕГ, досягнувши досить хороших результатів. Ting Li та співавтори [34]

запропонували модель декодування довільних рухів руки на основі HLM, яка показала можливість декодування складної кінематичної інформації. Ramalingam та співавтори [44] використовували алгоритми машинного навчання для класифікації сигналів ЕЕГ для виконання рухів пальців і обертання зап'ястя, досягнувши точності 80,55%.

Jeong та співавтори [30] використовували модель ієрархічної нейронної мережі для класифікації рухів передпліччя, досягнувши надійної класифікації. Ghani та співавтори [24] використовували ЕЕГ для аналізу активності мозку та переведення рухів ліктя людини в рухи штучного приводу, досягнувши точності 73%. Ferdiansyah та співавтори [19] розробили систему контролю ортеза за допомогою методу класифікації з сигналами ЕЕГ та ЕМГ, досягнувши точності 85,2%.

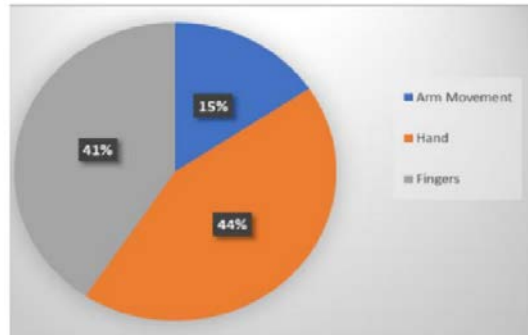


Рисунок 4 – Діаграма співвідношення керованої частини у дослідженнях присвячених протезу руки

### ВИСНОВОК

Дослідження протезів верхніх кінцівок на основі електроенцефалограми (ЕЕГ) охоплює широкий спектр наукових областей, включаючи анатомію, обробку сигналів, методи управління та дизайн. Усі ці аспекти представлені у вигляді наукових дисциплін. Незважаючи на значний прогрес у контролі протезної руки, є необхідність у подальших дослідженнях, спрямованих на підвищення точності виокремлення сигналу ЕЕГ та збільшення швидкості управління.

Застосування автоматичних протезів вже стало загальноприйнятим методом. Вони розглядаються як один із засобів, спрямованих на полегшення життя осіб з обмеженими можливостями, включаючи втрату верхніх кінцівок, і використовуються для нижніх кінцівок, інвалідних візків, автомобілів та навіть дронів.

Активні дослідження в галузі ЕЕГ-керованих біонічних протезів свідчать про постійний прогрес у розробці та вдосконаленні цієї технології. Поява нових алгоритмів обробки сигналів, методів класифікації, а також використання штучних нейронних мереж, спрямованих на покращення точності та швидкості управління, підвищує ефективність ЕЕГ-інтерфейсів для біонічних протезів. Тому, на сьогоднішній день використання ЕЕГ для керування біонічним протезом залишається актуальним та важливим напрямком досліджень, який має потенціал значно покращити якість життя людей з обмеженою рухливістю та втратою верхніх кінцівок.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Abdulrahman Satam, I. 2021. Review Studying of the Latest Development of Prosthetic Limbs Technologies. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 12(12), pp.721-731 [online]. Available at: <https://www.ijser.org/research-paper-publishing-december-2021.aspx> [Accessed: 20 November 2022].
2. Acharya, U.R., Hagiwara, Y., Deshpande, S.N., Suren, S., Koh, J.E.W., Oh, S.L., Arunkumar, N., Ciaccio, E.J. & Lim, C.M. 2019. Characterization of focal EEG signals: A review. *Future Generation Computer Systems*, 91, pp.290-299. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.08.044>.
3. Agashe, H.A., Paek, A.Y. & Contreras-Vidal, J.L. 2016. Chapter 4 - Multisession, noninvasive closed-loop neuroprosthetic control of grasping by upper limb amputees. *Progress in Brain Research*, 228, pp.107-128. Available at: <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2016.04.016>.

4. Ali, H.A., Goga, N., Vasiletanu, A., Ali, L.A., Abd-Almuhsen, G.S. & Naji, H.K. 2021. A Quantitative Research to Determine User's Requirements for the Mind-Controlled Prosthesis Arm Intelligent System. In: 2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Pitesti, Romania, pp.1-8, July 01-03. Available at: <https://doi.org/10.1109/ECAI52376.2021.9515168>.
5. Beyrouthy, T., Kork, S.A., Korbane, J.A. & Abouelela, M. 2017. EEG Mind Controlled Smart Prosthetic Arm – A Comprehensive Study. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2(3), pp.891-899. Available at: <https://doi.org/10.25046/aj0203111>.
6. Bhagat, N.A., Venkatakrisnan, A., Abibullaev, B., Artz, E.J., Yozbatiran, N., Blank, A.A., French, J., Karmonik, C., Grossman, R.G., O'Malley, M.K., Francisco, G.E. & Contreras-Vidal, J.L. 2016. Design and Optimization of an EEG-Based Brain Machine Interface (BMI) to an Upper-Limb Exoskeleton for Stroke Survivors. *Frontiers in Neuroscience*, 10(March), art.number:122, pp.1-17. Available at: <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00122>.
7. Bhattacharyya, S., Konar, A. & Tibarewala, D.N. 2014. Motor imagery, P300 and error-related EEG-based robot arm movement control for rehabilitation purpose. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 52, pp.1007-1017. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11517-014-1204-4>.
8. Bousseta, R., Ouakouak, I.El, Gharbi, M. & Regragui, F. 2018. EEG Based Brain Computer Interface for Controlling a Robot Arm Movement Through Thought. *IRBM*, 39(2), pp.129-135. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2018.02.001>.
9. Brauchle, D., Vukelić, M., Bauer, R. & Gharabaghi, A. 2015. Brain state-dependent robotic reaching movement with a multi-joint arm exoskeleton: Combining brain-machine interfacing and robotic rehabilitation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(October), art.number:564, pp.1-13. Available at: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00564>.
10. Bridges, M.M., Para, M.P. & Mashner, M.J. 2011. Control system architecture for the modular prosthetic limb. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 30(3), pp.217-222 [online]. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=aaefaff90b3f4102edb9c8de565a08ff1641deb5> [Accessed: 20November 2022]
11. Bright, D., Nair, A., Salvekar, D. & Bhisikar, S. 2016. EEG-based brain controlled prosthetic arm. In: 2016 Conference on Advances in Signal Processing (CASP), Pune, India, pp.479-483, June 09-11. Available at: <https://doi.org/10.1109/CASP.2016.7746219>.
12. Buerkle, A., Eaton, W., Lohse, N., Bamber, T. & Ferreira, P. 2021. EEG based arm movement intention recognition towards enhanced safety in symbiotic Human-Robot Collaboration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 70(August), art.number:102137. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102137>.
13. Chaudhry, A., Khan, U., Palla, M.R. & Singh, S.B. 2022. A Prosthetic Arm Based on Electroencephalography by Signal Acquisition and Processing on MATLAB. *IJRESM - International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 5(1), pp.119-124 [online]. Available at: <https://journals.resaim.com/ijresm/article/view/1691> [Accessed: 20November 2022].
14. Chinta, A., Mathur, M. & Lal, A.M. 2020. Mind Wave Controlled Prosthetic ARM Without using Brain Implants. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(5), pp.1615-1618. Available at: <https://doi.org/10.35940/ijrte.e4801.018520>.
15. Comani, S., Velluto, L., Schinaia, L., Cerroni, G., Serio, A., Buzzelli, S., Sorbi, S. & Guarnieri, B. 2015. Monitoring Neuro-Motor Recovery From Stroke With High-Resolution EEG, Robotics and Virtual Reality: A Proof of Concept. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 23(6), pp.1106-1116. Available at: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2015.2425474>.
16. Elnady, A.M., Zhang, X., Xiao, Z.G., Yong, X., Randhawa, B.K., Boyd, L. & Menon, C. 2015. A single-session preliminary evaluation of an affordable BCI-controlled arm exoskeleton and motor-proprioception platform. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(March), art.number:168, pp.1-14. Available at: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00168>.
17. Elstob, D. & Secco, E.L. 2016. A Low Cost Eeg Based BCI Prosthetic Using Motor Imagery. *International Journal of Information Technology Convergence and Services (IJITCS)*, 6(1), pp.23-36. Available at: <https://doi.org/10.5121/ijitcs.2016.6103>.
18. Faiman, I., Pizzamiglio, S. & Turner, D.L. 2018. Resting-state functional connectivity predicts the ability to adapt arm reaching in a robot-mediated force field. *Neuroimage*, 174, pp.494-503. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.03.054>.
19. Ferdiansyah, F.A., Prajitno, P. & Wijaya, S.K. 2020. EEG-EMG based bio-robotics elbow orthotics control. *Journal of Physics: Conference Series*, 1528(art.number:012033), pp.1-6. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1528/1/012033>.

20. Formaggio, E., Storti, S.F., Galazzo, I.B., Gandolfi, M., Geroin, C., Smania, N., Spezia, L., Waldner, A., Fiaschi, A. & Manganotti, P. 2013. Modulation of event-related desynchronization in robot-assisted hand performance: brain oscillatory changes in active, passive and imagined movements. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 10(art.number:24). Available at: <https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-24>.
21. Frolov, A.A., Mokienko, O., Lyukmanov, R., Biryukova, E., Kotov, S., Turbina, L., Nadareyshvily, G. & Bushkova, Y. 2017. Post-stroke Rehabilitation Training with a Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface (BCI)-Controlled Hand Exoskeleton: A Randomized Controlled Multicenter Trial. *Frontiers in Neuroscience*, 11(July), art.number:400, pp.1-11. Available at: <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00400>.
22. Fuentes-Gonzalez, J., Infante-Alarcon, A., Asanza, V. & Loayza, F.R. 2021. A 3D-Printed EEG based Prosthetic Arm. In: 2020 IEEE International Conference on E-health Networking, Application & Services (HEALTHCOM), Shenzhen, China, pp.1-5, March, 01-02. Available at: <https://doi.org/10.1109/HEALTHCOM49281.2021.9399035>.
23. Gannouni, S., Belwafi, K., Aboalsamh, H., Alebdi, B., Almassad, Y., AlSamhan, Z. & Alobaedallah, H. 2020. EEG-Based BCI System to Control Prosthesis's Finger Movements (PREPRINT). *Research Square*. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-49613/v1>.
24. Ghani, F., Gaur, B., Varshney, S., Farooq, O. & Khan, Y.U. 2013. Detection of wrist movement using EEG signal for brain machine interface. In: 2013 International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering and Environment, Bandung, Indonesia, pp.5-8, June 23-26. Available at: <https://doi.org/10.1109/TIME-E.2013.6611954>.
25. Ghani, F., Jilani, M., Raghav, M., Farooq, O. & Khan, Y.U. 2012. Elbow movement detection using brain computer interface. In: 2012 8th International Conference on Computing Technology and Information Management (NCM and ICNIT), Seoul, Korea (South), pp.736-740, April 24-26 [online]. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6268597> [Accessed: 20 November 2022].
26. Gupta, S. & Singh, H. 1996. Preprocessing EEG signals for direct human-system interface. *Proceedings IEEE International Joint Symposia on Intelligence and System*, 1996, pp.32-37. Available at: <https://doi.org/10.1109/ijsis.1996.565048>.
27. Hortal, E., Planelles, D., Resquin, F., Climent, J.M., Azorín, J.M. & Pons, J.L. 2015. Using a brain-machine interface to control a hybrid upper limb exoskeleton during rehabilitation of patients with neurological conditions. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 12(art.number:92). Available at: <https://doi.org/10.1186/s12984-015-0082-9>.
28. Huong, N.T.M., Linh, H.Q. & Khai, L.Q. 2018. Classification of left/right hand movement EEG signals using event related potentials and advanced features. In: Vo Van, T., Nguyen Le, T., Nguyen Duc, T. (Eds.) 6th International Conference on the Development of Biomedical Engineering in Vietnam (BME6). *BME 2017. IFMBE Proceedings*, 63, pp.209-215. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4361-1\\_35](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4361-1_35).
29. Javed, A., Tiwana, M.I., Tiwana, M.I., Rashid, N., Iqbal, J. & Khan, U.S. 2017. Recognition of finger movements using EEG signals for control of upper limb prosthesis using logistic regression. *Biomedical Research*, 28(17), pp.7361-7369 [online]. Available at: <https://www.biomedres.info/biomedical-research/recognition-of-finger-movements-using-eeeg-signals-for-control-of-upper-limb-prosthesis-using-logistic-regression-8334.html> [Accessed: 20 November 2022].
30. Jeong, J-H., Lee, B-H., Lee, D-H., Yun, Y-D. & Lee, S-W. 2020. EEG Classification of Forearm Movement Imagery Using a Hierarchical Flow Convolutional Neural Network. *IEEE Access*, 8, pp.66941-66950. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983182>.
31. Karakoc, A., Dogan, D. & Akinci, T.C. 2017. Robotic Arm Control Using The Brain Waves. *The Journal of Cognitive Systems*, 2(2), pp.51-54 [online]. Available at: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jcs/issue/42261/530481> [Accessed: 20 November 2022].
32. Ketenci, S. & Kayikcioglu, T. 2019. Investigation of Theta Rhythm Effect in Detection of Finger Movement. *Journal of Experimental Neuroscience*, 13, pp.1-5. Available at: <https://doi.org/10.1177/1179069519828737>.
33. Krichner, E.A., Tabie, M. & Seeland, A. 2014. Multimodal Movement Prediction - Towards an Individual Assistance of Patients. *PLOS ONE*, 9(1), art.ID:e85060, pp.1-9. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085060>.
34. Li, T., Xue, T., Wang, B. & Zhang, J. 2018. Decoding Voluntary Movement of Single Hand Based on Analysis of Brain Connectivity by Using EEG Signals. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12(November), art.number:381, pp.1-14. Available at: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00381>.

35. Liao, K., Xiao, R., Gonzalez, J. & Ding, L. 2014. Decoding Individual Finger Movements from One Hand Using Human EEG Signals. *PLOS ONE*, 9(1), art.number:e85192, pp.1-12. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085192>.
36. Looned, R., Webb, J., Xiao, Z.G. & Menon, C. 2014. Assisting drinking with an affordable BCI-controlled wearable robot and electrical stimulation: a preliminary investigation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11(art.number:51). Available at: <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-51>.
37. Mandekar, S., Holland, A., Thielen, M., Behbahani, M. & Melnykowycz, M. 2022. Advancing towards Ubiquitous EEG, Correlation of In-Ear EEG with Forehead EEG. *Sensors*, 22(4), art.number:1568. Available at: <https://doi.org/10.3390/s22041568>.
38. Meng, J., Zhang, S., Bekyo, A., Olsoe, J., Baxter, B. & He, B. 2016. Noninvasive Electroencephalogram Based Control of a Robotic Arm for Reach and Grasp Tasks. *Scientific Reports*, 6(art.number:38565), pp.1-15. Available at: <https://doi.org/10.1038/srep38565>.
39. Mohamed, A-K. & Aharonson, V. 2021. Four-class BCI discrimination of right and left wrist and finger movements. *IFAC-PapersOnLine*, 54(21), pp.91-96. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.12.016>.
40. Murphy, D.P., Bai, O., Gorgey, A.S., Fox, J., Lovegreen, W.T., Burkhardt, B.W., Atri, R., Marquez, J.S., Li, Q. & Fei, D-Y. 2017. Electroencephalogram-Based Brain-Computer Interface and Lower-Limb Prosthesis Control: A Case Study. *Frontiers in Neurology*, 8(December), art.number:696, pp.1-8. Available at: <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00696>.
41. Noel, T.C. & Snider, B.R. 2019. Utilizing Deep Neural Networks for Brain: Computer Interface-Based Prosthesis Control. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 35(1), pp.93-101 [online]. Available at: <http://ccsc.org/publications/journals/NW2019.pdf> [Accessed: 20November 2022].
42. Osama, M. & Allauddin, U. 2022. Design and modelling of lower prosthetic limb for additive manufacturing. In: *IMEC-2022:11th International Mechanical Engineering Conference, Karachi, Pakistan*, p.27, January 14-15 [online]. Available at: [https://imec.neduet.edu.pk/sites/default/files/IMEC\\_Proceedings\\_2022.pdf](https://imec.neduet.edu.pk/sites/default/files/IMEC_Proceedings_2022.pdf) [Accessed: 20November 2022].
43. Paek, A.Y., Agashe, H.A. & Contreras-Vidal, J.L. 2014. Decoding repetitive finger movements with brain activity acquired via non-invasive electroencephalography. *Frontiers in Neuroengineering*, 7(March), art.number:3, pp.1-18. Available at: <https://doi.org/10.3389/fneng.2014.00003>.
44. Ramalingam, V.V., Pandian, A. & Parivel, R. 2016. Controlling Artificial Limb Movement System using EEG Signals. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(47), pp.1-7. Available at: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/107945>.
45. Ramos-Murguialday, A., Schürholz, M., Caggiano, V., Wildgruber, M., Caria, A., Hammer, E.M., Halder, S. & Birbaumer, N. 2012. Proprioceptive Feedback and Brain Computer Interface (BCI) Based Neuroprostheses. *PLOS ONE*, 7(10), art.ID:e47048, pp.1-10. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047048>.
46. Rashid, N., Iqbal, J., Javed, A., Tiwana, M.I. & Khan, U.S. 2018. Design of Embedded System for Multivariate Classification of Finger and Thumb Movements Using EEG Signals for Control of Upper Limb Prosthesis. *BioMed Research International*, 2018(art.ID:2695106). Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/2695106>.
47. Setiawan, J.D., Alwy, F., Ariyanto, M., Samudro, L. & Ismail, R. 2021. Flexion and Extension Motion for Prosthetic Hand Controlled by Single-Channel EEG. In: *2021 8th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE)*, Semarang, Indonesia, pp.47-52, September 23-24. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICITACEE53184.2021.9617220>.
48. Shedeed, H.A., Issa, M.F. & El-Sayed, S.M. 2013. Brain EEG signal processing for controlling a robotic arm. In: *2013 8th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES)*, Cairo, Egypt, pp.152-157, November 26-28. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICCES.2013.6707191>.
49. Soekadar, S.R., Witkowski M., Vitiello, N. & Birbaumer, N. 2015. An EEG/EOG-based hybrid brain-neural computer interaction (BNCI) system to control an exoskeleton for the paralyzed hand *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 60(3), pp.199-205. Available at: <https://doi.org/10.1515/bmt-2014-0126>.
50. Steinisch, M., Tana, M.G. & Comani, S. 2013. A Post-Stroke Rehabilitation System Integrating Robotics, VR and High-Resolution EEG Imaging. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 21(5), pp.849-859. Available at: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2013.2267851>.
51. Szabolcsi, R. 2019. *Modern Control Engineering*. Budapest: Óbuda University. ISBN: 978-963-449-1880.

52. Szabolcsi, R. 2020. Control System Design Using MATLAB. Budapest: Óbuda University. ISBN: 978-963-449-1873.
53. Tang, Z., Sun, S., Zhang, S., Chen, Y., Li, C. & Chen, S. 2016. A Brain-Machine Interface Based on ERD/ERS for an Upper-Limb Exoskeleton Control. *Sensors*, 16(2), art.number:2050. Available at: <https://doi.org/10.3390/s16122050>.
54. Tung, S.W., Guan, C., Ang, K.K., Phua, K.S., Wang, C., Zhao, L., Teo, W.P. & Chew, E. 2013. Motor imagery BCI for upper limb stroke rehabilitation: An evaluation of the EEG recordings using coherence analysis. In: 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Osaka, Japan, pp.261-264, July 03-07. Available at: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6609487>.
55. Übeyli, E.D. 2009. Combined neural network model employing wavelet coefficients for EEG signals classification. *Digital Signal Processing*, 19(2), pp.297-308. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2008.07.004>.
56. Vidaurre, C., Klauer, C., Schauer, T., Ramos-Murguialday, A. & Müller, K-R. 2016. EEG-based BCI for the linear control of an upper-limb neuroprosthesis. *Medical Engineering & Physics*, 38(11), pp.1195-1204. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2016.06.010>.
57. Wen, T., Du, Y., Pan, T., Huang, C. & Zhang, Z. 2021. A Deep Learning-Based Classification Method for Different Frequency EEG Data. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2021(art.ID:1972662). Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/1972662>.
58. Witkowski, M., Cortese, M., Cempini, M., Mellinger, J., Vitiello, N. & Soekadar, S.R. 2014. Enhancing brain-machine interface (BMI) control of a hand exoskeleton using electrooculography (EOG). *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11(art.number:165). Available at: <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-165>.
59. Xu, B., Peng, S., Song, A., Yang, R. & Pan, L. 2011. Robot-Aided Upper-Limb Rehabilitation Based on Motor Imagery EEG. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 8(4). Available at: <https://doi.org/10.5772/45703>.
60. Xu, B., Song, A., Zhao, G., Xu, G., Pan, L., Yang, R., Li, H. & Cui, J. 2015. Design and evaluation of a motor imagery electroencephalogram-controlled robot system. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(3). Available at: <https://doi.org/10.1177/1687814015573607>.
61. Yanagisawa, T., Hirata, M., Saitoh, Y., Goto, T., Kishima, H., Fukuma, R., Yokoi, H., Kamitani, Y. & Yoshimine, T. 2011. Real-time control of a prosthetic hand using human electrocorticography signals: Technical note. *JNS – Journal of Neurosurgery*, 114(6), pp.1715-1722. Available at: <https://doi.org/10.3171/2011.1.JNS101421>.
62. Zhang, A., Yang, B. & Huang, L. 2008. Feature extraction of EEG signals using power spectral entropy. In: 2008 International Conference on BioMedical Engineering and Informatics, Sanya, China, pp.435-439, May 27-30. Available at: <https://doi.org/10.1109/BMEI.2008.254>.
63. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). *Information Technology in Medical Diagnostics II*. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>. eBook ISBN 9780429057618.

*Надійшла до редакції 5.09.2023р.*

**БІЛИЙ РУСЛАН ІГОРОВИЧ** – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем Вінницького національного технічного університету, *e-mail: ram13b.biliy@gmail.com*

**ЛЕВИЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ** – Науково-дослідний інститут проблем архітектурно-будівельної екології (НДІ ПАБЕ), Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, *e-mail: levytskyi.v@gmail.com*

RUSLAN BILYY, VOLODYMYR LEVYTSKYI

**REVIEW OF RESEARCH IN THE DIRECTION OF EEG-BASED CONTROL METHOD FOR BIONIC PROSTHESIS**

Vinnitsia National Technical University  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine