

УДК 612.67

Р. І. БІЛИЙ

ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ В НАПРЯМКУ МІОЕЛЕКТРИЧНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ БІОНІЧНИМ ПРОТЕЗОМ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Анотація. Міоелектричне керування біонічними протезами є важливою галуззю досліджень у сфері реабілітації. Інтуїтивне та інтелектуальне міоелектричне керування може відновити функцію верхньої кінцівки. Однак багато досліджень зараз фокусуються на розвиток різноманітних міоелектричних та біотехнічних методів управління, обмежуючи дослідження складних щоденних завдань маніпулювання протезом, таких як захоплення та відпускання. У статті розглядаються найновіші досягнення у напрямі дослідження управління біонічним протезом. Зокрема, увага приділяється методам визначення намірів руху, класифікації дискретних рухів, оцінки неперервних рухів, одноканальне управління, управління зворотнім зв'язком та комбіноване управління. Моторні нейрони групують вхідні сигнали від центральної нервової системи, які впливають на м'язи та формуючи моторні одиниці. Сигнал електроміографії коливається в межах ± 5000 мкВ з частотою від 6 до 500 Гц, відображає характеристики м'язового скорочення. Залежно від розташування датчиків, сигнали ЕМГ поділяються на внутрішньом'язову та поверхневу електроміографію. Внутрішньом'язова електроміографія надає точне вивчення активації м'язів, але вимагає імплантації датчиків, що може призводити до фізичних проблем. ЕМГ, який знімає сигнал з поверхні шкіри, простіший у використанні і широко використовується в міоелектричних протезів.

Ключові слова: міоелектричне керування; визначення намірів; стратегія управління; руки протези з розширеною функціональністю; зменшення навантаження на користувача.

Abstract. Myoelectric control of bionic prostheses is an important field of research in the field of rehabilitation. Intuitive and intelligent myoelectric control can restore upper limb function. However, much research now focuses on the development of various myoelectrical and biotechnical control methods, limiting research to the complex daily tasks of prosthetic manipulation, such as grasping and releasing. The article examines the latest advances in the research areas of bionic prosthesis management. In particular, attention is paid to the methods of determining movement intentions, classification of discrete movements, estimation of continuous movements, single-channel control, feedback control and combined control. Motor neurons group input signals from the central nervous system that affect muscles and form motor units. The electromyography (EMG) signal, which is obtained by recording motor neuron action potentials, reflects muscle activity. This signal, oscillating within ± 5000 μ V with a frequency of 6 to 500 Hz, reflects the characteristics of muscle contraction. Depending on the location of the sensors, EMG signals are divided into intramuscular and surface electromyography. Intramuscular electromyography provides an accurate study of muscle activation, but requires the implantation of sensors, which can lead to physical problems. EMG, which captures a signal from the surface of the skin, is easier to use and is widely used in experiments with myoelectric prostheses.

Keywords: myoelectric control; determination of intentions; management strategy; prosthetic hands with extended functionality; reducing the load on the user.

DOI: 10.31649/1681-7893-2023-46-2-142-149

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Стан досліджень міоелектричного керування вказує на передові технології та застосування, але існують такі виклики: потреба у функціональному декодуванні намірів рухів для зручного маніпулювання протезною рукою; брак досліджень щодо складних щоденних маніпуляцій, що вимагають постійної маніпуляції та динамічного налаштування сили захоплення; потреба урівноваження підходів до визнання можливостей та врахування думки користувачів для покращення навчання та керування міоелектричними протезами.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Попередні роботи досліджували різні аспекти дослідження, включаючи методи розпізнавання рухів верхніх кінцівок на основі ЕМГ [1], застосування глибокого навчання в багатозадачних взаємодіях людина–машина на основі ЕМГ [2], різноманітні показники ефективності в міоелектричному керуванні [3].

Мета статті. Надати комплексний огляд основних досліджень міоелектричного керування з фокусом на розпізнавання рухів; розділити поточний стан досліджень міоелектричного керування на аспекти для ретельного огляду; розглянути поточні виклики та перспективи дослідження біонічних протезів руки, маючи на меті надати нову перспективу для розвитку галузі міоелектричного керування.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Дослідження в області вимірювання сигналу ЕМГ вивчає методи та технології, спрямовані на отримання та аналіз електричних сигналів, що генеруються м'язами під час їхньої активності. Такі сигнали можуть бути використані для розуміння намірів руху і керування протезами.

Дослідження розпізнавання наміру рухів на основі ЕМГ є важливим напрямком в розвитку технологій, спрямованих на вдосконалення систем керування протезами.

Ghaderi, P. та ін. [4] запропонували три нові функції ЕМГ на основі оцінки ймовірності, щоб покращити точність класифікації великої кількості рухів руки. Вони досягли точності $98.99 \pm 1.36\%$ при класифікації 40 рухів кисті та зап'ястку, включаючи 40 здорових і 11 осіб з ампутованими кінцівками. Pizzolato, S. ін. [5] провели порівняльний експеримент на 6 існуючих пристроїв для збору даних і 41 завдання класифікації рухів руки. Хоча найвищий рівень точності був лише $74.01 \pm 7.59\%$, це дослідження надає референсне рішення для біонічних протезів. Sri-Iesaranusorn, P. та ін. [6] досягли високоточного розпізнавання 41 руху кисті та зап'ястку на основі сигналів ЕМГ з використанням глибоких нейронних мереж з точністю до 90%. Згідно з їхніми результатами, це наразі дослідження з найбільшою кількістю передвизначених типів рухів з точністю більше 90%. Zhai, X. та ін. [7] реалізували ефективну функцію самоперекалібрування для міоелектричного керування, поєднуючи класифікатор із простим механізмом оновлення міток, але найвища точності досягає лише 61.7%, у завданні класифікації використовувались 50 різновидів жестів руки, механізм оновлення міток покращив точність класифікатора на 10.18%.

Таблиця 1

Підходи до класифікації рухів руки за допомогою сигналів електроміографії

Дослідник	Підхід	Точність
Парвіз Гадері	Запропонували три нові функції ЕМГ на основі оцінки ймовірності	$98.99 \pm 1.36\%$
Піццолотота	Провели порівняльний експеримент на 6 існуючих пристроїв для збору даних і 41 завдання класифікації рухів руки.	$74.01 \pm 7.59\%$,
Панявут	Використали глибокі нейронні мережі для високоточного розпізнавання 41 рухів кисті та зап'ястку на основі сигналів ЕМГ.	90%
Чжай	Реалізували ефективну функцію самоперекалібрування для міоелектричного керування, поєднуючи класифікатор CNN із простим механізмом оновлення міток.	61.7%

Завдання неперервної оцінки руху спрямовані на захоплення всього процесу рухів руки користувача, включаючи різні етапи виконання однієї дії та перехідні етапи між різними діями. Більшість досліджень у сфері розпізнавання неперервного наміру руху починається з перевірки можливості завдань оцінки руху з однією ступенем свободи, перед тим як поступово переходити до завдань, які оцінюють дві чи більше ступеня свободи.

Karzelner, T. та ін. [8] використовували розділення ЕМГ на частини, щоб передбачити три кути спрямування зап'ястя. Їхні результати продемонстрували, що нейронні характеристики, отримані з розділенням ЕМГ, перевершують традиційні методи оцінки руху.

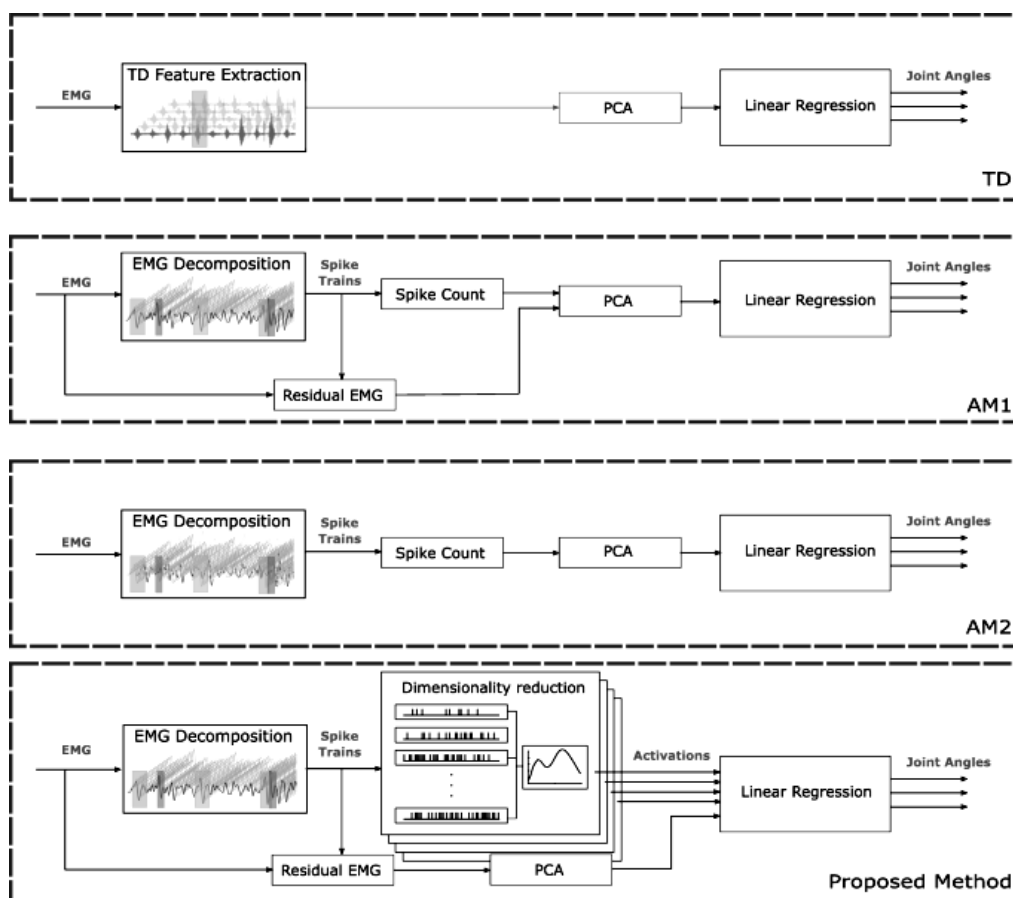


Рисунок 1 - Блок-схема етапів обробки і порівнювання ознак [8]

Dai, C. та ін. [9] досягли оцінки руху суглобів одного пальця під час руху у спосіб згинання та випрямлення без перерви. Вони покращили продуктивність методу регресії для моделювання природних рухів пальця, поєднуючи сенсори масиву ЕМГ та незалежний компонентний аналіз. He, Z. та ін. [10] дослідили м'язові синергії з даних ЕМГ для передбачення кутів обертання зап'ястя, великого, вказівного та середнього пальця з одним ступенем свободи. Їхні результати продемонстрували вищу точність передбачення порівняно з традиційними алгоритмами та методами машинного навчання. Zhang, Q. та ін. [11] запропонували метод регресії Гауссового процесу, щоб досягти одночасної оцінки руху суглоба у завданнях функціонального зіплення. Цей метод корисний для інтуїтивного та точного управління біонічним протезом. Yang, W. та ін. [12] успішно декодували складні рухи зап'ястя з трьома ступенями свободи безпосередньо з сигналів ЕМГ. Їхні висновки продемонстрували високу точність цього методу, переважаючи за векторну регресію.

Дослідження методів управління в основному спрямоване на те, як ефективно та інтуїтивно виконувати визначені наміри за допомогою міоелектричних протезів. З урахуванням складності системи управління поточні дослідження методів управління можна розділити на три категорії: одноканальне управління, управління зворотнім зв'язком та комбіноване управління.

Одноканальне керування включає однонаправлене керування міоелектричною протезною рукою, де намір рухів користувача є єдиним джерелом управління. Це можна досягти шляхом прямого відображення амплітуди сигналу чи характеристик сигналу на активацію чи ступінь руху протезної руки.

Nahne, J.M. та ін. [13] успішно застосували методи регресії для одноканального керування міоелектричним протезом та дослідили вплив різних положень руки та обмежень у часі. Запропонований перевищує деякі клінічні методи керування та демонструє стійку продуктивність протягом кількох днів у п'яťох користувачів протезів. Di Domenico, D. та ін. [14] дослідили переваги нелінійних класифікаторів регресії для одноканального керування міоелектричною системою, проводячи експерименти, в яких користувачі інтуїтивно керували протезом.

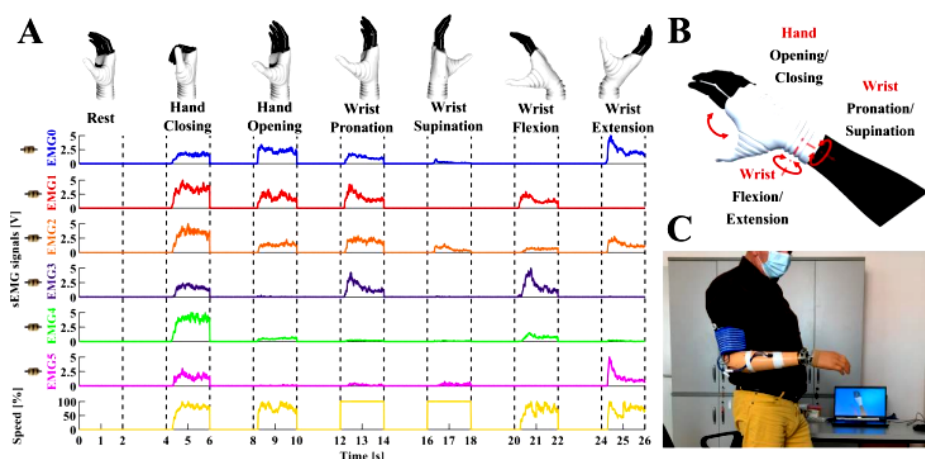


Рисунок 2 - Сигнали ЕМГ при виконанні різних жестів[14]

Riazza, C. та ін. [15] успішно поєднали ймовірно-зважувальну регресію з сигналами ЕМГ для одночасного управління кількома ступенями свободи. Алгоритм продемонстрував відмінну ефективність у випадку двох ступенів свободи і дозволив користувачам виконувати декілька щоденних завдань за допомогою протезу зап'ястя з двома ступенями свободи. Lukuяnenko, P. та ін. [16] запропонували стійкий метод одноканального керування для міоелектричного протезу, досягаючи тривалого використання управління 3 ступенів свободи протягом 10 місяців та управління 4 ступенями свободи протягом 9 місяців.

Загалом дослідження методів одноканального керування міоелектричним протезом зосереджено на практичному застосуванні технік регресії в клінічній практиці з метою збільшення кількості ступенів свободи, якими користувачі можуть одночасно керувати.

Зворотний зв'язок у протезах є актуальною темою сучасних досліджень, яка в останні роки зазнала стрімкого зростання.

Ху, Н. та ін. [17] продемонстрували відновлення тактильного відчуття для конкретних пальців за допомогою електричної стимуляції, що дозволяло користувачам успішно розрізнити стан стискання пальців, кривизну та жорсткість предметів. Їх результати свідчать про те, що користувачі могли розрізнити об'єкти з різною кривизною та жорсткістю з точністю понад 90%. Shehata, A.W. та ін. [18] дослідили використання методу керування зворотнім зв'язком з аудіоідами, яка виявилася більш ефективною за метод одноканального керування з точки зору ефективності шляху та інших параметрів. Їх результати експериментів показали, що використання покращеного керування за допомогою зворотного зв'язку може покращити як короткострокову, так і довгострокову ефективність протезу. Li, K. та ін. [19] розробили портативний електричний тактильний стимулятор та використовували його в якості віртуального захоплення з використанням міоелектричного керування. Результати їх експериментів показали, що успішність захоплення з контролем електричного тактильного зворотного зв'язку була вищою, ніж у випадку методу одноканального керування.

Таблиця 2

Основні напрямки до відновлення тактильного відчуття

Метод	Покращення
Електрична стимуляція	розрізнення стану стискання пальців, кривизни та жорсткості предметів з точністю понад 90%
Керування зворотнім зв'язком	точність визначення тактильного відчуття у порівнянні з методом одноканального керування

Під час експериментів із захопленням важких предметів користувачам потрібно було витратити менше зусиль, що ефективно полегшує м'язове втомлення, пов'язане із виконанням завдань. Cha, H. та ін. [20] запропонували новий метод для надання зворотного зв'язку щодо інформації про захоплення для протезів та побудували інтегровану систему замкнутого циклу для експериментальної перевірки, яка складалася з моделі класифікації ЕМГ, запропонованого тактильного пристрою та протезом. Результати

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

експериментів показали, що застосування цього нового методу зворотного зв'язку може покращити точність визначення тактильного відчуття та має потенціал застосування в керуванні протезними руками.

Дослідження показують, що керування за допомогою зворотного зв'язку не лише поліпшує ефективність та практичність протезних рук, але і покращує взаємодію користувача з їх біонічною кінцівкою.

Концепція комбінованого контролю це підхід до управління міоелектричними протезами, який поєднує різні методи контролю для поліпшення ефективності та зручності використання.

Mouchoux, J [21] запропонували нову напівавтономну схему керування з зворотним зв'язком, яка не тільки покращила гнучкість керування протезом, але також ефективно покращила використання, скорочуючи час операції та зменшуючи м'язову активність. Castro, M.N. [22] розробили схему комбінованого контролю, розмістивши датчик глибини на задній частині протезу, що дозволяло онлайн взаємодію між користувачами та протезом. Користувачі сконцентрувалися на об'єкті в цілому або частині, а система керування постійно реагувала і виконувала необхідні дії. Starke, J. та інш. [23] запропонували напівавтономну схему керування на основі візуального визначення об'єктів для автоматичного вибору та виконання траєкторій захвату та положень зап'ястка. Їх результати показали, що, порівняно з традиційним міоелектричним керуванням, метод комбінованого контролю на основі зорового визначення забезпечує швидший та менш фізично напружений процес захоплення. Vasile, F та інш. [24] розробили підхід на основі "вивчення рука-око" для управління рукою перед захопленням об'єкта, відповідно до введення від камери, закріпленої на зап'ястку. Cipriani, C. та ін. [25] порівняли три типи схем комбінованого контролю тактильного сприйняття: повністю автономний контроль, напівавтономний контроль та прямий контроль користувача, і виявили, що користувачі віддають перевагу схемі напівавтономного контролю, навіть якщо результати керування приблизно однакові. Zhuang, K.Z. [26] розробили схему комбінованого контролю на основі тактильних сенсорів, розташованих всередині протезу. Протез виконував захоплювальний рух на основі наміру користувача, а потім автоматично максимізувала площу контакту між рукою та об'єктом з урахуванням тактильного зворотного зв'язку, ефективно підвищуючи витривалість користувача та допомагаючи досягти стабільного захоплення. Seppich, N.[27] розмістили тактильні сенсори в кінці протезної руки для сприйняття форми та твердості об'єкта та надавали зворотний зв'язок користувачеві для покращення продуктивності завдань. Їхні результати підтвердили, що запропонований підхід успішно допоміг користувачам виконати завдання закручування лампочки та перевертання кубків. Mouchoux, J. [28] використовували датчик тиску, розташований на великому пальці, для виявлення контакту з цільовим об'єктом, що дозволяло автономному контролеру оцінити поточний етап виконання завдання та реалізувати спільний контроль протезної руки на основі трьох різних намірів користувача та рішення автономного контролера.

Таблиця 3

Порівняння методів керування протезами руки

Дослідник	Переваги	Недоліки
Mouchoux, J	Гнучкість керування: Покращена можливість адаптації до різних сценаріїв. Ефективність використання: Зменшення часу операції та м'язової активності.	Складність реалізації: Вимагає детального налаштування та калібрування.
Кастро ет аль	Онлайн взаємодія: Можливість користувача концентруватися на об'єкті в реальному часі. Адаптивність: Система реагує на зміни у сценарії користувача.	Складність технічної реалізації: Потребує високотехнічних датчиків та обчислювальних ресурсів.
Штарке ет аль	Візуальне визначення об'єктів: Швидше та менш фізично напружене захоплення. Зменшення навантаження на користувача: Менше зусиль для взаємодії з протезом.	Залежність від освітлення та об'єктів: Може виявитися менш ефективним в різних умовах.
Vasile, F	Вивчення рука-око: Покращене управління перед захопленням об'єкта. Комфорт користувача: Введення від камери, закріпленої на зап'ястку.	Обмеження в зоровому полі: Вплив на ефективність в разі обмеженого зорового поля.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Cipriani, C	Популярність напівавтономного контролю: Користувачі віддають перевагу цьому типу контролю. Баланс між автономією та контролем користувача: Ефективний компроміс.	Вимоги до навчання: Може знадобитися час для звикання користувача.
Zhuang, K.Z	Тактильні сенсори всередині протезу: Покращене захоплення та витривалість. Система зворотного зв'язку: Допомогає досягти стабільного захоплення.	Складність підтримки: Вимагає систем зворотного зв'язку та обслуговування сенсорів.
Seppich, N	Тактильні сенсори в кінці протезу: Збільшення функціональності та реалізму. Покращення продуктивності: Завдяки зворотньому зв'язку користувача.	Складність інтеграції: Вимагає тщательної інтеграції сенсорів та системи керування.
Mouchoux, J	Використання датчика тиску: Оцінка контакту з цільовим об'єктом. Спільний контроль: Взаємодія між користувачем та автономним контролером.	Операційна складність: Вимагає точного налаштування та калібрування.

Схеми комбінованого контролю мають на меті зменшити розрив між намірами користувача та очікуваннями виконання завдань шляхом поєднання намірів руху користувача та рішень, прийнятих протезом на основі власного сприйняття. Це ефективно долає обмеження міоелектричним схем керування, що повністю ґрунтуються на намірах користувача. Крім того, ці схеми значно знімають навантаження з користувача, компенсують недостатню функцію м'язів та підвищують надійність міоелектричного керування.

ВИСНОВКИ

Було проведено всебічне дослідження останніх досягнень в області міоелектричного керування біонічним протезом. А також розглянуто основні концепції міоелектричного керування, включаючи обробку сигналів ЕМГ, визначення дискретних рухів та оцінка неперервних рухів. Крім того, розглянуто останні досягнення в області методів управління.

Дослідження виконано за підтримки гранту Національного фонду досліджень України 2022.01/0135.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Bi, L.; Guan, C. A review on EMG-based motor intention prediction of continuous human upper limb motion for human-robot collaboration. *Biomed. Signal Process. Control* 2019, 51, 113–127. [CrossRef]
2. Xiong, D.; Zhang, D.; Zhao, X.; Zhao, Y. Deep learning for EMG-based human-machine interaction: A review. *IEEE/CAA J. Autom. Sin.* 2021, 8, 512–533. [CrossRef]
3. Mohebbian, M.R.; Nosouhi, M.; Fazilati, F.; Esfahani, Z.N.; Amiri, G.; Malekifar, N.; Yusefi, F.; Rastegari, M.; Marateb, H.R. A Comprehensive Review of Myoelectric Prosthesis Control. *arXiv* 2021, arXiv:2112.13192.
4. Ghaderi, P.; Nosouhi, M.; Jordanic, M.; Marateb, H.R.; Mañanas, M.A.; Farina, D. Kernel density estimation of electromyographic signals and ensemble learning for highly accurate classification of a large set of hand/wrist motions. *Front. Neurosci.* 2022, 16, 796711. [CrossRef]
5. Pizzolato, S.; Tagliapietra, L.; Cognolato, M.; Reggiani, M.; Müller, H.; Atzori, M. Comparison of six electromyography acquisition setups on hand movement classification tasks. *PloS ONE* 2017, 12, e0186132. [CrossRef]

6. Sri-Iesaranusorn, P.; Chaiyaroj, A.; Buekban, C.; Dumnin, S.; Pongthornseri, R.; Thanawattano, C.; Surangsrirat, D. Classification of 41 hand and wrist movements via surface electromyogram using deep neural network. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2021, 9, 548357. [CrossRef]
7. Zhai, X.; Jelfs, B.; Chan, R.H.; Tin, C. Self-recalibrating surface EMG pattern recognition for neuroprosthesis control based on convolutional neural network. *Front. Neurosci.* 2017, 11, 379. [CrossRef] [PubMed]
8. Kapelner, T.; Vujaklija, I.; Jiang, N.; Negro, F.; Aszmann, O.C.; Principe, J.; Farina, D. Predicting wrist kinematics from motor unit discharge timings for the control of active prostheses. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2019, 16, 47. [CrossRef]
9. Dai, C.; Hu, X. Finger joint angle estimation based on motoneuron discharge activities. *IEEE J. Biomed. Health Inform.* 2019, 24, 760–767. [CrossRef]
10. He, Z.; Qin, Z.; Koike, Y. Continuous estimation of finger and wrist joint angles using a muscle synergy based musculoskeletal model. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3772. [CrossRef]
11. Zhang, Q.; Pi, T.; Liu, R.; Xiong, C. Simultaneous and proportional estimation of multijoint kinematics from EMG signals for myocontrol of robotic hands. *IEEE/ASME Trans. Mech.* 2020, 25, 1953–1960. [CrossRef]
12. Yang, W.; Yang, D.; Liu, Y.; Liu, H. Decoding simultaneous multi-DOF wrist movements from raw EMG signals using a convolutional neural network. *IEEE Trans. Hum. Mach. Syst.* 2019, 49, 411–420. [CrossRef]
13. Hahne, J.M.; Schweisfurth, M.A.; Koppe, M.; Farina, D. Simultaneous control of multiple functions of bionic hand prostheses: Performance and robustness in end users. *Sci. Robot.* 2018, 3, eaat3630. [CrossRef]
14. Di Domenico, D.; Marinelli, A.; Boccardo, N.; Semprini, M.; Lombardi, L.; Canepa, M.; Stedman, S.; Bellingegni, A.D.; Chiappalone, M.; Gruppioni, E.; et al. Hannes prosthesis control based on regression machine learning algorithms. In *Proceedings of the 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Prague, Czech Republic, 27 September–1 October 2021; pp. 5997–6002.
15. Piazza, C.; Rossi, M.; Catalano, M.G.; Bicchi, A.; Hargrove, L.J. Evaluation of a simultaneous myoelectric control strategy for a multi-DoF transradial prosthesis. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2020, 28, 2286–2295. [CrossRef]
16. Lukyanenko, P.; Dewald, H.A.; Lambrecht, J.; Kirsch, R.F.; Tyler, D.J.; Williams, M.R. Stable, simultaneous and proportional 4-DoF prosthetic hand control via synergy-inspired linear interpolation: A case series. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2021, 18, 50. [CrossRef] [PubMed]
17. Xu, H.; Chai, G.; Zhang, N.; Gu, G. Restoring finger-specific tactile sensations with a sensory soft neuroprosthetic hand through electrotactile stimulation. *Soft Sci.* 2022, 2, 19. [CrossRef]
18. Shehata, A.W.; Scheme, E.J.; Sensinger, J.W. Audible feedback improves internal model strength and performance of myoelectric prosthesis control. *Sci. Rep.* 2018, 8, 8541. [CrossRef]
19. Li, K.; Zhou, Y.; Zhou, D.; Zeng, J.; Fang, Y.; Yang, J.; Liu, H. Electrotactile Feedback-Based Muscle Fatigue Alleviation for Hand Manipulation. *Int. J. Humanoid Robot.* 2021, 18, 2050024. [CrossRef]
20. Cha, H.; An, S.; Choi, S.; Yang, S.; Park, S.; Park, S. Study on Intention Recognition and Sensory Feedback: Control of Robotic Prosthetic Hand Through EMG Classification and Proprioceptive Feedback Using Rule-based Haptic Device. *IEEE Trans. Haptics* 2022, 15, 560–571. [CrossRef]
21. Mouchoux, J.; Carisi, S.; Dosen, S.; Farina, D.; Schilling, A.F.; Markovic, M. Artificial perception and semiautonomous control in myoelectric hand prostheses increases performance and decreases effort. *IEEE Trans. Robot.* 2021, 37, 1298–1312. [CrossRef]
22. Castro, M.N.; Dosen, S. Continuous Semi-autonomous Prosthesis Control Using a Depth Sensor on the Hand. *Front. Neurobot.* 2022, 16, 814973. [CrossRef]
23. Starke, J.; Weiner, P.; Crell, M.; Asfour, T. Semi-autonomous control of prosthetic hands based on multimodal sensing, human grasp demonstration and user intention. *Robot. Auton. Syst.* 2022, 154, 104123. [CrossRef]
24. Vasile, F.; Maiettini, E.; Pasquale, G.; Florio, A.; Boccardo, N.; Natale, L. Grasp Pre-shape Selection by Synthetic Training: Eye-in-hand Shared Control on the Hannes Prosthesis. In *Proceedings of the 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Kyoto, Japan, 23–27 October 2022; pp. 13112–13119.
25. Cipriani, C.; Zaccone, F.; Micera, S.; Carrozza, M.C. On the shared control of an EMG-controlled prosthetic hand: Analysis of user–prosthesis interaction. *IEEE Trans. Robot.* 2008, 24, 170–184. [CrossRef]

26. Zhuang, K.Z.; Sommer, N.; Mendez, V.; Aryan, S.; Formento, E.; D'Anna, E.; Artoni, F.; Petrini, F.; Granata, G.; Cannaviello, G.; et al. Shared human–robot proportional control of a dexterous myoelectric prosthesis. *Nat. Mach. Intell.* 2019, 1, 400–411. [CrossRef]
27. Seppich, N.; Tacca, N.; Chao, K.Y.; Akim, M.; Hidalgo-Carvajal, D.; Pozo Fortuni'c, E.; Tödtheide, A.; Kühn, J.; Haddadin, S. CyberLimb: A novel robotic prosthesis concept with shared and intuitive control. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2022, 19, 41. [CrossRef]
28. Mouchoux, J.; Bravo-Cabrera, M.A.; Dosen, S.; Schilling, A.F.; Markovic, M. Impact of shared control modalities on performance and usability of semi-autonomous prostheses. *Front. Neurobot.* 2021, 15, 172. [CrossRef] [PubMed]

Надійшла до редакції 5.09.2023р.

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

Ruslan BILYY

**REVIEW OF RESEARCH TOWARDS THE MYOELECTRIC METHOD OF CONTROLLING
BIONIC PROSTHESIS**

Vinnytsia National Technical University