

АНАЛІЗ ГІБРИДНОЇ МОДЕЛІ BiLSTM–BiGRU ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ EEG-СИГНАЛІВ МОТОРНОЇ УЯВИ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ІНВАЛІДНИМИ ВІЗКАМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проаналізовано сучасні підходи до створення інтелектуальних систем керування інвалідними візками на основі мозково-комп'ютерних інтерфейсів (BCI). Особливу увагу приділено використанню електроенцефалографічних (EEG) сигналів моторної уяви для hands-free навігації. Розглянуто застосування гібридної моделі BiLSTM–BiGRU, яка демонструє високу точність класифікації EEG-сигналів та перевищує результати базових алгоритмів. Отримані результати підтверджують перспективність поєднання глибокого навчання та BCI у сфері реабілітаційних технологій, спрямованих на підвищення автономності осіб з обмеженими можливостями.

Ключові слова: електроенцефалографія, мозково-комп'ютерний інтерфейс, гібридна модель BiLSTM–BiGRU, моторна уява.

Abstracts

This paper analyzes modern approaches to developing intelligent control systems for wheelchairs based on brain-computer interfaces (BCI). Particular attention is paid to the use of electroencephalographic (EEG) signals of motor imagery for hands-free navigation. The application of the hybrid BiLSTM–BiGRU model is examined, which demonstrates high accuracy in classifying EEG signals and outperforms the results of baseline algorithms. The results confirm the promise of combining deep learning and BCI in the field of rehabilitation technologies aimed at increasing the autonomy of people with disabilities.

Keywords: electroencephalography, brain-computer interface, BiLSTM–BiGRU hybrid model, motor imagery.

Вступ

Розглянуто статтю, опубліковану на платформі *ResearchGate* — “*EEG-based AI-BCI Wheelchair Advancement: Hybrid Deep Learning with Motor Imagery for Brain Computer Interface*” (автори: Vipul Thapa, Viplov Paneru, Bishwash Paneru, Khem Narayan Poudyal) [1]. У роботі запропоновано систему керування інвалідним візком на основі мозково-комп'ютерного інтерфейсу (BCI - технологія прямого зв'язку між мозком людини та зовнішнім пристроєм) [2], яка використовує електроенцефалографічні сигнали (EEG — метод реєстрації електричної активності кори головного мозку) [3] моторної уяви, тобто уявні рухи без фізичного виконання. Для класифікації даних застосовано гібридну модель BiLSTM–BiGRU (Bidirectional Long Short-Term Memory та Bidirectional Gated Recurrent Unit — рекурентні нейронні мережі для аналізу часових залежностей) [4], що забезпечила точність понад 92%. Реалізація системи здійснена у Python-середовищі (мова програмування для наукових та прикладних задач) [5] з використанням одноплатного комп'ютера для інтеграції апаратних рішень Raspberry Pi [6], що дозволило створити симуляційний графічний інтерфейс Tkinter та апаратну схему інтеграції з драйвером двигунів.

Результати дослідження

У статті [1] описано створення інтелектуальної системи керування інвалідним візком на основі мозково-комп'ютерного інтерфейсу (BCI [2]), яка використовує електроенцефалографічні сигнали (EEG [3]) моторної уяви рухів правої та лівої руки. Для аналізу застосовано метод ERP (Event-Related Potential — потенціали, пов'язані з подіями [8]), що дозволяє виділити характерні хвилі мозкової активності у відповідь на стимул, зокрема компонент P300, який є маркером когнітивної обробки сигналів.

Для класифікації сигналів використано гібридну модель BiLSTM–BiGRU [4], яка поєднує здатність LSTM до збереження довготривалих залежностей та ефективність GRU у роботі з послідовними даними. Система реалізована у Python-середовищі [5] з використанням Raspberry Pi [6], що дозволило створити симуляційний графічний інтерфейс Tkinter та апаратну схему інтеграції з драйвером двигунів. Концептуальна схема роботи

системи наведена на *рисунку 1*, де показано етапи прийняття сигналів, їх переробки, формування прогнозів і контролю рухів візка, а також зворотний зв'язок між пацієнтом та системою.

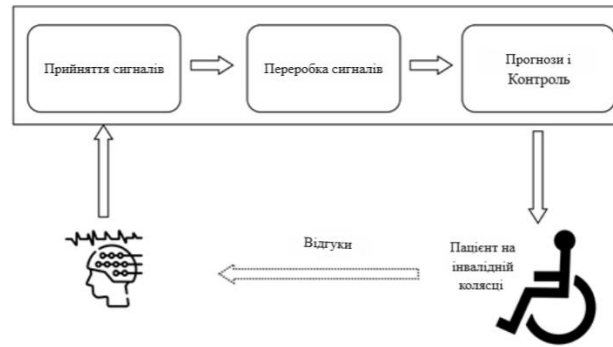


Рисунок 1- Концептуальна схема роботи мозково-комп'ютерного інтерфейсу для керування інвалідним візком.

Порівняльний аналіз показав, що BiLSTM–BiGRU досягла точності понад 92%, перевищивши результати інших моделей. Зокрема, XGBoost (eXtreme Gradient Boosting — алгоритм ансамблевого навчання, що поєднує слабкі моделі у сильний класифікатор [9]) показав точність близько 86%. EEGNet (компактна згортова нейронна мережа, спеціально розроблена для обробки EEG-сигналів [10]) досягла лише 65%, що свідчить про її обмеженість у складних задачах класифікації моторної уяви. Transformer-модель (архітектура на основі механізму багатоголової уваги, яка дозволяє ефективно працювати з послідовними даними [11]) показала результат близько 87%, але поступилася гібридній BiLSTM–BiGRU за стабільністю та узагальненням даних.

Додатково автори відзначають, що використання Raspberry Pi [6] як апаратної платформи робить систему доступною та економічно вигідною для практичного застосування. Це відкриває можливість створення портативних рішень, які можна інтегрувати у реабілітаційні центри або домашні умови. Завдяки простоті інтеграції та підтримці численних периферійних пристроїв Raspberry Pi дозволяє масштабувати систему та додавати нові функції, наприклад сенсори для виявлення перешкод чи модулі бездротового зв'язку. Апаратна схема підключення наведена на *рисунку 2*, де показано взаємодію Raspberry Pi з драйвером двигунів L298N та електродвигуном, що живиться від зовнішнього джерела живлення.

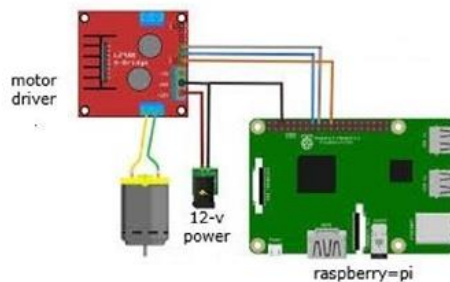


Рисунок 2 – Схема апаратної реалізації системи.

Ще одним важливим аспектом є використання Python [5] як основного середовища програмування. Це забезпечує гнучкість у розробці та підтримку великої кількості бібліотек для обробки сигналів, машинного навчання та створення графічних інтерфейсів. Такий вибір робить систему відкритою для подальших модифікацій та адаптацій під конкретні потреби користувачів.

У перспективі автори пропонують розширити систему шляхом інтеграції багатомодальних сигналів, зокрема ЕОГ (електроокулографія) та ЕМГ (електроміографія), що дозволить підвищити точність класифікації та зробити систему більш надійною у реальних умовах [7]. Це відповідає сучасним тенденціям у розвитку ВСІ-технологій, де поєднання різних джерел біосигналів забезпечує більш стійке та адаптивне керування.

Висновки

Запропонована система керування інвалідним візком на основі мозково-комп'ютерного інтерфейсу підтвердила свою ефективність у використанні EEG-сигналів моторної уяви для hands-free навігації. Гібридна модель BiLSTM–BiGRU [4] продемонструвала найвищу точність класифікації порівняно з іншими алгоритмами, такими як XGBoost [9], EEGNet [10] та Transformer [11], що свідчить про її перевагу у стабільності та здатності узагальнювати дані.

Практична реалізація системи на базі Raspberry Pi [6] та Python [5] показала можливість створення доступних і масштабованих рішень для реабілітаційних центрів та домашнього використання. Подальший розвиток у напрямку багатомодальних систем (ЕЕГ, ЕОГ, ЕМГ [7]) дозволить підвищити точність і надійність, а також забезпечити більш широкий спектр застосувань у сфері допоміжних технологій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Thapa, B., Paneru, B., Paneru, B., Poudyal, K.N. EEG-based AI-BCI Wheelchair Advancement: Hybrid Deep Learning with Motor Imagery for Brain Computer Interface [Електронний ресурс]. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/396048145_EEG-based_AI-BCI_Wheelchair_Advancement_Hybrid_Deep_Learning_with_Motor_Imagery_for_Brain_Computer_Interface (дата звернення: 28.04.2026).
2. Волпоу Дж.Р., Волпоу Е.В. Мозково-комп'ютерні інтерфейси: принципи та практика. Оксфорд: Oxford University Press, 2012.
3. Нідермайер Е., да Сілва Ф.Л. Электроенцефалографія: базові принципи, клінічні застосування та суміжні галузі. Філадельфія: Lippincott Williams & Wilkins, 2004.
4. Гохрантер Ш., Шмідхубер Ю. Довготривала пам'ять (Long Short-Term Memory). Neural Computation. 1997. Т. 9(8). С. 1735–1780.
5. Python Software Foundation. Python Official Website [Електронний ресурс]. URL: <https://www.python.org> (дата звернення: 28.04.2026).
6. Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi Official Website [Електронний ресурс]. URL: <https://www.raspberrypi.org> (дата звернення: 28.04.2026).
7. Hasan, R., et al. Multimodal BCI systems for wheelchair control: integration of EEG, EOG and EMG signals. Biomedical Engineering Letters. 2020.
8. Sur, S., Sinha, V.K. Event-related potential: An overview. Industrial Psychiatry Journal. 2009. Vol. 18(1). P. 70–73.
9. XGBoost Developers. XGBoost Official Website [Електронний ресурс]. URL: <https://xgboost.ai> (дата звернення: 28.04.2026).
10. Lawhern, V.J., et al. EEGNet: A Compact Convolutional Neural Network for EEG-based Brain-Computer Interfaces. Journal of Neural Engineering. 2018. та GitHub-репозиторій [Електронний ресурс]. URL: <https://github.com/vlawhern/EEGNet> (дата звернення: 28.04.2026).
11. Vaswani, A., et al. Attention Is All You Need. Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. та HuggingFace Transformers [Електронний ресурс]. URL: <https://huggingface.co/transformers> (huggingface.co in Bing) (дата звернення: 28.04.2026).

Заболотний Олександр Іванович – студент групи 2ПІ-25б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: zoleksandr06@gmail.com

Науковий керівник: **Ткаченко Олександр Миколайович** – к.т.н, доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: ant@vntu.edu.ua

Oleksandr I. Zabolotnyi – a student of 2SE-25b group, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: zoleksandr06@gmail.com

Scientific Supervisor:

Oleksandr M. Tkachenko – Associate Professor of Software Chair, Lecturer, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ant@vntu.edu.ua