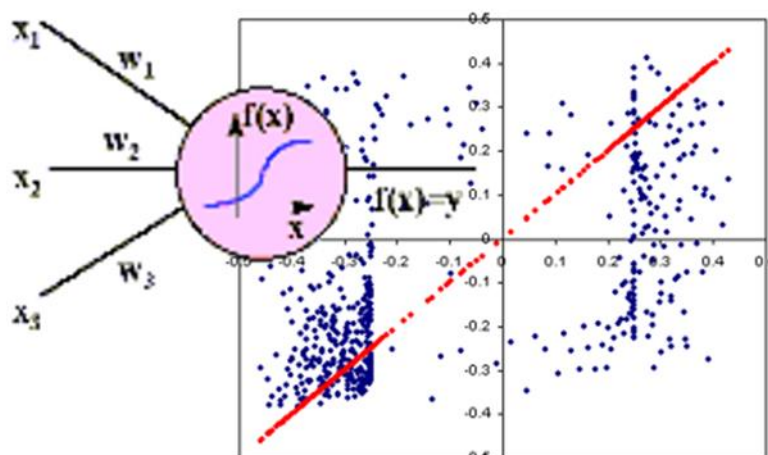


Ministry of Education and Science of Ukraine
 National Academy of Sciences of Ukraine
 National Academy of Sciences of Higher Education of Ukraine
 Institute of Artificial Intelligence Problems (Ukraine)
 Donbass State Engineering Academy (Ukraine)
 Vinnytsia National Technical University (Ukraine)
 Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine)
 Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade (Serbia)
 University of Szeged (Hungary)
 Apeiron University in Banja Luka (Bosnia and Herzegovina)
 DAAAM International Vienna
 Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, JJ Strossmayer University of Osijek
 (Croatia)
 University of Montenegro Faculty of Mechanical Engineering
 University of Zielona Góra (Poland)
 Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)
 Vinnytsia National Technical University (Ukraine)
 "American Journal Neural Network and Application" (USA)
 Problem Laboratory of Mobile Intelligent Technological Machines (Ukraine)



COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS

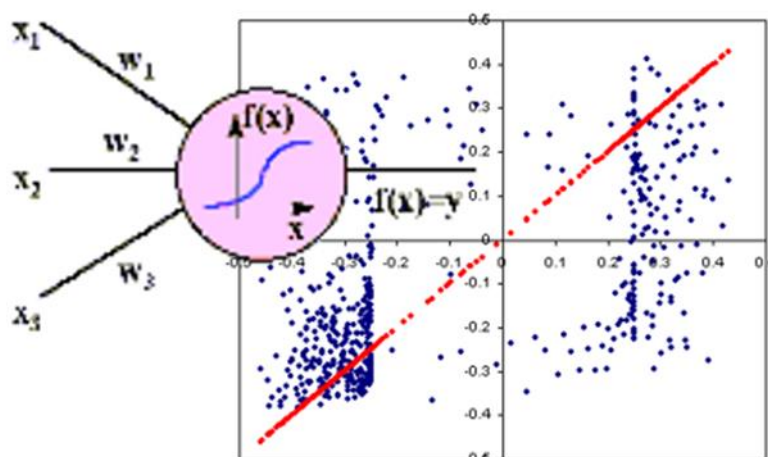
XXIV International Scientific Conference

«NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES AND THEIR APPLICATIONS NNTA-2025»

Kramatorsk - Vinnytsia-Ternopil, Ukraine

2025 p.

Міністерство освіти і науки України
 Національна академія наук України
 Національна академія наук вищої освіти України
 Інститут проблем штучного інтелекту (Україна)
 Донбаська державна машинобудівна академія (Україна)
 Вінницький національний технічний університет (Україна)
 Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна)
 Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade (Serbia)
 University of Szeged (Hungary)
 Apeiron University in Banja Luka (Bosnia and Herzegovina)
 DAAAM International Vienna
 Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, JJ Strossmayer University of Osijek
 (Croatia)
 University of Montenegro Faculty of Mechanical Engineering
 University of Zielona Góra (Poland)
 Вінницький національний аграрний університет (Україна)
 "American Journal Neural Network and Application" (США)
 Проблемна лабораторія мобільних інтелектуальних технологічних машин (Україна)



ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

XXIV Міжнародної наукової конференції

«НЕЙРОМЕРЕЖНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ НМТЗ-2025»

Kramatorsk - Vinnytsia-Ternopil, Ukraine

2025 р.

Рецензенти:

Рамазанов С.К., докт.техн.наук, д.е.н.,професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка;

Суботін С.О., докт. техн. наук, професор, Запорізький національний технічний університет

Рекомендовано

вченою радою Донбаської державної машинобудівної академії
(протокол № 4 від 27.11.2025)

Програмний комітет конференції

Dašić Predrag — Hon. Dr.Sc., Prof., Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia.

Gyula Mester — Dr.Sc., Professor, Academic, University of Szeged, Hungary.

Jenek Mariusz — Dr. Inż., University of Zielona Góra, Poland.

Marušić Vlatko — Dr.Sc., Prof., J. J. Strossmayer University of Osijek, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, Croatia.

Guida Domenico — Dr.Sc., Prof., University of Salerno, Department of Industrial Engineering (DIIn), Fisciano, Italy.

Karabegović Isak — Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.

Mirjanić Dragoljub — Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska (ANURS), Banja Luka, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina.

Nedeff Valentin — Dr.Sc., Prof., Vasile Alecsandri University of Bacău, Faculty of Engineering, Bacău, Romania.

Pele Alexandru-Viorel — Dr.Sc., Prof., Dean, University of Oradea, Faculty of Management and Technological Engineering, Oradea, Romania.

Raul Turmanidze — Georgian Technical University (GTU), Faculty of Transportation and Mechanical Engineering, Tbilisi, Georgia.

Zhelezarov Iliya — Dr.Sc., Prof., Rector, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria.

Гринь О. Г. — к.т.н., доц., ДДМА, м. Краматорськ–Тернопіль, Україна.

Дмитрієв Д. О. — д.т.н., проф., ХНТУ, м. Херсон, Україна.

Клименко С. А. — д.т.н., проф., ІНМ АНУ, м. Київ, Україна.

Ковалевська О. С. — к.т.н., доц., ДДМА, м. Краматорськ, Україна.

Ковалевський С. В. — д.т.н., проф., ДДМА, м. Краматорськ, Україна.

Ковальов В. Д. — д.т.н., проф., ДДМА, м. Краматорськ, Україна.

Козлов Л. Г. — д.т.н., проф., ВНТУ, м. Вінниця, Україна.

Кузнецов Ю. М. — д.т.н., проф., НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, м. Київ, Україна.

Макаренко Н. О. — д.т.н., проф., ДДМА, м. Краматорськ, Україна.

Новіков Ф. В. — д.т.н., проф., ХНЕУ, м. Харків, Україна.

Петров О. В. — к.т.н., доц., ВНТУ, м. Вінниця, Україна.

Рамазанов С. К. — д.т.н., д.е.н., проф., ХНЕУ, м. Київ, Україна.

Сапон С. П. — к.т.н., доц., НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, м. Київ, Україна.

Суботін С. О. — д.т.н., проф., ЗНУ, м. Запоріжжя, Україна.

Сухоруков С. І. — к.т.н., доц., ВНТУ, м. Вінниця, Україна.

Турчанін М. А. — д.х.н., проф., ДДМА, м. Краматорськ, Україна.

Н46 Нейромережні технології та їх застосування НМТі3-2025: збірник наукових праць XXIV Міжнародної наукової конференції «Нейромережні технології та їх застосування НМТі3-2025» / за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. С.В.Ковалевського. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2025. – 254 с.

ISBN 978-617-7893-18-8

У виданні представлено результати новітніх теоретичних і прикладних досліджень у галузі нейромережних технологій, виконаних у 2025 році науковими школами України та зарубіжних країн. Матеріали охоплюють актуальні напрями розвитку штучного інтелекту, включно з методами глибинного навчання, архітектурами нейронних мереж, алгоритмами оптимізації та мультиагентними підходами. Особливу увагу приділено застосуванню нейронних мереж для керування складними об'єктами в реальному часі, моделюванню динамічних систем та створенню адаптивних інтелектуальних регуляторів. У збірнику також наведено результати досліджень, присвячених використанню нейромереж у виробничих, економічних та освітніх системах. Опубліковані роботи демонструють потенціал сучасних AI-технологій для підвищення ефективності, надійності та конкурентоспроможності наукових досліджень, інженерної практики та цифрової трансформації економіки. Для здобувачів освіти, наукових працівників широкого профілю та фахівців.

Для здобувачів освіти, наукових працівників широкого профілю та фахівців.

ISBN 978-617-7893-18-8

УДК 004.8:62-5:007

©ДДМА,2025

A. PLENARY SESSION. ПЛЕНАРНА СЕСІЯ.

10

Ковалевський С.В. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна). **XXIV Міжнародна наукова конференція «НЕЙРОМЕРЕЖНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ - НМТІЗ-2025».**

10

Kovalevskyy S. (Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk–Ternopil, Ukraine), **Mester G.** (University of Szeged, Szeged, Hungary), **Dasic P.** (Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia). **NEURAL NETWORK–DRIVEN TRANSFORMATION OF HIGHER EDUCATION TOWARD AN INTELLIGENT EDUCATIONAL ECOSYSTEM OF THE FUTURE.**

15

Рамазанов С.К. (Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Київ, Україна). **ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ – ГОЛОВНИЙ ІНСТРУМЕНТ ПЕРЕХОДУ ДО НОВОГО ІНДУСТРІАЛЬНОГО СУСПІЛЬСТВА ТА НООНОМІКИ.**

25

Слюсар В. І., Почернін С. П. (Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України, Київ, Україна). **ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ADVANCED RAG У АГЕНТ-ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ ДЛЯ БЕЗПЛОТНИХ СИСТЕМ.**

35

Терещенко В. М., Бобиль Б. В., Красіков А. І., Косуха О. Ю., Заславський В. А., Горбунов О. А. (Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна). **НЕЙРОМЕРЕЖНА СИСТЕМА ОЦІНКИ ПРАВИЛЬНОСТІ ВИКОНАННЯ ФІЗИЧНИХ ВПРАВ НА ОСНОВІ 3D-РЕКОНСТРУКЦІЇ РУХІВ.**

38

Dubinsky A. (Seville, Spain). **ZERO-TRAINING EVALUATION OF CLASSIFICATION METRICS.**

46

Zbigniew H. Gontar (SGH Warsaw School of Economics, Warsaw, Poland). **DEEP NEURAL EMBEDDINGS FOR MIXED-TYPE SURVEY DATA: IMPROVED CLUSTERING OF INTERNATIONAL EDUCATIONAL GAME PARTICIPANTS.**

54

B. FOUNDATIONS OF NEURAL NETWORKS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE. ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ОСНОВИ НМ І ШІ.

62

B1. Theoretical Models, Algorithms and Computational Architectures of AI. Теоретичні моделі, алгоритми та обчислювальні архітектури ШІ.

Bardella G., Franchini S., Pani P., Ferraina S. (Sapienza University of Rome, Rome, Italy). **LATTICE PHYSICS APPROACHES FOR NEURAL NETWORKS.**

62

8. Флориді Л. *The Ethics of Artificial Intelligence*. — Oxford, 2023. — 288 p.
9. Бодрунов С.Д. *Ноономика. Монографія, 2018. - 432 с. (полная версия (PDF)). inir.ru*
10. OECD. *AI and the Future of Work*. — Paris, 2023.
11. UNESCO. *Ethics of Artificial Intelligence Report*. — Paris, 2022.

УДК 004.89:629.7.05

Слюсар В. І., Почернін С. П. (Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України, Київ, Україна).

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ADVANCED RAG У АГЕНТ-ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ.

Анотація. У статті розглянуто підхід до підвищення надійності та інтелектуального рівня енергетичного менеджменту безпілотних систем шляхом інтеграції технології Advanced Retrieval-Augmented Generation (RAG) у структуру агента-цифрового двійника мультиагентної системи (МАС). Показано, що використання агрегованого вектора енергетичного стану (Battery State Index Vector, BSIV) у поєднанні з векторними базами знань, референсними датасетами (NASA, CALCE) та графовими методами семантичного виведення дає змогу суттєво покращити діагностику деградаційних процесів у літій-іонних батареях. Розкрито логіку багатоступінчастого аналізу: від виявлення аномалій, пошуку релевантних прецедентів і графоорієнтованої інтерпретації до генерації керуючих рекомендацій для МАС. Запропонована технологія трансформує агента-двійника з пасивного спостерігача в когнітивний модуль, здатний до причинно-наслідкового висновування на основі зовнішніх джерел знань. Результати дослідження демонструють підвищення точності прогнозування залишкового ресурсу, оперативності реагування та автономності енергетичного менеджменту у безпілотних платформах.

Ключові слова: безпілотна система, енергетичний менеджмент, літій-іонний акумулятор, мультиагентна система, цифровий двійник, Advanced RAG, GraphRAG, діагностика деградації.

Abstract. The article proposes an approach to enhancing the reliability and intelligence of energy management in unmanned systems through the integration of Advanced Retrieval-Augmented Generation (RAG) into the digital twin agent of a multi-agent system (MAS). The study demonstrates that the use of an Aggregated Battery State Index Vector (BSIV), combined with vector knowledge bases, reference datasets (NASA, CALCE), and graph-based reasoning, significantly improves the diagnosis of degradation processes in lithium-ion batteries. A multi-stage analytical pipeline is presented, including anomaly detection, contextual retrieval of relevant historical cases, graph-oriented semantic inference, and generation of control recommendations for MAS. The proposed integration transforms the digital twin from a passive monitoring component into an active cognitive agent capable of causal reasoning using external knowledge sources. Experimental validation confirms improved accuracy of remaining useful life prediction, faster anomaly interpretation, and enhanced autonomy of unmanned platform energy management.

Keywords: unmanned system, energy management, Li-ion battery, multi-agent system, digital twin, Advanced RAG, GraphRAG, degradation diagnostics.

Постановка проблеми. Ефективність виконання місій автономними безпілотними системами (платформами) залежить від здатності бортових систем прогнозувати поведінку джерела живлення у нестандартних ситуаціях. Сучасні системи управління акумуляторними батареями (Battery Management Systems, BMS) здатні відстежувати параметри джерел живлення (стан заряду (state of charge, SoC), температура, струм розряду), ступінь деградації (state of health, SoH), проте вони часто обмежені жорсткими алгоритмами, не в повній мірі враховують фактори експлуатації та не інтегрують енергетичний стан безпіотної системи у планування дій групи (рою) безпілотних систем. Перспективним є використання мультиагентних систем (МАС) [1], де агент-цифровий двійник джерела живлення (або

безпілотної системи) в цілому виступає аналітичним центром. Актуальним завданням є наділення такого агента здатністю використовувати зовнішні бази знань для інтерпретації складних станів батареї, що вимагає впровадження сучасних методів генеративного штучного інтелекту.

Аналіз останніх публікацій. Архітектура MAC енергетичного менеджменту для безпілотних систем, що оперує агрегованими векторами стану, була запропонована у роботі [2]. Як показано в сучасному огляді [3], саме інтеграція штучного інтелекту в технологію цифрових двійників є ключовим трендом розвитку систем керування батареями (BMS), що дозволяє перейти від простого моніторингу до прогнозування. Однак для реалізації когнітивних функцій цифрового двійника необхідна інтеграція з великими мовними моделями (LLM). Фундаментальний підхід Retrieval-Augmented Generation (RAG), запропонований Lewis та ін. [4], дозволяє моделям звертатися до зовнішніх даних без перенавчання. Проте, як зазначають Gao та ін. у своєму огляді [5], для складних інженерних задач можливостей класичного ("Naive") RAG недостатньо через низьку точність пошуку, яка включає етапи попередньої обробки запиту для кращого розуміння суті проблеми та подальшого уточнення результатів для відсіву нерелевантної інформації. Окрему увагу привертає підхід GraphRAG [6], який дозволяє знаходити відповіді шляхом обходу графів знань, що є критичним для розуміння причинно-наслідкових зв'язків у діагностиці.

Метою роботи є підвищення надійності енергетичного менеджменту безпілотних систем шляхом інтеграції методології Advanced RAG та GraphRAG у структуру цифрового двійника - агента MAC для контекстного аналізу агрегованих векторів енергетичного стану джерел живлення.

Виклад основного матеріалу дослідження. MAC енергетичного менеджменту, що розглядається, реалізована засобами штучного інтелекту. MAC включає в себе низку функціональних агентів, зокрема: агента – сенсора (Sensor Agent) для збору первинної телеметрії, агента ембедингу (Embedder Agent) для перетворення «сирих» даних у компактні вектори стану, агента-класифікатора (Classifier Agent) для ідентифікації поточного режиму роботи, агента прогнозування (Predictor Agent) для оцінки майбутніх трендів деградації та агента прийняття рішень (Decision Agent) для адаптивного керування та координації у складі групи. Разом вони виконують повний цикл задач: від збору «сирих» діагностичних даних про стан джерела живлення, інших підсистем безпілотної платформи, агрегації даних, формування ознак технічних відмов або критичних станів до прийняття рішення на виконання, зміну або переривання поточної місії. Основний фокус в даному розгляді зосереджений на агенті-цифровому двійнику (Digital Twin Agent).

Функціонування агента-цифрового двійника реалізовано як багатоетапний процес семантичної обробки даних, що ініціюється при виявленні відхилень у потоці агрегованих векторів енергетичного стану. Процедура прийняття рішень базується на базі архітектури Advanced RAG [4] і включає чотири послідовні етапи.

1) Ініціалізація та вхідний аналіз. Вхідними даними для агента є агрегований вектор енергетичного стану (Battery State Index Vector, BSIV) [2]. BSIV надходить від Embedder Agent у реальному часі i для платформи i у момент часу t має вигляд:

$$\vec{b}_i(t) = [SoC_i(t), SoH_i(t), RUL_i(t), T_i(t), P_{load,i}(t \rightarrow t + \tau) \dots Z_i(t)], \quad (1)$$

де $SoC_i(t)$ – оцінка стану заряду джерела живлення, $SoH_i(t)$ – оцінка рівня деградації (стану «здоров'я») джерела живлення з урахуванням деградації, $RUL_i(t)$ – прогнозований залишковий корисний ресурс джерела живлення, визначений як гарантовано доступний часовий горизонт безпечної роботи платформи у поточному режимі навантаження, $P_{load,i}(t \rightarrow t + \tau)$ – прогнозована середня потужність споживання для виконання поточного завдання у часовому горизонті τ , $Z_i(t)$ – внутрішній опір (імпеданс) джерела живлення в момент часу t .

Агент здійснює безперервний моніторинг компонентів вектору $\vec{b}_i(t)$ (1). Активація модуля глибокої діагностики відбувається за умови виконання критерію аномальності, коли відхилення поточних параметрів (наприклад, швидкість зростання внутрішнього опору $\Delta Z_{internal}$ джерела живлення) перевищує допустимий поріг для поточної температури.

2) Контекстний пошук. На цьому етапі виконується запит до векторної бази знань – Vector Database. Система здійснює пошук k найближчих векторів-сусідів (k -NN) серед історичних даних, використовуючи метрику косинусної подібності. База знань містить векторизовані профілі деградації з референсних датасетів – NASA Battery Dataset, CALCE та архівні логи попередніх місій. Математично це описується як знаходження підмножини історичних векторів b_{hist} , для яких відстань $dist(b_i, b_{hist})$ є мінімальною. Це дозволяє ідентифікувати прецеденти, де спостерігалася аналогічна динаміка зміни параметрів BSIV [2].

3) Графо-аналітичне виведення. Для встановлення причинно-наслідкових зв'язків знайдених прецедентів застосовується підхід GraphRAG. Знайдені на попередньому етапі історичні вектори слугують входними вузлами для обходу графа знань – Knowledge Graph. Агент аналізує топологію графа, виявляючи причинно-наслідковий шлях, схему якого наведено на Рисунку 1:

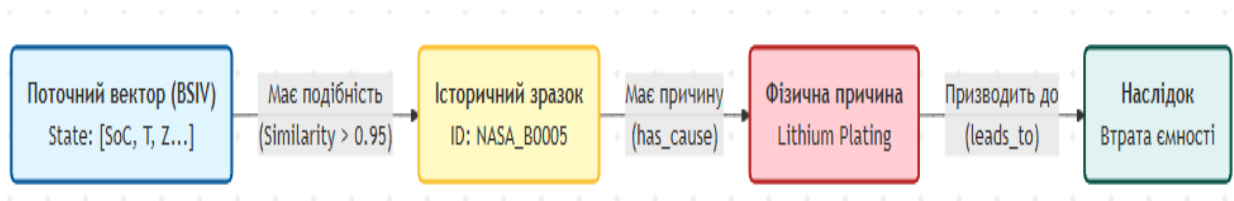


Рисунок 1. Приклад діагностичного шляху в графі знань: від числового вектора стану до визначення причини деградації (Lithium Plating)

Наприклад, система встановлює зв'язок між поточним вектором імпедансу та вузлом «Lithium Plating» (осадження металевого літію на поверхні анода), який у графі асоційований з умовами низькотемпературного заряду та призводить до незворотної втрати ємності. Це дозволяє верифікувати діагноз, який неможливо встановити лише на основі скалярних значень телеметрії.

4) Етап 4. Генерація керуючої рекомендації. На фінальному етапі агрегований контекст (поточний вектор $\vec{b}_i(t)$, метадані знайдених історичних зразків та виявлені графові зв'язки) передається на вхід великої мовної моделі (LLM). Модель генерує формалізований висновок для агента прийняття рішень. Вихідний сигнал містить:

- а) діагноз – ідентифікація фізико-хімічного процесу деградації (наприклад, anode degradation due to plating);
- б) прогноз – оцінка скоригованого RUL за умови збереження поточного режиму;
- в) рекомендацію – конкретна дія для МАС (наприклад, обмежити струм розряду $I_{discharge} \leq 0.5C$), що спрямована на мінімізацію деградації та забезпечення виконання місії.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано архітектуру когнітивного агента-цифрового двійника в складі мультиагентної системи енергоменеджменту, посилену технологією Advanced RAG для семантичної інтерпретації агрегованих векторів стану – BSIV. Використання даного підходу трансформує агента-двійника з пасивного інструменту моніторингу в активного аналітика. Перехід від «наївного» пошуку до графо-аналітичних методів GraphRAG дозволяє ефективно зіставляти поточні вектори стану з референсними базами знань, що значно підвищує точність діагностики аномалій та прогнозування залишкового ресурсу без необхідності трансляції та обробки надлишкових обсягів телеметричних даних.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ.

1. Slyusar V. Distributed Multi-agent Systems Based on the Mixture of Experts Architecture in the Context of 6G Wireless Technologies. In: Dovgyi, S., et al. (eds) Applied Innovations in Information and Communication Technology. ICAIT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1338. Springer, 2025, pp. 81-110. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-89296-7_6.

2. Slyusar V., Pochernin S. An Embedded Approach to the Implementation of a Multi-Agent Energy Management System for Unmanned Systems. ICST 2025: Information Control Systems & Technologies, у складі CEUR Workshop Proceedings, vol.4048. ceur-ws.org/Vol-4048/paper26.pdf.
3. Artificial Intelligence and Digital Twin Technologies for Intelligent Lithium-Ion Battery Management Systems: A Comprehensive Review / S. S. Madani et al. Batteries. 2025. Vol. 11, no. 8. P. 298. URL: <https://doi.org/10.3390/batteries11080298>.
4. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks / P. Lewis et al. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2020. Vol. 33. P. 9459–9474. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/file/6b493230205f780e1bc26945df7481e5-Paper.pdf>.
5. Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey / Y. Gao et al. arXiv preprint arXiv:2312.10997. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.10997>.
6. From Local to Global: A Graph RAG Approach to Query-Focused Summarization / D. Edge et al. arXiv preprint arXiv:2404.16130. 2024. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.16130>.

УДК 004.93(075.8)

Терещенко В. М., Бобиль Б. В., Красіков А. І., Косуха О. Ю., Заславський В. А., Горбунов О. А. (Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна).

НЕЙРОМЕРЕЖНА СИСТЕМА ОЦІНКИ ПРАВИЛЬНОСТІ ВИКОНАННЯ ФІЗИЧНИХ ВПРАВ НА ОСНОВІ 3D-РЕКОНСТРУКЦІЇ РУХІВ.

Анотація. Робота присвячена розробці системи комп'ютерного зору для автоматичної перевірки правильності виконання фізичних вправ у процесі спортивної підготовки або медичної реабілітації. У дослідженні побудовано повний наскрізний пайплайн, що включає багатокамерний запис відео, 2D-детекцію ключових точок тіла, триангуляцію та відновлення 3D-кінематичної моделі руху за допомогою фреймворку Pose2Sim та біомеханічного середовища OpenSim. Отримані тривимірні координати застосовуються як вхідні дані для просторово-часової нейронної мережі, адаптованої до задачі класифікації правильності виконання реабілітаційних вправ. Розроблена система здатна виявляти як технічні помилки, так і тонкі компенсаторні рухи, що мають важливе клінічне значення. Представлені експериментальні результати підтверджують ефективність запропонованого підходу та його придатність для використання у телереабілітації й автоматизованих тренувальних системах.

Ключові слова: комп'ютерний зір, реабілітація, тривимірна реконструкція скелета, розпізнавання рухів, оцінка виконання вправ.

Abstract. The work is devoted to the development of a computer vision system for automatic verification of exercise performance in sports training and medical rehabilitation. The study presents a complete end-to-end pipeline that includes multi-camera video recording, 2D human keypoint detection, triangulation, and reconstruction of a 3D kinematic model using the Pose2Sim framework and the OpenSim biomechanical environment. The obtained 3D joint coordinates are used as input to a spatio-temporal deep neural network adapted for the task of classifying correct and incorrect execution of rehabilitation exercises. The proposed system is capable of detecting both technical errors and subtle compensatory movements, which hold significant clinical relevance. Experimental results confirm the effectiveness of the method and its applicability to telerehabilitation and automated training support systems.

Keywords: computer vision, rehabilitation, 3D skeleton reconstruction, action recognition, exercise performance evaluation.