

АНОТАЦІЯ

Цанів Я.А. Математичне та програмне забезпечення реабілітаційної арт-терапії верхніх кінцівок пацієнтів на основі AR-технологій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

Підготовка здійснювалась на кафедрі комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Міністерства освіти і науки України.

У дисертаційній роботі розв'язано науково-технічне завдання розробки математичного та програмного забезпечення системи реабілітаційної арт-терапії верхніх кінцівок пацієнтів на основі AR-технологій, що розширило функції програмного комплексу для автоматичного об'єктивного контролю динаміки відновлення рухливості суглобів, прогнозування результатів реабілітації та адаптивної корекції терапевтичного протоколу. Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності реабілітації верхніх кінцівок пацієнтів у спосіб розроблення математичного та програмного забезпечення системи реабілітаційної арт-терапії на основі AR-технологій та автоматичної гоніометрії.

У вступі наведено актуальність теми дисертаційного дослідження, мету та основні завдання, а також наукову новизну та практичну значущість.

У першому розділі проведено детальний аналіз існуючих методів і програмного забезпечення для вимірювання кутів суглобів, технологій VR/AR у реабілітації, методів прогнозування динаміки відновлення та

систем рекомендацій у фізичній терапії. Розглянуто контактні методи гоніометрії (механічні гоніометри, цифрові інклінометри, IMU-системи), маркерні системи захоплення руху (Vicon, OptiTrack) та безмаркерні системи оцінки пози на базі глибокого навчання (OpenPose, BlazePose, MediaPipe Pose Landmarker, MoveNet, ViTPose, YOLOv8-pose). Встановлено, що контактні методи мають недостатню точність ($5-10^\circ$), маркерні системи є непрактичними через високу вартість, а існуючі безмаркерні системи потребують адаптивної фільтрації шуму та багатокамерної тріангуляції. Проаналізовано систематичні огляди та мета-аналізи ефективності VR/AR у реабілітації верхніх кінцівок. Показано, що класичні методи прогнозування (регресійний аналіз, ARIMA, нейронні мережі) мають суттєві обмеження при застосуванні до коротких клінічних вибірок. Порівняльний аналіз існуючих VR/AR-реабілітаційних платформ виявив критичний розрив: жодна система не інтегрує одночасно безмаркерну гоніометрію, інтервальне прогнозування, AR-арт-терапію та рекомендаційну систему у замкнений адаптивний цикл.

У заключній частині першого розділу, на підставі проведеного аналізу та виявлених недоліків існуючих рішень, здійснено постановку науково-технічного завдання. Сформульовано мету та основні задачі дисертаційного дослідження. Обґрунтовано доцільність застосування інтервального підходу з ідентифікацією на основі алгоритму бджолиної колонії для прогнозування динаміки відновлення на коротких клінічних вибірках.

У другому розділі наведено результати розробки математичних моделей та методів безмаркерної гоніометрії і динаміки відновлення кутів рухливості суглобів. Розроблено метод безмаркерної гоніометрії на основі аналізу трьох відеопотоків, який базується на нейромережевому детекторі YOLOv8-pose, адаптивній фільтрації координат OneEuro-фільтром та алгоритмі геометричного злиття вимірювань від трьох ортогонально

розташованих камер із пріоритизацією на основі площин руху. Запропонований метод забезпечує середню абсолютну похибку менше 4° для всіх типів рухів плечового суглоба, що знаходиться в межах мінімальної клінічно значущої різниці.

У цьому ж розділі на основі методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей із застосуванням алгоритму бджолоїної колонії побудовано моделі динаміки відновлення кутів рухливості суглобів. Структурна ідентифікація забезпечує вибір оптимального набору базисних функцій, а параметрична – знаходження інтервальних оцінок коефіцієнтів моделі. Побудовані моделі забезпечують стовідсоткове покриття експериментальних спостережень та клінічно прийнятну точність прогнозування.

У завершальній частині розділу описано адаптивний цикл прогнозування та корекції терапевтичного протоколу, що реалізує замкнений контур керування реабілітаційним процесом: виконання – вимірювання – прогноз – рекомендація – корекція зображення – адаптація рухів.

У третьому розділі розкрито принципи проектування програмного забезпечення комплексної AR-системи реабілітації. Спроектовано мікросервісну архітектуру комплексної програмної системи AR-реабілітації верхніх кінцівок, побудовану на принципі оркестрації мікросервісів: мікросервісу аналізу трьох відеопотоків з пріоритизацією на Python, мікросервісу інтервального прогнозування на та мікросервісу рекомендацій на основі генеративного штучного інтелекту, оркестрованих центральним сервером на NestJS із базою даних PostgreSQL, а також AR-застосунку арт-терапії для гарнітури Magic Leap 2 на Unity та вебзастосунку фізіотерапевта на React. Описано загальну архітектуру системи з чотирма незалежними каналами даних між мікросервісами, програмну архітектуру

мікросервісу автоматичної гоніометрії з конвеєрною обробкою відеопотоків, архітектуру AR-застосунку арт-терапії та архітектуру серверної частини з рекомендаційним мікросервісом. Основні компоненти функціонують у локальній мережі реабілітаційного кабінету; зовнішнє інтернет-з'єднання використовується лише рекомендаційним модулем для генерації терапевтичних зображень.

У четвертому розділі наведено результати реалізації та клінічної апробації розробленої системи. Описано реалізацію мікросервісу автоматичної гоніометрії, AR-застосунку арт-терапії для гарнітури Magic Leap 2, серверної частини з рекомендаційним мікросервісом та вебзастосунку фізіотерапевта. На клінічних даних п'яти реабілітаційних пацієнтів КНП «Тернопільська обласна клінічна лікарня» ГОР побудовано інтервальні математичні моделі динаміки відновлення кутів плечового суглоба для трьох ключових рухів: згинання, розгинання та відведення. На прогнозній групі з двох пацієнтів проведено апробацію адаптивного циклу прогнозування та корекції терапевтичного протоколу.

Результати апробації підтвердили ефективність розроблених рішень: інтервальна модель виявила неоптимальну динаміку відновлення вже після 3 сеансів, рекомендаційна система запропонувала зміну терапевтичного зображення, після корекції середній темп приросту кута згинання зріс у 1,9–3,9 рази, а прогнозована кількість сеансів до нормативного діапазону скоротилася на 12%. Отримані результати підтверджують функціональну завершеність комплексної системи AR-реабілітації та практичну реалізацію замкненого контуру керування реабілітаційним процесом.

У висновках сформульовано основні результати дисертаційної роботи.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у процес проведення реабілітаційних сеансів КНП «Тернопільська обласна клінічна лікарня» ГОР, у науково-дослідну роботу кафедри фізичної терапії Тернопільського

національного медичного університету імені І.Я. Горбачевського, у виробничий процес ТОВ «ЕЛЕКС» та у освітній процес кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету, що підтверджується відповідними актами впровадження.

Ключові слова: програмне забезпечення, архітектура програмних систем, комп'ютерний зір, нейронна мережа (YOLO), штучний інтелект (ШІ, машинне навчання), глибоке навчання, доповнена реальність (AR, віртуальне середовище, віртуальна лабораторія), гарнітура (AR-гарнітура, нейрогарнітура), інтервальні моделі (інтервальні дані, аналіз інтервальних даних, модель), ідентифікація (структурна ідентифікація, параметрична ідентифікація), поведінкові моделі штучної бджолиної колонії (штучна бджолина колонія), прогнозування, прийняття рішень, реабілітація (фізична реабілітація, фізична терапія), діагностика (функціональна діагностика).

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Dyvak M, Tsapiv Y, Pukas A, Petrovskyi Y, Melnyk A, Dyvak A, Banasik A, Czupryna-Nowak A, Pikiewicz P, Popuk Y, Dzyha Y. AR Technology for Restoring Upper Limb Joint Mobility in Patients. Applied Sciences, 2026, Vol. 17. 5878. ISSN: 2076-3417. (3,5 д.а. / 2 д.а.; особистий внесок: розробка комплексної архітектури AR-системи реабілітації, інтеграція компонентів у замкнутий адаптивний цикл прогнозування та корекції терапевтичного протоколу, проведення клінічного дослідження).

DOI: [10.3390/app16125878](https://doi.org/10.3390/app16125878) (Scopus, Q2)

2. Цапів Я.А., Тихий Р.Р. Інноваційна вебсистема гоніометричного аналізу на базі нейронних мереж. Наукові праці ДонНТУ. Серія “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”, 2025, № 1 (40), с.

80–88. (кат. Б) ISSN 1996-1588. (0,9 д.а. / 0,7 д.а.; особистий внесок: розробка програмної архітектури вебсистеми гоніометричного аналізу, реалізація модулів нейромережевої детекції анатомічних точок та обчислення кутів суглобів).

DOI: [10.31474/1996-1588-2025-1-40-80-88](https://doi.org/10.31474/1996-1588-2025-1-40-80-88)

3. Пукас А.В., Цапів Я.А. Автоматизована безмаркерна система вимірювання діапазонів рухів суглобів на основі трикамерного відеоаналізу. Наукові праці ДонНТУ. Серія “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”, 2026, № 1 (42), с. 54–64. (кат. Б) ISSN 1996-1588. (1,1 д.а. / 0,9 д.а.; особистий внесок: розробка методу безмаркерного трикамерного вимірювання кутів суглобів, реалізація конвеєрної архітектури підсистеми відеоаналізу).

DOI: [10.31474/1996-1588-2026-1-42-54-64](https://doi.org/10.31474/1996-1588-2026-1-42-54-64)

4. Цапів Я.А., Пукас А.В., Біловус Д. Рекомендаційна система підтримки фізичної реабілітації на основі корекції терапевтичних зображень. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2026. № 2, с.387-396. (кат. Б). ISSN 2219-9365. (1 д.а. / 0,9 д.а.; особистий внесок: розробка рекомендаційної системи підтримки фізичної реабілітації, реалізація багатоступеневого AI-контур генерації арт-терапевтичного контенту).

DOI: [10.31891/2219-9365-2026-86-45](https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-86-45)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Tsapiv Y., Dyvak M., Popovych D., Havrylenko A., Tykhyi R. Kasianchuk V. Automated Goniometric Analysis System Based on Neural Networks, 2025 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Sibenik, Croatia, 2025, pp. 762-766. ISSN 2770-5218. (0,5 д.а. / 0,3 д.а.; особистий внесок: розробка методу

автоматичного гоніометричного аналізу на базі нейронних мереж, реалізація алгоритмів адаптивної фільтрації координат та геометричного злиття вимірювань від трьох камер).

DOI: [10.1109/ACIT65614.2025.11185897](https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185897) (Scopus).

6. Tykhyi R., Tsapiv Ya., Dyvak M., Popovych D., Havrylenko A., Husieva T. Software system for supporting art therapy processes using augmented reality technologies. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2024, p. 660–664. ISSN 2770-5218. (0,5 д.а. / 0,3 д.а.; особистий внесок: проектування та реалізація AR-застосунку арт-терапії для гарнітури Magic Leap 2, розробка модулів просторового позиціонування, тактильної компенсації та рендерингу текстур малювання).

DOI: [10.1109/ACIT62333.2024.10712584](https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712584) (Scopus).

7. Головка Р.А., Шостопаль В.А., Цапів Я.А. Математичне та програмне забезпечення для організації процесу тестування web-орієнтованих систем. Комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів СІТ'2023. – Тернопіль: ЗУНУ, с.90. (0,1 д.а. / 0,03 д.а.; особистий внесок: розробка архітектури програмного забезпечення для тестування).

8. Цапів Я.А. Архітектура програмної системи арт-терапії та реабілітації з AR. Комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали зимової школи-семінару молодих вчених і студентів СІТ'2025. – Тернопіль: ЗУНУ, с. 57–58.

9. Цапів Я.А. Адаптивний цикл реабілітації верхніх кінцівок на основі AR-технологій. Матеріали весняної школи-семінару молодих вчених і студентів СІТ'2025. – Тернопіль: ЗУНУ, с. 78–79.

ANNOTATION

Tsapiv Y. A. Mathematical and software support for rehabilitation art therapy of patients' upper limbs based on AR technologies. – Scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 121 – Software Engineering – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The research was carried out at the Department of Computer Science of the West Ukrainian National University, Ministry of Education and Science of Ukraine.

The dissertation addresses the scientific and technical task of developing mathematical and software support for a rehabilitation art therapy system for patients' upper limbs based on AR technologies, which extends the functions of the software complex for automatic objective control of joint mobility recovery dynamics, prediction of rehabilitation outcomes, and adaptive correction of the therapeutic protocol. The aim of the dissertation research is to improve the effectiveness of upper limb rehabilitation through the development of mathematical and software support for a rehabilitation art therapy system based on AR technologies and automatic goniometry.

The introduction presents the relevance of the dissertation topic, its aim and main objectives, as well as the scientific novelty and practical significance.

The first chapter provides a detailed analysis of existing methods and software for joint angle measurement, VR/AR technologies in rehabilitation, methods for predicting recovery dynamics, and recommendation systems in physical therapy. Contact goniometry methods (mechanical goniometers, digital inclinometers, IMU systems), marker-based motion capture systems (Vicon, OptiTrack), and markerless pose estimation systems based on deep learning (OpenPose, BlazePose, MediaPipe Pose Landmarker, MoveNet, ViTPose,

YOLOv8-pose) were considered. It was established that contact methods have insufficient accuracy ($5\text{--}10^\circ$), marker-based systems are impractical due to high cost, and existing markerless systems require adaptive noise filtering and multi-camera triangulation. Systematic reviews and meta-analyses of VR/AR effectiveness in upper limb rehabilitation were analyzed. It was shown that classical forecasting methods (regression analysis, ARIMA, neural networks) have significant limitations when applied to short clinical samples. A comparative analysis of existing VR/AR rehabilitation platforms revealed a critical gap: no system simultaneously integrates markerless goniometry, interval prediction, AR art therapy, and a recommendation system into a closed adaptive cycle.

In the concluding part of the first chapter, based on the analysis and identified shortcomings of existing solutions, the scientific and technical problem was formulated. The aim and main objectives of the dissertation research were defined. The feasibility of applying the interval approach with identification based on the artificial bee colony algorithm for predicting recovery dynamics on short clinical samples was justified.

The second chapter presents the results of developing mathematical models and methods for markerless goniometry and joint mobility recovery dynamics. A method of markerless goniometry based on the analysis of three video streams was developed, which is based on the YOLOv8-pose neural network detector, adaptive coordinate filtering with the OneEuro filter, and an algorithm for geometric fusion of measurements from three orthogonally positioned cameras with prioritization based on movement planes. The proposed method provides a mean absolute error of less than 4° for all types of shoulder joint movements, which is within the minimal clinically important difference.

In the same chapter, based on the methods of structural and parametric identification of interval discrete dynamic models using the artificial bee colony algorithm, models of joint mobility recovery dynamics were constructed.

Structural identification ensures the selection of an optimal set of basis functions, while parametric identification provides interval estimates of model coefficients. The constructed models ensure 100% coverage of experimental observations and clinically acceptable prediction accuracy.

In the concluding part of the chapter, an adaptive cycle of prediction and correction of the therapeutic protocol was described, implementing a closed-loop control of the rehabilitation process: execution – measurement – prediction – recommendation – image correction – movement adaptation.

The third chapter reveals the principles of software design for the comprehensive AR rehabilitation system. A microservice architecture of the comprehensive AR rehabilitation software system for upper limbs was designed, based on the principle of microservice orchestration: a Python-based microservice for three-video-stream analysis with prioritization, a microservice for interval forecasting, and a microservice for recommendations based on generative artificial intelligence, orchestrated by a central server on NestJS with a PostgreSQL database, as well as an AR art therapy application for the Magic Leap 2 headset on Unity and a physiotherapist web application on React. The overall system architecture with four independent data channels between microservices, the software architecture of the automatic goniometry microservice with pipeline video stream processing, the architecture of the AR art therapy application, and the architecture of the server component with the recommendation microservice were described. The main components operate within the local network of the rehabilitation room; external internet connectivity is used only by the recommendation module for generating therapeutic images.

The fourth chapter presents the results of implementation and clinical validation of the developed system. The implementation of the automatic goniometry subsystem, AR art therapy application for the Magic Leap 2 headset, server component with recommendation subsystem, and physiotherapist web

application was described. Using clinical data from five rehabilitation patients at the Ternopil Regional Clinical Hospital, interval mathematical models of shoulder joint mobility recovery dynamics were constructed for three key movements: flexion, extension, and abduction. The adaptive cycle of prediction and correction of the therapeutic protocol was validated on a prognostic group of two patients.

The validation results confirmed the effectiveness of the developed solutions: the interval model detected suboptimal recovery dynamics after just 3 sessions, the recommendation system proposed a change of the therapeutic image, and after correction the average rate of flexion angle increase grew by 1.9–3.9 times, while the predicted number of sessions to reach the normative range decreased by 12%. The obtained results confirm the functional completeness of the comprehensive AR rehabilitation system and the practical implementation of the closed-loop control of the rehabilitation process.

The conclusions summarize the main results of the dissertation.

The results of the dissertation were implemented in the rehabilitation process at the Ternopil Regional Clinical Hospital, in the research activities of the Department of Physical Therapy of Ternopil National Medical University named after I.Ya. Horbachevsky, in the production process of ELEKS LLC, and in the educational process of the Department of Computer Sciences of West Ukrainian National University, as confirmed by the corresponding implementation certificates.

Keywords: software, software systems architecture, computer vision, neural network (YOLO), artificial intelligence (AI, machine learning), deep learning, augmented reality (AR, virtual environment, virtual laboratory), headset (AR headset, neuroheadset), interval models (interval data, interval data analysis, model), identification (structural identification, parametric identification), behavioral models of artificial bee colony (artificial bee colony), predicting,

decision-making, rehabilitation (physical rehabilitation, physical therapy), diagnostics (functional diagnostics).

LIST OF PUBLISHED PAPERS BY THE TOPIC OF THESIS

Scientific papers containing the main scientific results of the dissertation

1. Dyvak M, Tsapiv Y, Pukas A, Petrovskyi Y, Melnyk A, Dyvak A, Banasik A, Czupryna-Nowak A, Pikiewicz P, Popyk Y, Dzyha Y. AR Technology for Restoring Upper Limb Joint Mobility in Patients. Applied Sciences, 2026, Vol. 17. 5878. ISSN 2076-3417. (3.5 p.s. / 2 p.s.; personal contribution: development of a comprehensive AR rehabilitation system architecture, integration of components into a closed adaptive cycle for prediction and correction of the therapeutic protocol, conducting a clinical study).

DOI: 10.3390/app16125878 (Scopus, Q2).

2. Tsapiv Y., Tykhyi R. Innovative web system for goniometric analysis based on neural networks. Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series “Computer Science, Cybernetics and Computer Engineering”, 2025, No. 1 (40), pp. 80–88. (cat. B). ISSN 1996-1588. (0.9 p.s. / 0.7 p.s.; personal contribution: development of the software architecture for a goniometric analysis web system, implementation of neural network modules for anatomical landmark detection and joint angle computation).

DOI: 10.31474/1996-1588-2025-1-40-80-88.

3. Pukas A., Tsapiv Y. Automated markerless system for measuring joint ranges of motion based on three-camera video analysis. Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series “Computer Science, Cybernetics and Computer Engineering”, 2026, No. 1 (42), pp. 54–64. (cat. B). ISSN 1996-1588. (1.1 p.s. / 0.9 p.s.; personal contribution: development of a markerless three-camera joint angle measurement method, implementation of a pipeline architecture for the video analysis subsystem).

DOI: 10.31474/1996-1588-2026-1-42-54-64.

4. Tsapiv Y., Pukas A., Bilovus D. Recommendation system for physical rehabilitation support based on therapeutic image correction. *Measurement and Computing Technology in Technological Processes*, 2026, No. 2, pp. 387–396 (cat. B). ISSN 2219-9365. (1 p.s. / 0.9 p.s.; personal contribution: development of a recommendation system for physical rehabilitation support, implementation of a multi-stage AI pipeline for art-therapeutic content generation).

DOI: 10.31891/2219-9365-2026-86-45.

Scientific papers certifying the approbation of dissertation materials

5. Tsapiv Y., Dyvak M., Popovych D., Havrylenko A., Tykhyi R., Kasianchuk V. Automated Goniometric Analysis System Based on Neural Networks. 2025 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Sibenik, Croatia, 2025, pp. 762–766. ISSN 2770-5218. (0.5 p.s. / 0.3 p.s.; personal contribution: development of an automated goniometric analysis method based on neural networks, implementation of adaptive coordinate filtering algorithms and geometric fusion of measurements from three cameras).

DOI: 10.1109/ACIT65614.2025.11185897 (Scopus).

6. Tykhyi R., Tsapiv Ya., Dyvak M., Popovych D., Havrylenko A., Husieva T. Software system for supporting art therapy processes using augmented reality technologies. *Proceedings – International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2024*, pp. 660–664. ISSN 2770-5218. (0.5 p.s. / 0.3 p.s.; personal contribution: design and implementation of an AR art-therapy application for the Magic Leap 2 headset, development of spatial positioning, tactile compensation, and painting texture rendering modules).

DOI: 10.1109/ACIT62333.2024.10712584 (Scopus).

7. Holovko R., Shostopal V., Tsapiv Y. Mathematical and software support for organizing the testing process of web-oriented systems. Computer Information Technologies: Proceedings of the Young Scientists and Students Workshop CIT'2023. – Ternopil: WUNU, p. 90. (0.1 p.s. / 0.03 p.s.; personal contribution: development of the software architecture for web-based system testing).

8. Tsapiv Y. Architecture of a software system for art therapy and rehabilitation with AR. Computer Information Technologies: Proceedings of the Winter Young Scientists and Students Workshop CIT'2025. – Ternopil: WUNU, pp. 57–58.

9. Tsapiv Y. Adaptive cycle of upper limb rehabilitation based on AR technologies. Proceedings of the Spring Young Scientists and Students Workshop CIT'2025. – Ternopil: WUNU, pp. 78–79.