

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-86-45>

УДК 004.75

ЦАПІВ Ярослав

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0009-0008-8202-7325>

e-mail: y.tsapiv@wunu.edu.ua

ПУКАС Андрій

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0230-9741>

e-mail: apu@wunu.edu.ua

БІЛОВУС Дмитро

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0009-0001-4984-0153>

e-mail: db.ituplink@gmail.com

РЕКОМЕНДАЦІЙНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ФІЗИЧНОЇ РЕАБІЛІТАЦІЇ НА ОСНОВІ КОРЕКЦІЇ ТЕРАПЕВТИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

У статті розглянуто розробку та реалізацію рекомендаційної системи для підтримки прийняття рішень фізичним терапевтом у процесі реабілітації пацієнтів з порушеннями рухливості верхніх кінцівок. Рекомендаційна система інтегрована безпосередньо у вебзастосунок фізіотерапевта, побудований на React, який є складовою комплексної AR-системи реабілітації з арт-терапією на гарнітурі Magic Leap 2. Система забезпечує автоматичний збір даних про рухову активність пацієнта та отримання прогнозованих значень кутів згину суглобів на основі інтервальних математичних моделей, побудованих за даними попередніх реабілітаційних сесій. На відміну від традиційних підходів, запропоноване рішення ґрунтується не на поточних вимірюваннях, а на аналізі прогнозованої динаміки відновлення, що дозволяє здійснювати проактивну корекцію реабілітаційного процесу.

Ключовим механізмом реалізації рекомендацій є корекція терапевтичного зображення-розмальовки, яке пацієнт малює на віртуальному AR-полотні під час сеансу арт-терапії. Рекомендаційний модуль аналізує прогнозовану динаміку кутів згину та, у випадку виявлення неоптимальної траєкторії відновлення, формує рекомендації щодо зміни просторового розподілу елементів зображення для цілеспрямованої стимуляції рухів у необхідній анатомічній площині. Система генерує рекомендації щодо корекції рухової активності шляхом зміни терапевтичного зображення та налаштування параметрів AR-сесії (розмір полотна, орієнтація, відстань до полотна). Важливою особливістю запропонованого підходу є використання багатоступеневого AI-контур, у якому текстова рекомендація для терапевта автоматично трансформується мовною моделлю у prompt для генерації зображення, після чого генеративна модель створює відповідний арт-контент, який завантажується на AR-полотно через вебзастосунок фізіотерапевта.

Експериментальні результати апробації на двох пацієнтах підтверджують працездатність рекомендаційної системи: корекція терапевтичного зображення на основі рекомендацій прискорила темп відновлення кута згинання плечового суглоба у 1,9–3,9 рази та скоротила прогнозовану кількість сеансів до досягнення нормативного діапазону на 12–18%. Запропоноване рішення демонструє перспективність поєднання прогнозованої аналітики, рекомендаційних систем та генеративного штучного інтелекту для персоналізованої фізичної реабілітації.

Ключові слова: рекомендаційна система; фізична реабілітація; арт-терапія; доповнена реальність; прогнозування рухових параметрів; кути згину суглобів; підтримка прийняття рішень; генеративний штучний інтелект; персоналізована терапія; корекція терапевтичних зображень.

TSAPIV Yaroslav, PUKAS Andriy, BILOVUS Dmytro

West Ukrainian National University

RECOMMENDATION SYSTEM FOR PHYSICAL REHABILITATION SUPPORT BASED ON THERAPEUTIC IMAGE CORRECTION

The paper presents the development and implementation of a recommendation system for supporting physical therapist decision-making in the rehabilitation of patients with upper limb mobility impairments. The recommendation system is integrated directly into the physiotherapist's web application built on React, which is a component of a comprehensive AR rehabilitation system with art therapy on the Magic Leap 2 headset. The system provides automatic collection of patient motor activity data and prediction of joint flexion angles based on interval mathematical models constructed from previous rehabilitation session data. Unlike traditional approaches, the proposed solution relies not on current measurements but on the analysis of predicted recovery dynamics, enabling proactive correction of the rehabilitation process.

The key mechanism for implementing recommendations is the correction of the therapeutic coloring image that the patient draws on a virtual AR canvas during art therapy sessions. The recommendation module analyzes predicted joint angle dynamics and, upon detecting a suboptimal recovery trajectory, generates recommendations for modifying the spatial distribution of image elements to stimulate targeted movements in the required anatomical plane. The system employs a multi-stage AI pipeline in which a textual recommendation is automatically transformed by a language model into an image generation prompt, after which a generative model creates the corresponding art content delivered to the AR canvas via the physiotherapist's web application. Experimental validation on two patients confirmed system operability: therapeutic image correction based on recommendations accelerated the shoulder joint flexion recovery rate by 1.9–3.9 times and reduced the predicted number of sessions to reach the normative range by 12–18%.

Keywords: recommendation system; physical rehabilitation; art therapy; augmented reality; motor parameter prediction; joint flexion angles; decision support; generative artificial intelligence; personalized therapy; therapeutic image correction.

Стаття надійшла до редакції / Received 02.04.2026
Прийнята до друку / Accepted 06.05.2026
Опубліковано / Published 31.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© ЦАПВ Ярослав, ПУКАС Андрій, БЛОВУС Дмитро

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Порушення рухливості верхніх кінцівок є однією з основних причин функціональних обмежень у пацієнтів після травм опорно-рухового апарату, ортопедичних операцій, інсультів та інших неврологічних захворювань. Втрата або зменшення амплітуди рухів у плечових, ліктьових і променево-зап'ястних суглобах суттєво впливає на здатність людини виконувати повсякденні дії, знижує рівень самостійності та негативно позначається на якості життя [1, 2]. У зв'язку зі зростанням кількості пацієнтів, які потребують тривалої фізичної реабілітації, актуальною стає проблема підвищення ефективності реабілітаційних програм за умов обмежених ресурсів системи охорони здоров'я [3].

Фізична реабілітація верхніх кінцівок традиційно базується на індивідуально підібраних комплексах вправ, що виконуються під контролем фізичного терапевта. Рішення щодо вибору вправ, їх інтенсивності, тривалості та складності приймаються переважно на основі клінічного досвіду спеціаліста та результатів періодичної оцінки стану пацієнта [4]. Попри доведену ефективність таких підходів, вони характеризуються високою часткою суб'єктивності, а також обмеженими можливостями кількісного аналізу та прогнозування динаміки відновлення рухливості [5].

Останніми роками спостерігається активне впровадження цифрових технологій у сферу фізичної реабілітації. Особливу увагу дослідників привертають системи з використанням віртуальної та доповненої реальності (VR/AR), які дозволяють реалізувати інтерактивні реабілітаційні сценарії, адаптовані до функціональних можливостей пацієнта [6–8]. Застосування AR-технологій у фізичній терапії сприяє підвищенню мотивації пацієнтів, збільшенню тривалості та регулярності занять, а також покращенню показників відновлення рухових функцій [9].

Перспективним напрямом розвитку AR-реабілітації є поєднання фізичних вправ з елементами арт-терапії. Арт-терапія розглядається як ефективний інструмент психоемоційної підтримки пацієнтів, що сприяє зниженню рівня тривожності, підвищенню залученості та формуванню позитивного ставлення до терапевтичного процесу [10, 11]. В AR-середовищі арт-терапевтичні завдання організуються у вигляді розмальовування терапевтичного зображення на віртуальному полотні за допомогою жестів руки, де виконання художніх дій потребує здійснення цільових рухів верхніх кінцівок з визначеною амплітудою та траєкторією. При цьому просторовий розподіл елементів зображення безпосередньо визначає біомеханічний профіль рухів: вертикально орієнтовані елементи стимулюють згинання плечового суглоба, горизонтальні — відведення та приведення.

Суттєвою перевагою AR-орієнтованих арт-терапевтичних систем є можливість автоматичного збору об'єктивних даних про рухи пацієнта. Сучасні безмаркерні системи відеоаналізу на базі нейромережових детекторів, зокрема MediaPipe Pose Landmarker, дозволяють у реальному часі визначати положення сегментів верхніх кінцівок та обчислювати кути згину суглобів без використання зовнішнього вимірювального обладнання [12]. У попередній роботі авторів [13] розроблено комплексну систему AR-реабілітації, що інтегрує трикамерну підсистему безмаркерного відеоаналізу, AR-застосунок арт-терапії на гарнітурі Magic Leap 2, серверну частину NestJS та вебзастосунок фізіотерапевта на React. Таким чином, під час кожного реабілітаційного сеансу формується часовий ряд значень кутів рухливості, який відображає функціональний стан пацієнта та його зміну впродовж часу.

Незважаючи на значний прогрес у розвитку AR-систем для фізичної реабілітації, більшість наявних рішень зосереджені переважно на візуалізації поточного стану пацієнта або на постфактум аналізі зібраних даних. Значно меншою мірою досліджується можливість використання цих даних для прогнозування подальшої динаміки відновлення та автоматизованої підтримки прийняття рішень фізичним терапевтом [14]. Відсутність інтелектуальних рекомендаційних механізмів обмежує потенціал цифрових реабілітаційних платформ.

Прогнозування динаміки рухливості верхніх кінцівок є складною задачею через наявність похибок вимірювання, шумів сенсорних даних та індивідуальних особливостей виконання рухів пацієнтами [15]. У цьому контексті доцільним є використання інтервальних математичних моделей, які дозволяють враховувати невизначеність вхідних даних та представляти як виміряні, так і прогнозовані значення у вигляді інтервалів можливих значень [16]. Застосування інтервального підходу підвищує надійність оцінок та дозволяє більш коректно інтерпретувати результати прогнозування.

Наявність прогнозованих інтервальних значень кутів рухливості створює передумови для побудови рекомендаційних систем у фізичній терапії. Рекомендаційні системи у медицині розглядаються як складова систем підтримки прийняття рішень, що допомагають спеціалісту обирати оптимальні терапевтичні дії на основі аналізу даних, формалізованих критеріїв та моделей [17]. У контексті фізичної реабілітації такі системи можуть використовувати прогнозовану динаміку рухів для виявлення відхилень від очікуваного перебігу

відновлення, зокрема плато, уповільнення прогресу або ризику надмірного навантаження [18].

На відміну від традиційних rule-based рекомендаційних підходів, що ґрунтуються на фіксованих клінічних правилах, використання прогнозованих значень рухових параметрів дозволяє формувати персоналізовані рекомендації з урахуванням індивідуальної динаміки кожного пацієнта. Це особливо важливо для реабілітації верхніх кінцівок, де надмірне збільшення амплітуди або інтенсивності вправ може призвести до болю та повторної травматизації, тоді як недостатнє навантаження — до зниження ефективності терапії [19].

У даній роботі розглядається рекомендаційна система для фізичних терапевтів, інтегрована безпосередньо у вебзастосунок фізіотерапевта (React), що є складовою комплексної AR-системи реабілітації з арт-терапією на гарнітурі Magic Leap 2 [13]. Пацієнт виконує реабілітаційні вправи у формі розмальовування терапевтичного зображення на віртуальному AR-полотні, під час якого трикамерна підсистема безмаркерного відеоаналізу автоматично вимірює кути згину верхніх кінцівок. На основі зібраних часових рядів будуються інтервальні математичні моделі динаміки відновлення, що дозволяють прогнозувати подальші значення кутів рухливості. Отримані прогнозовані дані використовуються рекомендаційним модулем вебзастосунку для формування обґрунтованих рекомендацій фізичному терапевту щодо корекції терапевтичного зображення та параметрів реабілітаційного процесу.

Таким чином, запропонований підхід поєднує AR-орієнтовану арт-терапію, математичне прогнозування біомеханічних параметрів та рекомендаційну систему підтримки прийняття рішень, вбудовану у вебзастосунок фізіотерапевта. Це створює основу для переходу до проактивної та персоналізованої фізичної реабілітації верхніх кінцівок, у якій рішення щодо терапії приймаються з урахуванням прогнозованої динаміки відновлення, а реалізуються через непомітну для пацієнта корекцію терапевтичного зображення.

Враховуючи вищевикладене, розробка рекомендаційної системи для фізичної реабілітації порушень рухливості верхніх кінцівок є комплексним та мультидисциплінарним процесом, який включає основні елементи, що формують вимоги:

- Формування рекомендацій для фізичного терапевта на основі прогнозованих значень кутів згину верхніх кінцівок, отриманих з інтервальних математичних моделей динаміки відновлення.
- Інтеграція рекомендаційного модуля безпосередньо у вебзастосунок фізіотерапевта (React) для отримання поточних вимірювань, історичних часових рядів та прогнозованих значень кутів, що використовуються як вхідні дані рекомендаційної системи.
- Здатність аналізувати відхилення прогнозованої динаміки від еталонних або очікуваних траєкторій відновлення з метою виявлення уповільнення прогресу, плато або потенційного перевантаження.
- Використання формалізованих математичних критеріїв для оцінки стану реабілітаційного процесу та автоматичного визначення необхідності коригування терапевтичного зображення.
- Генерація рекомендацій щодо корекції параметрів терапевтичного зображення (просторовий розподіл елементів, орієнтація контурів, амплітуда рухів, що стимулюються) на основі результатів прогнозування.
- Забезпечення пояснюваності рекомендацій шляхом надання фізичному терапевту інформації про причини їх формування (прогнозовані відхилення, тенденції зміни кутів, рівень невизначеності) через інтерфейс вебзастосунку.
- Можливість візуалізації прогнозів і рекомендацій для окремих пацієнтів на екранах «Карта пацієнта» та «Підготовка до запуску» вебзастосунку з метою аналізу ефективності реабілітації та прийняття обґрунтованих рішень щодо подальших сеансів.
- Підтримка персоналізації рекомендацій з урахуванням індивідуальних характеристик пацієнта, стадії реабілітації та обмежень, визначених фізичним терапевтом.

АНАЛІЗ СИСТЕМ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рекомендаційні системи є одним із ключових напрямів розвитку сучасних інформаційних систем, спрямованих на підтримку прийняття рішень у складних, багатофакторних і динамічних середовищах. У загальному випадку рекомендаційна система призначена для аналізу наявних даних про об'єкт або процес та формування обґрунтованих пропозицій щодо подальших дій, параметрів або вибору альтернатив. Класичні рекомендаційні системи широко застосовуються в електронній комерції, мультимедійних сервісах та інформаційних платформах, де вони реалізуються у вигляді колаборативної фільтрації, контент-орієнтованих або гібридних підходів [20]. Однак у медичних та реабілітаційних застосуваннях рекомендаційні системи мають суттєві відмінності, зумовлені вимогами до безпеки, пояснюваності та персоналізації рішень.

У медичних інформаційних системах рекомендаційні підходи зазвичай розглядаються в межах систем підтримки прийняття клінічних рішень (Clinical Decision Support Systems, CDSS). На відміну від споживчих рекомендацій, медичні системи повинні враховувати високу відповідальність за наслідки рекомендацій, обмеженість даних для окремого пацієнта та необхідність інтеграції рекомендацій у робочий процес спеціаліста [21]. Сучасні огляди CDSS підкреслюють, що найбільшу практичну цінність мають рекомендаційні системи, які поєднують аналітику даних з інтерпретованими правилами та надають пояснення

причин кожної рекомендації [22]. Це особливо важливо для фізичної реабілітації, де рішення щодо зміни інтенсивності або характеру вправ приймаються часто та потребують обґрунтування.

У сфері фізичної реабілітації рекомендаційні системи почали активно розвиватися разом із поширенням цифрових платформ збору даних про рухову активність пацієнтів. Доповнена та віртуальна реальність, носимі сенсори та безмаркерні системи трекінгу створили умови для автоматичного отримання часових рядів рухових параметрів, зокрема кутів згину суглобів верхніх кінцівок [15]. Однак більшість таких систем на початкових етапах обмежувалася лише візуалізацією даних або їх ретроспективним аналізом, без формування рекомендацій щодо корекції реабілітаційного процесу.

У наукових роботах останніх років розглядаються різні підходи до побудови рекомендаційних систем у фізичній реабілітації. Зокрема, описані rule-based системи, що використовують заздалегідь визначені клінічні правила для адаптації вправ, а також гібридні підходи, які поєднують експертні правила з машинним навчанням [23]. Наприклад, у роботах, присвячених реабілітації верхніх кінцівок з використанням роботизованих тренажерів, запропоновано DSS-системи, які коригують параметри тренування на основі поточного рівня виконання вправ та заданих терапевтичних цілей [24]. Такі системи демонструють потенціал для автоматизації частини рішень, однак зазвичай не враховують довгострокову динаміку відновлення.

Інший напрям досліджень зосереджений на використанні штучного інтелекту та машинного навчання для формування рекомендацій у реабілітації. Зокрема, застосовуються нейромережеві моделі для класифікації якості виконання рухів або для оцінки функціонального стану пацієнта [25]. У деяких роботах запропоновано використовувати навчання з підкріпленням для адаптації складності вправ у реальному часі [26]. Хоча такі підходи є перспективними, вони часто вимагають великих обсягів навчальних даних та мають обмежену пояснюваність, що ускладнює їх впровадження у клінічну практику.

Особливої уваги заслуговують рекомендаційні системи, які використовують прогнозування як ключовий елемент формування рекомендацій. Прогнозування дозволяє перейти від реактивного аналізу до проактивного управління реабілітаційним процесом. У літературі зазначається, що прогнозування рухових параметрів, зокрема кутів згину суглобів, є важливим для раннього виявлення плато, оцінки ефективності поточного протоколу та планування наступних етапів реабілітації [27]. Водночас прогнозування у реабілітації ускладнюється наявністю шумів у даних, індивідуальними відмінностями пацієнтів та обмеженою кількістю спостережень для кожного з них.

Для вирішення цієї проблеми у сучасних дослідженнях пропонуються ймовірнісні та інтервальні підходи до прогнозування рухових параметрів. Наприклад, використання Gaussian Process Regression або інтервальних моделей дозволяє отримувати прогноз не у вигляді одного значення, а у вигляді діапазону можливих значень, що враховує невизначеність вимірювань та моделі [28]. Такий підхід є особливо релевантним для рекомендаційних систем, оскільки дозволяє формувати обережні рекомендації у випадках високої невизначеності прогнозу та уникати надмірного навантаження на пацієнта.

У контексті AR-орієнтованої фізичної реабілітації з арт-терапією прогнозування рухових параметрів стає ще більш актуальним. Безмаркерні системи трекінгу, що використовуються у стаціонарних IP-камерах для гоніометричного аналізу, мають похибки, пов'язані з оклюзіями, положенням тіла та проєкційними спотвореннями [29]. Тому рекомендаційна система, що базується лише на поточних значеннях кутів, може формувати нестійкі або некоректні рекомендації. Прогнозування з урахуванням невизначеності дозволяє згладити випадкові коливання та орієнтувати рекомендації на загальну тенденцію відновлення.

Принципово новим аспектом, який відрізняє запропонований підхід від існуючих рекомендаційних систем у реабілітації, є механізм реалізації рекомендацій через корекцію терапевтичного зображення. У традиційних системах рекомендації адресуються безпосередньо пацієнту у вигляді інструкцій щодо зміни вправ, що може знижувати мотивацію та вимагає свідомих зусиль. В арт-терапевтичному AR-середовищі рекомендація реалізується опосередковано: зміна просторового розподілу елементів зображення-розмальовки непомітно для пацієнта трансформує біомеханічний профіль його рухів. Наприклад, перехід від горизонтально орієнтованого зображення до вертикально орієнтованого стимулює збільшення амплітуди згинання плечового суглоба, оскільки для досягнення верхніх елементів зображення руку необхідно підняти вище.

З урахуванням проведеного аналізу, у даній роботі запропоновано рекомендаційну систему для фізичних терапевтів, яка вбудована у вебзастосунок фізіотерапевта та використовує прогнозовані значення кутів згину верхніх кінцівок як основу для формування рекомендацій щодо корекції терапевтичного зображення. На відміну від існуючих рішень, що спираються переважно на поточні вимірювання або статичні правила, запропонована система враховує прогноз динаміки рухливості, що дозволяє формувати персоналізовані рекомендації з урахуванням очікуваного перебігу реабілітації.

Технічно рекомендаційний модуль реалізовано як внутрішній компонент вебзастосунку фізіотерапевта (React 19 + TypeScript 5.9), який отримує від серверної частини (NestJS) часові ряди вимірюваних кутів та результати інтервального прогнозування. На основі цих даних модуль обчислює формалізовані критерії відхилення прогнозованої динаміки від очікуваних або цільових траєкторій відновлення. Саме ці критерії використовуються як тригери для генерації рекомендацій щодо корекції терапевтичного зображення

та параметрів сесії. Такий підхід узгоджується з сучасними принципами побудови пояснюваних DSS-систем, де прогнози моделі відокремлюються від логіки прийняття рішень [22].

Для реалізації рекомендаційної логіки у поточному рішенні використано інтерпретований rule-based підхід, що дозволяє фізичному терапевту розуміти причини рекомендацій безпосередньо в інтерфейсі вебзастосунок. На відміну від повністю нейромережових рекомендаційних систем, такий підхід краще відповідає вимогам клінічної практики та дозволяє поступово розширювати систему за рахунок додавання нових правил або критеріїв без повної перебудови моделі.

Окремим елементом запропонованої рекомендаційної системи є можливість генерації візуального арт-контенту (зображень-розмальовок) на основі сформованих рекомендацій. У сучасних дослідженнях з'являються роботи, присвячені використанню генеративних моделей штучного інтелекту у арт-терапії, зокрема для підвищення залученості пацієнтів та персоналізації творчих завдань [30]. Однак у більшості таких робіт генерація зображень орієнтована на психоемоційну складову терапії та не пов'язана безпосередньо з біомеханічними параметрами рухів.

У запропонованому рішенні генерація терапевтичних зображень розглядається як невід'ємна частина рекомендаційного контенту, вбудованого у вебзастосунок фізіотерапевта. Рекомендація щодо зміни біомеханічного профілю рухів трансформується у відповідне арт-завдання через вебзастосунок фізіотерапевта. Наприклад, рекомендація щодо збільшення амплітуди згинання плечового суглоба реалізується шляхом генерації зображення з переважно вертикальними елементами (високі дерева, архітектурні споруди, вертикальні абстрактні композиції), що стимулюють виконання відповідних рухів. Такий підхід дозволяє поєднати фізичну та арт-терапевтичну складові реабілітації та є елементом наукової новизни — прямий зв'язок між прогнозованими значеннями кутів і параметрами згенерованого терапевтичного контенту.

Таким чином, аналіз існуючих систем прогнозування та рекомендаційних систем у фізичній реабілітації показує, що найбільш обґрунтованим підходом для поточного рішення є поєднання інтервального прогнозування динаміки кутів згинання з інтерпретованою рекомендаційною логікою, вбудованою у вебзастосунок фізіотерапевта. Додаткова інтеграція генеративних AI-модулів для створення терапевтичних зображень на основі рекомендацій розширює функціональність системи та реалізує замкнений цикл «вимірювання — прогноз — рекомендація — корекція зображення — адаптація рухів».

АРХІТЕКТУРА РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ У ВЕБЗАСТОСУНКУ ФІЗІОТЕРАПЕВТА

Архітектура рекомендаційної системи розроблялася з урахуванням її інтеграції безпосередньо у вебзастосунок фізіотерапевта, який є складовою комплексної AR-системи реабілітації з арт-терапією [13]. Система складається з чотирьох підсистем: Python-підсистеми безмаркерного відеоаналізу на базі трьох стаціонарних IP-камер із використанням MediaPipe Pose Landmarker та фільтрації Калмана; AR-застосунок арт-терапії на гарнітурі Magic Leap 2 на рушії Unity/OpenXR; серверної частини на NestJS/TypeScript; та вебзастосунок фізіотерапевта на React. Рекомендаційний модуль вбудовано саме у вебзастосунок, що забезпечує нативну інтеграцію з інтерфейсом фізіотерапевта та прямий доступ до даних вимірювань і прогнозування.

У загальному вигляді рекомендаційний модуль розглядається як внутрішній логічний рівень вебзастосунок, що розташовується між рівнем отримання та відображення даних (React-компоненти екранів «Карта пацієнта» та «Підготовка до запуску») та рівнем серверного API (NestJS). Вебзастосунок фізіотерапевта містить два основних екрани, що безпосередньо пов'язані з рекомендаційною системою: екран «Карта пацієнта» забезпечує перегляд історії сеансів, параметрів кожного сеансу, фактичних та прогнозованих значень кутів з їх порівнянням на інтерактивному графіку; екран «Підготовка до запуску» дозволяє налаштувати конфігурацію сцени, переглянути та застосувати рекомендацію, згенерувати терапевтичне зображення та запустити новий сеанс. Такий підхід дозволяє відокремити задачі вимірювання, прогнозування та формування рекомендацій у межах єдиного інтерфейсу фізіотерапевта, що є важливим для зручності використання та подальшого розширення системи. Архітектура передбачає чітке розділення відповідальностей між компонентами та забезпечує можливість незалежного розвитку кожного з них.

Вхідними даними для рекомендаційного модуля є часові ряди значень кутів згинання суглобів верхніх кінцівок, отримані під час сеансів AR-арт-терапії. Дані формуються автоматично Python-підсистемою безмаркерного відеоаналізу на базі трьох стаціонарних IP-камер (FRONT, LEFT, RIGHT) та передаються через NestJS API (POST /api/v1/angles, JSON, ~30 Гц) на React вебпанель. Кожен пакет містить мітку часу, ідентифікатор сесії та масив з 22 кутовими значеннями з confidence. На основі накопичених часових рядів модуль інтервального прогнозування формує прогнозовані значення кутів на наступні сеанси з урахуванням динаміки відновлення та невизначеності вимірювань. Саме результати прогнозування є ключовим джерелом інформації для рекомендаційного модуля.

Центральним елементом архітектури є компонент аналізу прогнозу, інтегрований у екран «Карта пацієнта» вебзастосунок. Він порівнює прогнозовані значення кутів з очікуваними або цільовими траєкторіями відновлення. Очікувані траєкторії формуються на основі клінічних протоколів (стандарти

ААОС: згинання 160–180°, розгинання 50–60°, відведення 180° [31]) та індивідуально визначених цілей реабілітації для конкретного пацієнта. На цьому етапі обчислюються формалізовані критерії відхилення, які дозволяють кількісно оцінити, чи спостерігається покращення, стагнація або негативна динаміка рухливості. На екрані «Карта пацієнта» для кожного сеансу відображаються параметри (кути плечового суглоба право/ліво, асиметрія, дельта до попереднього сеансу), конфігурація сцени (дизайн полотна, розмір, орієнтація, кут нахилу, висота відносно очей, тривалість) та режим сеансу (базовий або адаптивний). Інтерактивний граф прогресу відображає фактичні значення кутів за проведеними сеансами та прогнозні траєкторії пунктирними лініями на наступні сеанси, а бічна панель показує числові значення кожного сеансу з позначкою «Факт» або «Прогноз». У разі виявлення негативного прогнозу система відображає попередження з конкретними числовими показниками: очікувана кількість сеансів до досягнення нормативного діапазону, відхилення від стандартного курсу та прогнозоване значення на 10-й сеанс. Отримані оцінки використовуються як сигнали для формування рекомендацій.

З огляду на практичні потреби фізичної терапії, у запропонованій архітектурі рекомендації формуються у двох напрямках: корекція терапевтичного зображення та налаштування параметрів AR-сесії.

Основним напрямком рекомендацій є корекція терапевтичного зображення, яке пацієнт розмальовує на AR-полотні під час сеансу арт-терапії. Це є ключовою відмінністю від традиційних рекомендаційних систем у реабілітації: рекомендації реалізуються не у вигляді прямих інструкцій пацієнту, а шляхом зміни просторового розподілу елементів зображення-розмальовки. Просторова структура зображення безпосередньо визначає біомеханічний профіль рухів: вертикально орієнтовані елементи (високі дерева, вежі, вертикальні абстракції) стимулюють згинання плечового суглоба з піднесенням руки угору; горизонтально орієнтовані елементи (пейзажні панорами, широкі мазки) стимулюють відведення та приведення у горизонтальній площині; дрібні деталі стимулюють точні рухи зап'ястка та пальців.

Додатковим напрямком є рекомендації щодо налаштування параметрів конфігурації сцени на екрані «Підготовка до запуску» (рис. 1). Інтерфейс надає фізіотерапевту можливість налаштувати: дизайн полотна (каркас, контурний, моно), розмір полотна (малий, середній, великий, дуже великий), орієнтацію полотна (горизонтальне або вертикальне), кут нахилу полотна (45–150°), висоту відносно очей пацієнта (–50..+50 см) та тривалість сесії (5–60 хв). Зміна цих параметрів дозволяє додатково впливати на амплітуду та напрямок рухів: збільшення розміру полотна та його вертикальна орієнтація стимулюють рухи з більшою амплітудою згинання, тоді як горизонтальне розташування — рухи відведення. Для зручності налаштування передбачено матрицю пресетів, що дозволяє швидко застосувати типові конфігурації.

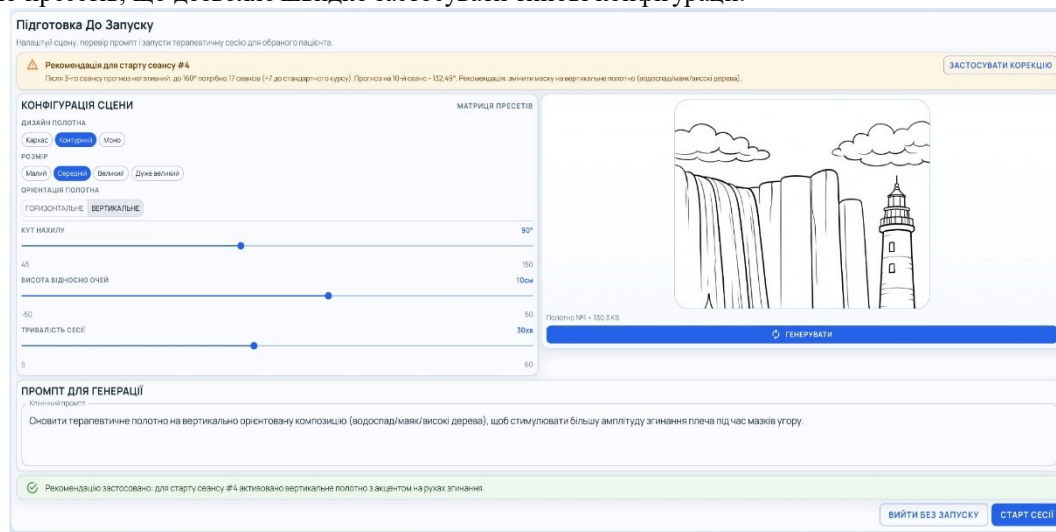


Рис. 1. Вебзастосунок фізіотерапевта: екран «Підготовка до запуску» із застосованою рекомендацією

Для реалізації корекції терапевтичного зображення на екрані «Підготовка до запуску» відображається банер рекомендації, що містить конкретний опис: номер сеансу, для якого сформовано рекомендацію, числові показники прогнозу (очікувана кількість сеансів, відхилення від стандартного курсу, прогнозоване значення на 10-й сеанс) та текстову рекомендацію щодо зміни зображення (наприклад, «змінити маску на вертикальне полотно (водоспад/маяк/високі дерева»)). Фізіотерапевт може застосувати рекомендацію натисканням кнопки «Застосувати корекцію», після чого система автоматично адаптує параметри конфігурації сцени та формує клінічний промпт у полі «Промпт для генерації». Цей промпт використовується як контекст для AI-генерації нового терапевтичного зображення.

Важливим аспектом архітектури є забезпечення пояснюваності рекомендацій безпосередньо в інтерфейсі вебзастосунку. На екрані «Карта пацієнта» у разі негативного прогнозу система відображає попередження жовтим банером з конкретними числовими показниками, наприклад: «Негативний прогноз

після 3-го сеансу: до 160° очікується 17 сеансів (+7 до стандартних 10). Прогноз на 10-й сеанс: 132,49°». Аналогічний банер рекомендації з'являється на екрані «Підготовка до запуску» перед стартом нового сеансу, додатково містячи текстову рекомендацію щодо конкретних дій. Після застосування рекомендації система підтверджує зміни зеленим банером: «Рекомендацію застосовано: для старту сеансу активовано вертикальне полотно з акцентом на рухах згинання». Це дозволяє фізичному терапевту не лише отримувати рекомендації, а й розуміти логіку їх формування та контролювати процес застосування.

Принципово важливо, що зміна терапевтичного зображення є неінвазивним втручанням: пацієнт продовжує виконувати те саме базове завдання (розмальовування на AR-полотні), не усвідомлюючи зміни терапевтичної стратегії, тоді як біомеханічний профіль його рухів суттєво трансформується завдяки іншому просторовому розподілу елементів зображення. Це демонструє унікальну перевагу AR-арт-терапії як терапевтичного інструмента: можливість тонкого, непомітного для пацієнта керування руховою активністю через зміну творчого контенту, ініційовану рекомендаційною системою вебзастосунку фізіотерапевта.

Запропонована архітектура реалізує замкнений контур керування реабілітаційним процесом «виконання — вимірювання — прогноз — рекомендація — корекція зображення — адаптація рухів», у якому дані про рухову активність пацієнта використовуються для прогнозування динаміки відновлення, результати прогнозу — для формування рекомендацій щодо зміни терапевтичного зображення, а оновлене зображення — для цілеспрямованої стимуляції рухів у необхідній анатомічній площині. Поєднання інтервального прогнозування, інтерпретованої рекомендаційної логіки та генерації арт-контенту у межах єдиного вебзастосунку фізіотерапевта створює основу для персоналізованої AR-реабілітації, що поєднує фізичні та творчі аспекти терапії.

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Рекомендаційний модуль реалізовано як внутрішній компонент вебзастосунку фізіотерапевта (React 19 + TypeScript 5.9 + збиральник Vite 7), основним завданням якого є формування рекомендацій для фізичного терапевта на основі прогнозованих значень кутів згину суглобів верхніх кінцівок. Важливою особливістю реалізації є те, що рекомендаційний модуль не формує безпосередньо інструкції для пацієнта, а надає рекомендації спеціалісту через інтерфейс вебзастосунку, який приймає остаточне рішення щодо корекції терапевтичного зображення та параметрів реабілітаційного процесу.

Прогнозовані значення кутів згину суглобів отримуються рекомендаційним модулем від серверної частини (NestJS) через REST API. Модуль інтервального прогнозування на основі історичних даних реабілітаційних сесій повертає прогноз динаміки кутів у вигляді інтервальных значень, обчислених за допомогою інтервальных математичних моделей у вигляді різницевих рівнянь, ідентифікованих алгоритмом штучної бджолоїної колонії [13]. Структурна ідентифікація визначила, що для адекватної моделі достатньо $d = 3$ попередніх значень часового ряду — тобто для формування прогнозу необхідні дані щонайменше трьох попередніх сеансів. Таким чином, рекомендаційний модуль використовує прогноз як вхідні дані, не втручаючись у процес математичного моделювання.

На основі отриманих прогнозованих значень рекомендаційний модуль у вебзастосунку виконує аналіз динаміки відновлення та формує рекомендації, які відображаються на екранах «Карта пацієнта» та «Підготовка до запуску». Рекомендації можуть стосуватися:

зміни терапевтичного зображення-розмальовки для стимуляції рухів у необхідній анатомічній площині;

корекції параметрів AR-середовища (розмір полотна, орієнтація, відстань до полотна відносно пацієнта).

Сформована рекомендація є семантичним описом бажаних змін у біомеханічному профілі рухів пацієнта та виступає вхідними даними для наступного етапу — генерації нового терапевтичного зображення. Для автоматизації переходу від рекомендації до арт-терапевтичного завдання у вебзастосунку реалізовано модуль формування запитів (prompt generation). Даний модуль використовує API великої мовної моделі для автоматичної генерації текстового prompt, призначеного для подальшої генерації зображення-розмальовки.

Вхідними даними для модуля генерації prompt є текст рекомендації, а вихідними — структурований текстовий опис зображення, що відображає необхідні рухові характеристики. Наприклад, рекомендація щодо стимулювання рухів з великою амплітудою згинання плечового суглоба трансформується у опис зображення з переважно вертикальними елементами: високими деревами, архітектурними спорудами, вертикальними абстрактними композиціями з мінімальною кількістю дрібних горизонтальних деталей.

Генерація prompt реалізується з використанням API великої мовної моделі (LLM). Рекомендаційний модуль формує запит до LLM, передаючи системний контекст про арт-терапевтичне призначення зображень та клінічну рекомендацію щодо необхідного біомеханічного профілю рухів. У відповідь мовна модель генерує структурований текстовий prompt, що описує візуальні характеристики зображення-розмальовки з урахуванням терапевтичних вимог — орієнтацію елементів, їх розподіл у просторі, рівень деталізації та стиль контурів.

Отриманий промт передається до модуля генерації зображень, який через API генеративної моделі створює чорно-білі або спрощені контурні зображення, придатні для використання як терапевтичні розмальовки на AR-полотні. Параметри генерації (роздільність, фон, стиль) налаштовуються відповідно до технічних вимог AR-гарнітури та специфіки арт-терапевтичного завдання.

Отримане зображення автоматично завантажується через вебзастосунок фізіотерапевта на AR-полотно гарнітури Magic Leap 2 без перезапуску AR-застосунку — зміна налаштувань фізіотерапевтом негайно відображається у гарнітурі через WebSocket push від серверної частини NestJS. Це є ключовою клінічною функцією: фізіотерапевт може оперативно змінити терапевтичне зображення прямо під час сеансу або між сеансами, реалізуючи рекомендацію системи.

Таким чином, у вебзастосунку фізіотерапевта реалізовано ланцюжок AI-взаємодії, де рекомендаційний модуль аналізує прогноз та формує рекомендацію, мовна модель інтерпретує її у вигляді промт, а генеративна модель створює візуальний контент, який завантажується на AR-полотно. Такий підхід дозволяє уникнути жорстко заданих шаблонів арт-завдань та забезпечує адаптацію візуального контенту до індивідуальних особливостей реабілітації пацієнта. Крім того, він зберігає пояснюваність рекомендацій для терапевта та забезпечує гнучкість системи при розширенні на інші типи рухів або суглобів.

Експериментальна перевірка рекомендаційної системи проводилася у рамках клінічного дослідження на базі імерсивного хабу Західноукраїнського національного університету на даних двох пацієнтів із ортопедичними діагнозами. Перші три сеанси для кожного пацієнта проводилися у базовому режимі (позначається як «Базовий» на екрані «Карта пацієнта») з довільним зображенням. Рекомендаційний модуль вебзастосунку автоматично формував прогнозні траєкторії після третього сеансу (мінімальна кількість при порядку моделі $d = 3$). Для першого пацієнта (48 років, остеоартроз, початковий кут згинання 70°) прогноз показав, що при поточному терапевтичному протоколі досягнення нормативного діапазону 160° можливе лише на 16-му сеансі — на 60% більше стандартного курсу з 10 сеансів. Для другого пацієнта (20 років, перелом, початковий кут 62°) прогноз був ще менш сприятливим — на екрані «Карта пацієнта» (рис. 2) система відобразила попередження: «Негативний прогноз після 3-го сеансу: до 160° очікується 17 сеансів (+7 до стандартних 10). Прогноз на 10-й сеанс: $132,49^\circ$ ».

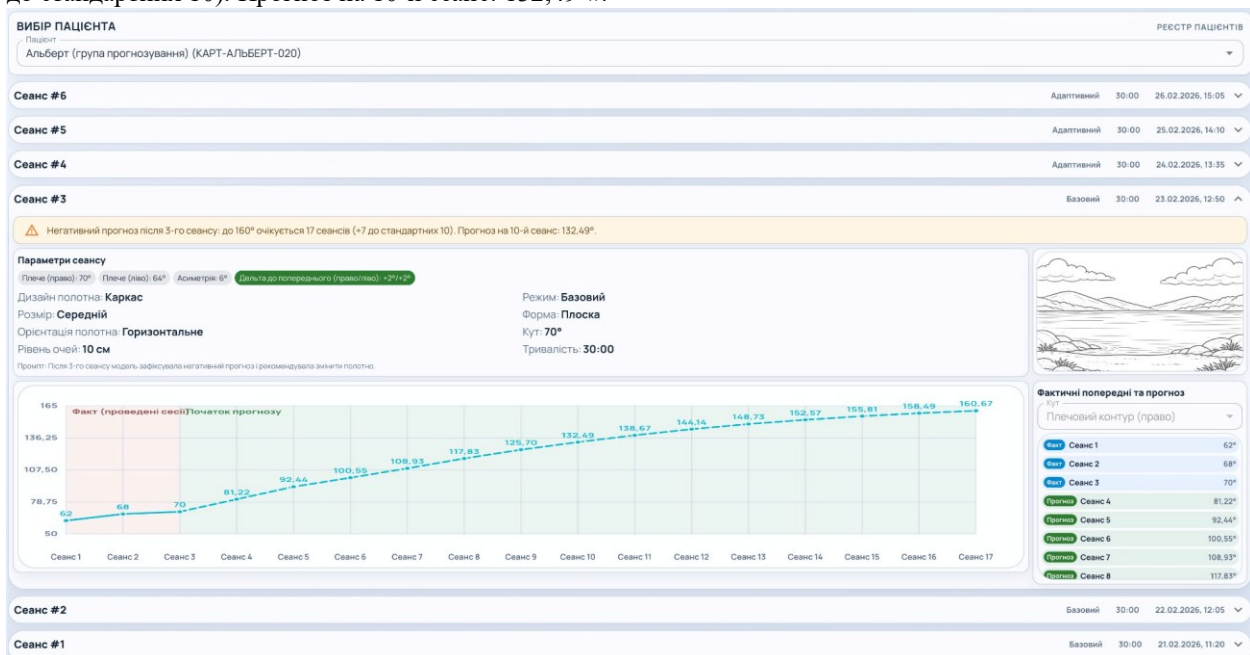


Рис. 2. Вебзастосунок фізіотерапевта: екран «Карта пацієнта» з інтерактивним графом прогресу (фактичні та прогнозовані значення кутів суглоба)

На екрані «Підготовка до запуску» перед четвертим сеансом система сформулила рекомендацію: змінити маску на вертикальне полотно з елементами водоспаду, маяка та високих дерев для стимуляції більшої амплітуди рухів у площині згинання.

Фізіотерапевт застосував рекомендацію через кнопку «Застосувати корекцію» на екрані «Підготовка до запуску», після чого система автоматично змінила орієнтацію полотна на вертикальну, сформулила клінічний промт та згенерувала нове контурне зображення з вертикально орієнтованими елементами. Наступні сеанси (4-й, 5-й, 6-й) проводилися вже в адаптивному режимі (позначається як «Адаптивний» на екрані «Карта пацієнта»). Після проведення сеансів із скоригованим зображенням було зафіксовано значне прискорення позитивної динаміки: корекція терапевтичного зображення на основі рекомендацій прискорила темп відновлення кута згинання плечового суглоба у 1,9–3,9 раза та скоротила прогнозовану кількість сеансів на 12–18%.

Аналіз результатів підтвердив, що рекомендаційний модуль вебзастосунку коректно реагує на різні сценарії прогнозованої динаміки та формує рекомендації, узгоджені з клінічною логікою фізичної терапії. Механізм рекомендацій щодо зміни терапевтичного зображення виявився ефективним каналом впливу на біомеханічний профіль рухів пацієнта, при цьому пацієнт не відчуває зміни як «збільшення навантаження» — він продовжує виконувати творче завдання, що підтримує мотивацію та прихильність до програми реабілітації.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У роботі розроблено та реалізовано рекомендаційну систему для підтримки прийняття рішень фізичним терапевтом у процесі реабілітації пацієнтів з порушеннями рухливості верхніх кінцівок. Запропонована система інтегрована безпосередньо у вебзастосунок фізіотерапевта (React), що є складовою комплексної AR-системи реабілітації з арт-терапією на гарнітурі Magic Leap 2, і орієнтована на використання прогнозованих значень кутів згину суглобів як основного інформаційного джерела для формування рекомендацій, що дозволяє здійснювати проактивну корекцію реабілітаційного процесу на основі очікуваної динаміки відновлення.

Рекомендаційний модуль реалізовано як внутрішній компонент вебзастосунку із нативною інтеграцією з екранами «Карта пацієнта» та «Підготовка до запуску», що забезпечує зручність використання та пряму візуалізацію прогнозів і рекомендацій. Вхідними даними для рекомендаційного модуля є прогнозовані інтервальні значення кутів згину суглобів, отримані від модуля інтервального прогнозування через серверну частину NestJS для конкретного пацієнта з урахуванням його попередніх сесій реабілітації.

У межах роботи запропоновано підхід до формування рекомендацій на основі аналізу відхилень прогнозованої динаміки від очікуваних або цільових траєкторій відновлення. Формування рекомендацій ґрунтується на інтерпретованій rule-based логіці, що дозволяє забезпечити прозорість та пояснюваність результатів для фізичного терапевта. Такий підхід є особливо важливим у медичних застосуваннях, де автоматизовані системи повинні не замінювати фахівця, а підтримувати його у прийнятті рішень.

Ключовою відмінністю запропонованої рекомендаційної системи є механізм реалізації рекомендацій через корекцію терапевтичного зображення-розмальовки на AR-полотні. Рекомендації щодо зміни біомеханічного профілю рухів трансформуються у зміну просторового розподілу елементів зображення, що непомітно для пацієнта спрямовує його рухову активність у необхідному напрямку. Це є неінвазивним втручанням, яке зберігає творчий характер арт-терапії та одночасно забезпечує цілеспрямовану стимуляцію відповідних рухів.

Окремим результатом роботи є реалізація багатоступеневого AI-підходу до трансформації рекомендацій у терапевтичні зображення. Система використовує мовну модель для автоматичного формування текстового prompt на основі рекомендації, після чого генеративна модель створює візуальний контент, який завантажується на AR-полотно через вебзастосунок фізіотерапевта. Такий підхід дозволяє автоматизувати процес адаптації терапевтичних завдань та уникнути використання фіксованих шаблонів.

Експериментальні результати апробації на двох пацієнтах підтвердили ефективність рекомендаційної системи: корекція терапевтичного зображення на основі рекомендацій прискорила темп відновлення кута згинання плечового суглоба у 1,9–3,9 разів та скоротила прогнозовану кількість сеансів на 12–18%.

Таким чином, розроблена рекомендаційна система, вбудована у вебзастосунок фізіотерапевта, є ефективним інструментом підтримки прийняття рішень, що поєднує прогнозну аналітику, інтерпретовану логіку рекомендацій, генеративні можливості штучного інтелекту та унікальний механізм корекції терапевтичних зображень. Реалізований замкнений цикл «вимірювання — прогноз — рекомендація — корекція зображення — адаптація рухів» створює основу для подальших досліджень, спрямованих на розширення системи на інші суглоби та підвищення рівня автоматизації персоналізованої AR-реабілітації.

References

1. Cieza A., Kamenov K., Sanchez M.G. et al. Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease study 2019 // *The Lancet*. – London, United Kingdom, 2021. – Vol. 396, No. 10267. – P. 2006–2017.
2. Bernhardt J., Hayward K.S., Dancause N. et al. A stroke recovery trial development framework // *The Lancet Neurology*. – London, United Kingdom, 2017. – Vol. 16, No. 10. – P. 800–809.
3. World Health Organization. WHO global report on health equity for persons with disabilities // World Health Organization. – Geneva, Switzerland, 2022.
4. McCabe J., Monkiewicz M., Holcomb J., Pundik S., Daly J.J. Comparison of robotics, functional electrical stimulation, and motor learning methods for upper limb rehabilitation // *Stroke*. – Dallas, USA, 2015. – Vol. 46, No. 3. – P. 100–107.
5. Valdes K., Naughton N., Algar L. The Use of Patient-centered Outcome Measures by Hand Therapists: A Practice Survey // *Journal of Hand Therapy*. – Philadelphia, USA, 2016. – Vol. 29, No. 2. – P. 123–131; DOI: 10.1016/j.jht.2014.08.005.
6. Laver K.E., George S., Thomas S., Deutsch J.E., Crotty M. Virtual reality for stroke rehabilitation: An updated systematic review // *Cochrane Database of Systematic Reviews*. – London, United Kingdom, 2017. – Issue 11.
7. Levin M.F., Weiss P.L., Keshner E.A. Emergence of virtual reality as a tool for upper limb rehabilitation // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – London, United Kingdom, 2015. – Vol. 12. – Article 15.
8. Dockx K., Bekkers E.M., Van den Bergh V. et al. Virtual reality for rehabilitation in Parkinson's disease // *Cochrane Database of Systematic Reviews*. – London, United Kingdom, 2016. – Issue 12.

9. Howard M.C. A meta-analysis and systematic literature review of virtual reality rehabilitation programs // *Computers in Human Behavior*. – Amsterdam, Netherlands, 2017. – Vol. 70. – P. 317–327.
10. Kaimal G., Ray K., Muniz J. Reduction of cortisol levels and participants' responses following art making // *Art Therapy*. – London, United Kingdom, 2016. – Vol. 33, No. 2. – P. 74–80.
11. Gaetano Tieri, Marco Iosa, Antonio Fortini, Federica Aghilarre, Federico Gentili, Cristiano Rubeca, Tommaso Mastropietro, Gabriella Antonucci, Roberto De Giorgi. Efficacy of a Virtual Reality Rehabilitation Protocol Based on Art Therapy in Patients with Stroke: A Single-Blind Randomized Controlled Trial; DOI: 10.3390/brainsci14090863.
12. Shotton J., Fitzgibbon A., Cook M. et al. Real-time human pose recognition in parts from single depth images // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – Las Vegas, USA, 2016. – P. 1297–1304.
13. Tsapiv Y., Dyvak M., Tykhyi R., Popovych D., Havrylenko A. Automated Goniometric Analysis System Based on Neural Networks. Proc. of 2025 15th International Conference on ACIT, 2025, pp. 1–5.
14. Glegg S.M.N., Levac D.E. Barriers, facilitators and interventions to support virtual reality implementation in rehabilitation // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – London, United Kingdom, 2018. – Vol. 15. – Article 78.
15. Bonnechère B., Jansen B., Salvia P. et al. Validity and Reliability of the Kinect within Functional Assessment Activities: Comparison with Standard Stereophotogrammetry. DOI:10.1016/j.gaitpost.2013.09.018.
16. Moore R.E., Kearfott R.B., Cloud M.J. Introduction to interval analysis // *SIAM*. – Philadelphia, USA, 2015.
17. Sutton R.T., Pincock D., Baumgart D.C. et al. An overview of clinical decision support systems // *Journal of Medical Internet Research*. – Toronto, Canada, 2020. – Vol. 22, No. 10. – Article e19340.
18. Esteva A., Robicquet A., Ramsundar B. et al. A guide to deep learning in healthcare // *Nature Medicine*. – London, United Kingdom, 2019. – Vol. 25. – P. 24–29.
19. Brunner I. C., Andrinopoulou E.-R., Selles R., Lundquist C. B. L. External Validation of a Dynamic Prediction Model for Upper Limb Function After Stroke // *Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation*. – 2024. – Vol. 5. – P. 100315.
20. Ricci F., Rokach L., Shapira B. Recommender Systems: Techniques, Applications, and Challenges // *Recommender Systems Handbook*. – Boston, USA, 2015. – P. 1–35.
21. Sutton R.T., Pincock D., Baumgart D.C., Sadowski D.C., Fedorak R.N., Kroeker K.I. An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success // *Journal of Medical Internet Research*. – Toronto, Canada, 2020. – Vol. 22, No. 10. – Article e19340.
22. Shortliffe E.H., Sepúlveda M.J. Clinical decision support in the era of artificial intelligence // *JAMA*. – Chicago, USA, 2018. – Vol. 320, No. 21. – P. 2199–2200.
23. Corchado J.M., Bajo J., Abraham A. Hybrid intelligent decision support systems // *Information Sciences*. – Amsterdam, Netherlands, 2016. – Vol. 353–354. – P. 1–3.
24. Wang, Y., Han, X., Xin, B., Zhao, P. Innovations in Upper Limb Rehabilitation Robots: A Review of Mechanisms, Optimization, and Clinical Applications // *Robotics*. – 2025. – Vol. 14, No. 6. – Article 81.
25. Nicora G., Pe S., Santangelo G., Aprile I. G., Germanotta M., Bellazzi R., Parimbelli E. A Systematic Review of Machine Learning in Robotics-Assisted Rehabilitation // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – 2025. – Vol. 22. – Article 102.
26. Avishag Deborah Pelosi et al. Adaptive Machine Learning and Reinforcement Learning for Personalized Upper Limb Rehabilitation in Virtual Reality // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – Article 25678.
27. Kwakkel G., van Wegen E.E., Burridge J.H. et al. Standardized measurement of quality of upper limb movement after stroke // *Stroke*. – Dallas, USA, 2019. – Vol. 50, No. 1. – P. 14–23.
28. Liang, J., Liu, Y., Wang, X., Wang, J. Gaussian Process Autoregression for Joint Angle Prediction with Uncertainty Estimation // *Frontiers in Public Health*. – 2021. – Vol. 9. – Article 685596.
29. Lam, W. W. T., Tang, Y. M., Fong, K. N. K. A systematic review of the applications of markerless motion capture (MMC) technology for clinical measurement in rehabilitation // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – 2023. – Vol. 20, No. 1. – Article 57.
30. Shojaei, F., Shojaei, F., Osorio Torres, J., Shih, P. C. Insights From Art Therapists on Using AI-Generated Art in Art Therapy: Mixed Methods Study // *JMIR Formative Research*. – 2024. – Vol. 8, No. e63038. – P. 1–12.
31. American Academy of Orthopaedic Surgeons. Joint Motion: Method of Measuring and Recording. Chicago: AAOS, 1994.