

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Песчанського Владислава Юрійовича
на тему «Алгоритмічне та програмне забезпечення технології цифрових
двійників медико-біологічних об'єктів»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань «Інформаційні технології»
за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення»

Актуальність теми дисертації.

У сучасних умовах стрімкого прогресу інформаційних технологій, штучного інтелекту та методів глибокого навчання технологія цифрового двійника (digital twin) займає ключову позицію серед засобів точної візуалізації та прогностичного аналізу складних біомедичних систем. Такий двійник виступає як комплексна кіберфізична модель, здатна в реальному часі обмінюватися даними з фізичним прототипом і синхронно відображати його анатомічні та функціональні особливості. Це переводить медичну аналітику від статичних ретроспективних досліджень до динамічного моніторингу стану пацієнта, що, у свою чергу, відкриває шлях до персоналізованої діагностики та лікування. Попри успішне застосування цифрових двійників у промисловості та енергетиці, їх впровадження в медичну практику стримується складністю та неоднорідністю клінічних даних, жорсткими вимогами до захисту конфіденційної інформації (зокрема згідно з GDPR та національними нормативами), а також необхідністю ретельної валідації математичних моделей через потенційні клінічні ризики.

Дисертаційна робота В. Ю. Песчанського є актуальною відповіддю на ці виклики. У ній вперше запропоновано формалізовану мікросервісну архітектуру для програмної платформи цифрових двійників, розроблено алгоритм синхронізації та семантичної обробки мультимодальних часових даних із використанням графових нейронних мереж, а також метод персоналізованого налаштування тривимірних моделей відповідно до індивідуальних морфологічних та функціональних характеристик пацієнта. Основа розробок – концепція мультимедіа (multimedia), яка поєднує аудіо- та відеокomпоненти в уніфікованому цифровому середовищі, що забезпечує іммерсивне та високореалістичне моделювання. Отримані результати узгоджуються з національною стратегією цифрової трансформації охорони здоров'я та сприяють переходу від розрізненого підходу до обробки медичних даних до уніфікованої, стандартизованої та безпечної цифрової моделі пацієнта. Це, у свою чергу, підвищує якість медичних послуг, знижує ризики для пацієнтів і створює фундамент для подальшого розвитку телемедичних технологій.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. **Уперше** розроблено узагальнену архітектуру програмної системи для створення і використання цифрових двійників медико-біологічних об'єктів, характерними рисами якої є поєднання мультимодальних темпоральних даних у форматі, який підтримує двосторонню інтеграцію з фізичним об'єктом через давачі, актуатори та інші програмно-апаратні засоби, що надає можливість перейти від фрагментарного оброблення окремих типів даних до цілісної моделі, яка може оновлюватися в реальному часі.
2. **Уперше** розроблено метод синхронізації темпоральних мультимодальних даних, характерною рисою якого є поєднання відео та аудіо у єдиний потік даних, що забезпечує узгодження даних різної модальності та, у такий спосіб, спрощує процес створення цифрового двійника медико-біологічного об'єкта на основі даних, які надходять з давачів різних типів.
3. **Уперше** розроблено метод семантичного аналізу для виявлення кореляцій між наборами даних та прогнозування поведінки програмно-апаратних компонентів цифрового двійника, характерними рисами якого є застосування графових баз даних та алгоритмів машинного навчання, що дає змогу об'єднувати дані з різних джерел (пацієнти, пристрої, записи) в єдину онтологічну модель, що забезпечує автоматизоване виявлення залежностей у даних про медико-біологічний об'єкт, а також надає інструменти для прогнозування стану програмно-апаратного забезпечення цифрового двійника.
4. **Удосконалено** теоретичні засади оброблення просторово-часових параметрів медико-біологічного об'єкта для побудови його цифрового двійника, що полягає у застосуванні тривимірних згорткових нейронних мереж (3D-CNN) та рекурентних архітектур для оброблення відео- та аудіоданих та, на відміну від відомих підходів, дає змогу забезпечити комплексний аналіз динамічних змін структури та функціонування медико-біологічного об'єкта з врахуванням його індивідуальних анатомічних особливостей та динаміки.
5. **Уперше** розроблено архітектурні шаблони проектування для розроблення програмних систем на основі цифрових двійників медико-біологічних об'єктів, які, на відміну від відомих, орієнтовані на оперування складними наборами мультимодальних темпоральних даних, інтегрованих у єдину семантичну модель, що дає змогу спростити процес розроблення, обслуговування та масштабування медичних програмних систем.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Песчанського В.Ю. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Інженерія програмного забезпечення».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям програмної інженерії.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Песчанського Владислава Юрійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською / англійською мовою.

Текст дисертації має чітку й логічну структуру: розділи та підрозділи взаємопов'язані і послідовно викладені, що забезпечує зручність сприйняття матеріалу. Завершення кожного розділу містить коротке резюме, яке допомагає читачеві узагальнити викладене. Стиль викладу зберігає наукову строгість, водночас залишаючись доступним для фахівців-практиків. Використана термінологія відповідає загальноприйнятим нормам у галузях інженерії програмного забезпечення, біомедичних технологій та семантичного аналізу. Автор ретельно дотримується принципів академічного письма: речення граматично вивірені, нові терміни одразу супроводжуються визначеннями, а всі скорочення чітко пояснені у відповідному списку.

Візуальний матеріал – 16 рисунків і 2 таблиці – доповнює виклад, залишаючись інформативним і лаконічним.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 167 сторінок.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, окреслено його мету та завдання, визначено об'єкт і предмет, а також подано стисле резюме наукової новизни та практичної значущості отриманих результатів.

Перший розділ містить огляд сучасних математичних, алгоритмічних і програмних підходів до обробки даних медико-біологічних об'єктів. Розглянуто

проблематику уніфікації форматів даних і складнощі інтеграції цифрових двійників у медичні інформаційні платформи.

У другому розділі викладено методологію синхронізації та семантичного аналізу мультимодальних часових даних. Автор поєднує інструменти графових нейронних мереж з онтологічними моделями для виявлення стійких патернів у медичних сигнальних даних.

Третій розділ присвячено розробці методу персоналізації цифрової моделі пацієнта через адаптацію тривимірного шаблону медико-біологічного об'єкта з використанням згорткових 3D-мереж (3D-CNN).

Четвертий розділ розглядає побудову узагальненої мікросервісної архітектури програмного комплексу цифрових двійників, зокрема аспекти безперервної інтеграції та розгортання (CI/CD), забезпечення кібербезпеки та сумісності з наявними цифровими інфраструктурами.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України категорії Б. Також результати дисертації були апробовані на 2 наукових фахових конференціях.

Публікації здобувача за тематикою дисертаційного дослідження мають високий науковий рівень. У всіх публікаціях дотримано принципів академічної доброчесності.

Характеристика особистого внеску здобувача в наукових працях, опублікованих зі співавторами та зарахованих за темою дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Песчанський В.Ю., Сулема Є.С. Проєктування архітектури програмної системи для створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів. «Системні технології». 2023. № 5 (148). С. 62-70. DOI: 10.34185/1562-9945-5-148-2023-06 Здобувачем запропоновано основні критерії для проєктування архітектури програмної системи для створення цифрових двійників медико-біологічних
2. Песчанський В.Ю., Сулема Є.С. Методи створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів на прикладі отоларингології. «Системні технології». 2023. № 6 (149). С. 3-10. DOI: 10.34185/1562-9945-6-149-2023-01

Здобувачем порівняно методи для збору та оброблення даних медико-біологічних об'єктів для їх подальшого використання при побудові цифрового двійника

3. Песчанський В.Ю., Сулема Є.С. Метод синхронізації темпоральних мультимодальних даних для створення цифрового двійника гортані. «Системні технології». 2024. № 5 (154). С. 137-145. DOI: 10.34185/1562-9945-5-154-2024-14

Здобувачем запропоновано метод синхронізації темпоральних мультимодальних даних на основі нормалізації відео та аудіо потоків з подальшим кореляційним аналізом

4. Песчанський В.Ю., Сулема Є.С. Архітектурні принципи забезпечення верифікації та якості системи створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів. «Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки». 2024. Том 345 № 6(2). С. 158-164. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-345-6-24

Здобувачем запропоновано узагальнену архітектуру програмної системи для створення і використання цифрових двійників медико-біологічних об'єктів, характерними рисами якої є поєднання мультимодальних темпоральних даних у форматі, який підтримує двосторонню інтеграцію з фізичним об'єктом через давачі, актуатори та інші програмно-апаратні засоби

Матеріали наукових конференцій

5. Песчанський В.Ю., Сулема Є.С. Відтворення тривимірної моделі об'єкту на основі набору зображень. Тринадцята наукова конференція магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютинг (ПМК'2020)». Київ. 18 - 20 листопада 2020 р. Збірник тез доповідей Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського». Київ: Просвіта. – 2020. – С. 233-236. ISBN 9786177010-14-1

Здобувачем запропоновано метод відтворення тривимірної моделі об'єкту на основі набору зображень за рахунок виявлення та співставлення наборів ключових точок на наборі зображень з подальшою тріангуляцією для визначення просторових координат

6. Песчанський В.Ю., Сулема Є.С. Алгоритм зчитування та аналізу даних медико-біологічних об'єктів у форматі PDF на основі оптичного розпізнавання символів. П'ятнадцята наукова конференція магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютинг (ПМК'2022)», Київ, 16 - 18 листопада 2022 р. Збірник тез доповідей Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського», Київ: Просвіта. – 2022. – С. 416-420. ISBN 978-617-7010-14-1

Здобувачем запропоновано алгоритм зчитування та аналізу даних медичних і біологічних об'єктів із PDF-файлів, заснований на оптичному розпізнаванні символів, який поєднує використання нейронної мережі для спрощення розпізнавання символів із подальшим синтаксичним аналізом отриманих даних та побудовою абстрактного синтаксичного дерева

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Попри значний обсяг проведених досліджень, робота має ряд недоліків:

1) хоча у роботі й представлено архітектуру, методи синхронізації та персоналізації, проте бракує опису впровадження або пілотного тестування у реальних клінічних умовах; відсутня також оцінка ефективності системи з точки зору лікаря-користувача або медичної установи;

2) попри згадки про анонімізацію, питання конфіденційності, відповідності стандартам (як-от GDPR), глибокий аналіз етичних ризиків при використанні медичних даних у цифрових двійниках не подано, проте, на мою думку, це питання є важливим з огляду на клінічне застосування;

3) у тексті дисертації майже не представлено емпіричних результатів, пов'язаних із точністю прогнозів цифрового двійника, продуктивністю обробки даних або порівнянням із іншими відомими підходами, що зменшує довіру до практичної цінності запропонованих методів;

4) дисертація майже не розглядає помилки моделювання, неточності даних сенсорів або варіативність біологічних реакцій, які можуть впливати на точність цифрового двійника;

5) у роботі недостатньо висвітлено, як розроблені підходи узгоджуються з клінічними протоколами, біоетикою або вимогами лікарів, також відсутня участь медичних фахівців у процесі оцінювання створених моделей;

6) доцільно розширити статистичну верифікацію пропонованих алгоритмів: окрім наведеної точності синхронізації, необхідно подати повні показники чутливості, а також оцінити вплив шумів різної природи на результат;

7) у багатьох розділах наявні повтори визначень (наприклад, цифровий двійник описується майже ідентично в кількох частинах); теоретичні вкладки часто переобтяжені термінами без прикладів, що ускладнює сприйняття.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії Песчанського Владислава Юрійовича на тему «Алгоритмічне та програмне забезпечення технології цифрових двійників медико-біологічних об'єктів» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для інформаційних технологій. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Песчанський Владислав Юрійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань «Інформаційні технології» за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення».

Офіційний опонент:

Декан факультету інформаційних
технологій Хмельницького
національного університету
доктор технічних
наук, професор



«02» травня 2025 року

Підпис дійсний
Засвідчую
Навчальний відділ кадрів
I.С.Мартинюк

Тетяна ГОВОРУЩЕНКО