

РЕЦЕНЗІЯ

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.

В умовах інтенсивного розвитку інформаційних технологій, штучного інтелекту та глибокого навчання технологія digital twin (цифрового двійника) розглядається як перспективний інструментарій для високоточної репрезентації та аналізу складних медико-біологічних систем. Цифровий двійник визначається як інтегрована кібернетично-фізична модель, яка забезпечує двосторонній обмін даними з реальним об'єктом і синхронно відображає його анатомічні та функціональні характеристики у часовому континуумі. Застосування таких моделей у медицині дає змогу трансформувати парадигму клінічних досліджень від ретроспективного аналізу статичних даних до безперервного моніторингу стану пацієнта, що, своєю чергою, закладає основу для персоналізованих діагностичних і терапевтичних процедур.

Незважаючи на підтверджену ефективність цифрових двійників у техногенних галузях (промисловість, логістика, енергетика), їх широкомасштабне впровадження у сфері охорони здоров'я стримується низкою критичних проблем: високою розмірністю й гетерогенністю клінічних даних, необхідністю гарантованого захисту персональної інформації та підвищеними вимогами до достовірності й валідації математичних моделей, спричиненими потенційними клінічними ризиками.

Дисертаційне дослідження В. Ю. Песчанського спрямоване на системне усунення зазначених бар'єрів шляхом: формалізації узагальненої мікросервісної архітектури програмної платформи цифрових двійників; розроблення алгоритму синхронізації та семантичного аналізу мультимодальних темпоральних даних із використанням графових нейронних мереж; створення методу адаптації базових 3D-моделей до індивідуальних параметрів пацієнта. Запропоновані підходи орієнтовані на концепцію mulsemmedia, що передбачає консолідацію відео-, аудіо- та тактильних сигналів у єдиному формалізованому середовищі для побудови високореалістичних імерсійних моделей.

Отримані результати кореспондують із завданнями цифрової трансформації охорони здоров'я України, оскільки забезпечують перехід від

фрагментарного аналізу інформації до стандартизованої, комплексної та безпечної віртуальної репрезентації пацієнта, підвищуючи якість медичних послуг, мінімізуючи клінічні ризики та створюючи передумови для розвитку телемедицини й симуляційно-освітніх 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.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі програмного забезпечення комп'ютерних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках НДР під керівництвом завідувача кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, доктора технічних наук, доцента Сулеми Євгенії Станіславівни.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання, а саме підвищення ефективності процесів проектування медичних інформаційних систем на основі технології цифрових двійників за рахунок розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення для оброблення мультимодальних темпоральних даних про медико-біологічний об'єкт 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 освітньої 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 структуровано чітко й логічно: розділи та підрозділи органічно пов'язані, а наприкінці кожного подано стислий підсумок, що сприяє зручній навігації читача. Мова викладу лишається науковою, проте достатньо зрозумілою для практиків; ужиті терміни відповідають усталеній лексиці програмної, біомедичної та семантичної інженерії. Автор послідовно дотримується вимог академічного письма: речення відзначаються чіткою синтаксичною побудовою, нові поняття вводяться з одразу поданими дефініціями, а всі аббревіатури розшифровано у переліку умовних позначень.

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 актуальність теми, сформульовано мету й завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет, подано стислий огляд наукової новизни та практичної цінності результатів.

Перший розділ присвячено аналізу існуючих математичних, алгоритмічних і програмних рішень для обробки даних про медико-біологічні об'єкти; висвітлено проблеми стандартизації форматів та інтеграції цифрових двійників у медичні інформаційні системи.

Другий розділ описує методи синхронізації та семантичного аналізу мультимодальних темпоральних даних, поєднуючи графові нейронні мережі й онтологічні підходи для виявлення закономірностей у медичних сигналах.

У **третьому розділі** розроблено метод адаптації базової 3D-моделі медико-біологічного об'єкта із застосуванням 3D-CNN, що дозволяє персоналізувати цифровий двійник під конкретного пацієнта.

Четвертий розділ присвячено узагальненій мікросервісній архітектурі програмної системи цифрових двійників, питанням CI/CD, безпеки й інтеграції.

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;

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

проектування 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.

По-перше, вибір графових нейронних мереж як основного інструмента семантичного аналізу обґрунтовано загальними міркуваннями, однак відсутня порівняльна оцінка з альтернативними підходами, наприклад, трансформерами для мультимодальних даних; така абляційна перевірка дозволила б чіткіше окреслити внесок кожного компонента.

По-друге, наведені показники продуктивності системи не містять аналізу масштабованості: бракує даних про швидкодію при збільшенні обсягу потокових сигналів і про споживання обчислювальних ресурсів, що важливо для клінічних сценаріїв реального часу.

По-третє, у третьому розділі формули, які описують алгоритм адаптації 3D-моделі, подані без проміжних виведень; деталізація математичних перетворень дала б змогу незалежно відтворити результати.

По-четверте, частина посилань датована до 2015 р., тоді як у галузі цифрових двійників за останні роки з'явилося чимало релевантних робіт — оновлення бібліографії підсилить актуальність огляду.

По-п'яте, макети користувацького інтерфейсу для лікарів і пацієнтів згадані лише в тексті, але візуальні прототипи підвищили б наочність розділу, присвяченого інтерактивній взаємодії з цифровим двійником.

Висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів; дисертаційна робота в цілому відповідає вимогам, що ставляться до досліджень цього рівня.

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.

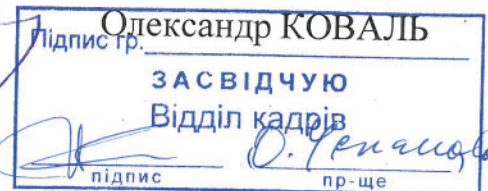
Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача 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 ступеня доктора філософії в галузі знань Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

Рецензент:

в.о. завідувача кафедри інженерії
програмного забезпечення в енергетиці
КПІ ім. Ігоря Сікорського
доктор технічних наук,
професор



« » березня 2025 року