

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя
д.т.н, професору
Пастуху Олегу Анатолійовичу

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента
Хвостівського Миколи Орестовича

на дисертаційну роботу

Біщака Дмитра Сергійовича

«Методи та програмні засоби мультимодального аналізу когнітивно-моторних
сигналів»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 12 «Інформаційні технології»
за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи та зв'язок з науковими напрямками, темами

Сучасний розвиток інформаційних технологій характеризується активним упровадженням методів математичного моделювання, цифрової обробки сигналів, інтелектуального аналізу даних та програмної інженерії у сферу біомедичних досліджень. Одним із найбільш складних і водночас перспективних напрямів є аналіз мультимодальних біосигналів, що дає змогу перейти від ізольованого вивчення окремих фізіологічних процесів до інтегрованого оцінювання функціонального стану людини на основі різнорідних джерел даних. У цьому контексті особливої актуальності набувають задачі аналізу когнітивно-моторних сигналів, зокрема при дослідженні тремору та інших моторних порушень неврологічного походження.

Актуальність дисертаційної роботи Біщака Д. С. зумовлена необхідністю розроблення методів та програмних засобів мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів для об'єктивної оцінки та класифікації моторних порушень на основі інтегрованої обробки електроенцефалографічних та графомоторних даних. У вступі дисертації переконливо показано, що традиційні підходи до оцінювання тремору часто спираються на клінічні шкали, яким притаманна міжекспертна варіативність, тоді як наявні цифрові рішення переважно орієнтовані або на моноmodalний аналіз ЕЕГ-сигналів, або на ізольоване дослідження моторних характеристик без належної формалізації часової взаємодії між когнітивними і моторними компонентами. Саме тому науково-прикладне завдання створення програмно орієнтованих методів інтегрованого аналізу таких даних та програмної архітектури їх мультимодальної обробки є своєчасним і обґрунтованим.

Важливо також, що дисертаційне дослідження безпосередньо пов'язане з науковою тематикою кафедри програмної інженерії Тернопільського

національного технічного університету імені Івана Пулюя, де послідовно розвиваються дослідження в галузі алгоритмічної обробки складних сигналів, моделювання когнітивно-моторних процесів і побудови програмних систем аналізу даних. У роботі наведено зв'язок дисертації з кафедральними дослідженнями, пов'язаними із цифровим аналізом мимовільних рухів, тремору та інтеграцією графомоторних і електроенцефалографічних сигналів. Це свідчить про системний характер дослідження та його належне місце в актуальному науковому напрямі.

Тема дисертаційної роботи повною мірою відповідає освітньо-науковій програмі «Інженерія програмного забезпечення» третього рівня вищої освіти Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Отже, тема дисертаційної роботи є безумовно актуальною, має вагомим наукове та прикладне значення, відповідає сучасним тенденціям розвитку програмної інженерії, аналізу даних та цифрових медичних технологій.

2. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно та характеризуються науковою новизною.

До результатів, що мають наукову новизну, належать:

– **вперше** розроблено архітектурний підхід до побудови програмних систем мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів, який реалізовано шляхом розділення процесів збору, синхронізації, обробки та аналізу даних у вигляді модульної програмної структури, що забезпечило відтворюваність експериментів, трасованість обчислень та масштабованість обробки даних;

– **вперше** розроблено модель взаємозв'язку між ЕЕГ-сигналами та графомоторним показником ΔR , яка базується на використанні крос-кореляційного аналізу з урахуванням часових зсувів, що дало змогу забезпечити формалізоване кількісне оцінювання когнітивно-моторної взаємодії та врахування часової узгодженості між нейрофізіологічною активністю і моторними проявами;

– **вперше** запропоновано інтегральну спектральну метрику – індекс синусоїдальності, який визначається на основі аналізу спектральних характеристик сигналу, що дало змогу кількісно оцінювати структурну організацію тремору та ступінь регулярності його осциляцій;

– **набули подальшого розвитку** методи аналізу графомоторних сигналів, які реалізовано шляхом використання спіральних траєкторій, показника радіального відхилення ΔR та частотного аналізу у поєднанні з ЕЕГ-даними, що дало змогу підвищити інформативність ознак для оцінювання моторної активності та створити основу для вдосконалення методів класифікації тремору;

– **дістали подальший розвиток** алгоритмічні та програмні засоби синхронізації, спектрального та кореляційного аналізу мультимодальних ЕЕГ- і графомоторних даних, які реалізовано у вигляді Python-фреймворку з API-інтерфейсом, що забезпечило інтеграцію аналітичних методів у єдину програмну систему та підвищило ефективність їх практичного застосування.

Таким чином, наукова новизна дисертаційної роботи є достатньо переконливою, має комплексний характер і виявляється як у розробленні нових

моделей та метрик, так і в побудові програмних засобів для їх практичної реалізації.

3. Практична цінність одержаних результатів

Практичне значення результатів дослідження полягає у створенні програмної платформи мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів, яка забезпечує синхронізований збір, обробку, аналіз і візуалізацію ЕЕГ- та графомоторних даних і може бути використана в задачах цифрової медичної діагностики, дослідницького аналізу біосигналів, а також у системах дистанційного моніторингу. У роботі показано, що розроблені алгоритмічні та програмні рішення можуть застосовуватись для об'єктивного кількісного аналізу тремору, для оцінювання змін функціонального стану в динаміці, для формалізації когнітивно-моторних взаємозв'язків і для інтеграції в телемедичні системи.

Особливу практичну цінність має те, що запропонована система реалізована не як ізольований дослідницький алгоритм, а як модульний програмний фреймворк із API-доступом до функцій аналізу та можливістю локального або хмарного розгортання. Це розширює сферу застосування результатів, оскільки дає змогу використовувати окремі аналітичні модулі як складові більших медичних інформаційних систем, а також забезпечує повторне використання розроблених компонентів у нових прикладних сценаріях. Запропонована хмарна архітектура, реалізована за cloud-native та serverless-підходами, додатково підсилює практичне значення роботи, оскільки орієнтує систему на масштабованість, контроль доступу до даних та підтримку телемедичних сценаріїв використання.

Практична цінність полягає також у тому, що результати роботи можуть бути використані розробниками медичних інформаційних систем, дослідниками в галузі аналізу біосигналів і фахівцями, які працюють над задачами виявлення та моніторингу моторних порушень. Запропонована архітектура дає змогу розширювати функціональність системи без зміни базової логіки обробки, зокрема шляхом додавання нових метрик, алгоритмів машинного навчання або нових типів сенсорів, що створює фундамент для подальшого прикладного розвитку.

4. Повнота викладення результатів дослідження у наукових публікаціях

Основні наукові результати дисертаційного дослідження Біщака Д.С. достатньо повно відображені у наукових публікаціях автора. У дисертації зазначено, що за темою роботи опубліковано 10 наукових праць, серед яких 1 стаття у виданні, що індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus, 5 статей у наукових фахових виданнях України категорії Б та 4 публікації у матеріалах міжнародних наукових конференцій. Така публікаційна активність охоплює основні етапи дослідження і свідчить про достатню апробацію результатів у науковому середовищі.

Опубліковані праці відображають ключові положення дисертаційної роботи. Це дає підстави стверджувати, що результати дисертації не лише

оприлюднені, а й логічно розгорнуті у публікаціях відповідно до структури самої роботи.

Матеріали дисертації апробовано на міжнародних наукових конференціях, де обговорювалися як алгоритмічні аспекти аналізу мультимодальних сигналів, так і питання архітектури програмної системи. Використання у роботі результатів інших авторів здійснено з належними посиланнями, що зазначено в дисертації, а наявний корпус публікацій у цілому відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Порушень принципів академічної доброчесності, зокрема фактів академічного плагіату, фабрикації або фальсифікації наукових результатів, у дисертаційній роботі не встановлено.

5. Ступінь обґрунтованості та достовірність сформульованих в дисертації наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі Біщака Д. С., є достатньо обґрунтованими та достовірними. Обґрунтованість отриманих результатів забезпечується тим, що дослідження базується на поєднанні сучасних методів цифрової обробки сигналів, частотного та кореляційного аналізу, математичного моделювання і програмної реалізації аналітичних процедур. Автор послідовно переходить від аналізу предметної області та виявлення обмежень існуючих підходів до формалізації власних моделей, побудови алгоритмів, проектування програмної архітектури й подальшої експериментальної перевірки. Така логіка дослідження є методично коректною.

Достовірність отриманих результатів підтверджується проведеною експериментальною апробацією на реальних анонімізованих записах, порівняльним аналізом функціональних станів до та після фармакологічної модуляції, дослідженням кореляційних залежностей між ЕЕГ-даними і ΔR , а також валідацією запропонованих моделей і алгоритмів. У дисертації показано, що використання крос-кореляційного аналізу та індексу синусоїдальності забезпечує підвищення точності класифікації тремору та об'єктивного моніторингу змін треморної активності. Отже, висновки роботи спираються не лише на теоретичні міркування, а й на результати практичної перевірки.

Важливо, що в роботі детально визначено мету, завдання, об'єкт, предмет дослідження і методи, що застосовувалися для досягнення поставленої мети. Наукові положення та висновки впливають із отриманих результатів, взаємоузгоджені між собою і кореспондують як зі змістом окремих розділів, так і з узагальнюючими висновками дисертації. Це дає підстави оцінити ступінь обґрунтованості основних положень як належний.

6. Оцінка змісту дисертації

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, що складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Структура роботи є логічною та відповідає поставленим у дослідженні завданням.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначено мету і завдання дослідження, об'єкт і предмет дослідження, сформульовано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, наведено дані про апробацію та публікації автора.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасних досліджень і програмних систем у галузі мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів. Автором розглянуто особливості когнітивних і моторних сигналів у задачах аналізу тремору, проаналізовано сучасні засоби реєстрації ЕЕГ і графомоторної активності, методи частотного та кореляційного аналізу, а також існуючі інформаційні технології у медичній діагностиці. На основі цього аналізу сформульовано наукове завдання дослідження. Розділ виконує важливу функцію теоретичного та прикладного обґрунтування подальших розробок.

Другий розділ присвячено математичним моделям та алгоритмічним методам аналізу мультимодальних сигналів. У ньому формалізовано показник ΔR як кількісну характеристику моторного порушення, розроблено методи крос-кореляційного аналізу між сигналами ЕЕГ і графомоторної активності, а також введено індекс синусоїдальності як нову діагностичну метрику. Саме цей розділ містить основний теоретичний внесок автора, оскільки тут запропоновано нові способи кількісного опису когнітивно-моторної взаємодії.

У **третьому розділі** представлено архітектуру програмної платформи та фреймворку мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів. Автором розроблено модульну структуру системи збору, синхронізації, обробки та візуалізації даних, реалізовану у вигляді Python-фреймворку з доступом до функцій аналізу через API та можливістю локального або хмарного розгортання. Значною перевагою цього розділу є те, що він переконливо демонструє відповідність роботи спеціальності «Інженерія програмного забезпечення», оскільки увага приділена не лише аналітичним методам, а й інженерним аспектам модульності, масштабованості, розширюваності й відтворюваності програмної системи.

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальної перевірки запропонованих методів і програмних засобів. Розглянуто методику апробації на реальних даних, порівняльний аналіз функціональних станів, валідацію моделей і алгоритмів, а також зіставлення отриманих результатів із існуючими підходами. Розділ має важливе значення, оскільки засвідчує прикладну результативність запропонованої інформаційної технології.

У **висновках** узагальнено основні результати дисертаційної роботи, сформульовано наукові та практичні положення, отримані у процесі дослідження, які логічно випливають із проведеного аналізу, розроблених моделей, алгоритмів і результатів експериментальної перевірки. Висновки є змістовними, структурованими та відображають досягнення поставленої мети і виконання завдань дослідження.

Список використаних джерел містить значну кількість сучасних наукових праць вітчизняних і зарубіжних авторів, що свідчить про ґрунтовне опрацювання предметної області. Джерельна база охоплює роботи з аналізу біомедичних сигналів, електроенцефалографії, обробки часових рядів, а також програмних

засобів і інформаційних технологій, що підтверджує міждисциплінарний характер дослідження та його відповідність сучасному рівню розвитку науки і техніки.

У додатках подано допоміжні матеріали, що доповнюють основний зміст дисертації, зокрема формати і структури вхідних даних, алгоритмічні описи обчислення показника ΔR , частотного аналізу сигналів та методів крос-кореляції, а також інші матеріали, необхідні для відтворення запропонованих методів і програмних засобів. Наявність додатків підвищує практичну цінність роботи та забезпечує кращу відтворюваність отриманих результатів.

У цілому зміст дисертації є послідовним, логічно завершеним і відповідає темі, меті та поставленим завданням дослідження.

7. Відповідність дисертаційної роботи вимогам МОН України

Дисертаційна робота виконана на належному науковому рівні, має логічну структуру та відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. За своїм змістом вона є самостійним розгорнутим дослідженням, у якому запропоновано розв'язання комплексної науково-прикладної проблеми на межі програмної інженерії, аналізу даних і цифрової медицини.

Тематика, зміст та отримані результати дослідження відповідають спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

8. Зауваження до дисертації

Поряд із загалом високим науковим рівнем виконаної дисертаційної роботи, її теоретичною обґрунтованістю та практичною спрямованістю, у роботі можна відзначити окремі положення дискусійного характеру та **рекомендаційні зауваження**:

1. Запропонована у роботі модульна архітектура програмної системи мультимодального аналізу є обґрунтованою, однак питання забезпечення її масштабованості та ефективного використання обчислювальних ресурсів розкрито недостатньо детально. Більш розгорнутий опис механізмів розподілу навантаження та обробки великих обсягів даних підвищив би інженерно-наукову обґрунтованість запропонованого рішення.

2. У роботі представлено програмний фреймворк із доступом до аналітичних функцій через API, проте питання стандартизації взаємодії між компонентами системи висвітлено обмежено. Чіткіше визначення принципів побудови інтерфейсів та форматів обміну даними сприяло б підвищенню узгодженості та розширюваності програмної системи.

3. Опис програмної реалізації зосереджений переважно на функціональних можливостях системи, тоді як аспекти забезпечення якості програмного забезпечення розглянуто недостатньо. Зокрема, доцільно було б більш детально подати підходи до тестування програмних модулів і перевірки коректності їхньої взаємодії.

4. У роботі використано мультимодальні дані (ЕЕГ-сигнали та графомоторні сигнали), однак питання організації їх зберігання, синхронізації та керування життєвим циклом даних розкрито не повністю. Більш детальне висвітлення цих аспектів підвищило б практичну цінність результатів, особливо в контексті розроблення медичних інформаційних систем.

Наведені зауваження мають рекомендаційний характер і не знижують наукової новизни та практичної цінності дисертаційної роботи.

9. Висновки:

1. Дисертаційна робота Біщак Дмитра Сергійовича на тему «Методи та програмні засоби мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, у якій розв'язано важливу науково-практичну задачу розроблення методів, алгоритмів і програмних засобів інтегрованого аналізу електроенцефалографічних та графомоторних даних для об'єктивної оцінки і класифікації моторних порушень.

2. За тематикою, змістом та науковими результатами дисертаційна робота відповідає спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» галузі знань 12 «Інформаційні технології», а також узгоджується з метою, предметною областю, фокусом, компетентностями та програмними результатами навчання освітньо-наукової програми «Інженерія програмного забезпечення» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

3. Вважаю, що дисертаційна робота «Методи та програмні засоби мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів» відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» (із змінами) та Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р., а її автор, Біщак Дмитро Сергійович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення», галузь знань 12 «Інформаційні технології».

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри біотехнічних систем
Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя



Микола Хвостівський
ст. доц.
Відомо

Микола ХВОСТИВСЬКИЙ