

ВІДГУК
ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА
на дисертаційну роботу
Буція Романа Андрійовича

на тему «*Моделювання та методи ефективного опрацювання циклічних сигналів в нейроінтерфейсних та кардіодіагностичних системах*»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань
11 «Математика та статистика» за спеціальністю 113 «Прикладна математика»

Актуальність теми дисертації. Розробка медичних систем які дозволяють здійснювати точну та достовірну діагностику є важливим та актуальним завданням. Задачі побудови таких систем вимагають, перш за все, створення математичного забезпечення. Це дозволить досягти вищої точності опрацювання діагностичних сигналів та забезпечити низьку обчислювальну складність алгоритмів їх обробки.

Відомими та загально прийнятими в медичній діагностиці є методи відбору та опрацювання таких сигналів як електроенцефалограма (ЕЕГ) та електрокардіограма (ЕКГ). Відбір та аналіз нейронних сигналів людського мозку використовується при розбудові нейроінтерфейсних системи (тобто системи мозок-комп'ютер), які дозволяють організувати взаємодію та безпосередній зв'язок між людським мозком та комп'ютерними системами, що є актуальним в наш час. Оскільки такі системи можуть бути використані для керування різними технічними об'єктами, наприклад, роботизованою рукою на виробництві, протезом, чи навіть FPV-дроном.

Проведення діагностування за зареєстрованими електрокардіосигналами (ЕКС) дозволяє лікарям вчасно виявляти, діагностувати та лікувати серцеві захворювання, наприклад, такі як: аритмії, серцева недостатність, ішемічна хвороба серця, артеріальна гіпертензія та інші. Це у свою чергу дозволяє запобігти високим ризикам раптової смерті від серцевих захворювань, які за останніми статистичними даними Всеукраїнської асоціації кардіологів України та Європейського кардіологічного товариства значно збільшились в останні роки.

Тому розробка нових методів опрацювання діагностичних сигналів на базі нових математичних моделей, які враховують змінність ритму та стохастичність досліджуваних сигналів, дозволять підвищити точність, інформативність їх опрацювання.

Оскільки дана робота стосується розбудови математичних моделей та методів ефективного опрацювання циклічних біомедичних сигналів у сучасних

неінвазивних нейроінтерфейсах, системах біометричної аутентифікації особи та системах медичної діагностики, тому дана робота є важливою та актуальною.

Представлені дослідження були виконані у рамках науково-дослідної теми “Кібер-фізичне моделювання в дослідженнях медико-біологічних процесів” (№ держреєстрації 0119U000509).

Здобувач, власноруч розробив нейроінтерфейсну систему відбору нейронних сигналів за допомогою платформи OpenBCI, яка включає вибір та адаптацію програмних та апаратних компонентів для ефективної взаємодії мозку з комп’ютером на основі опрацювання відібраних сигналів.

Наукова новизна представлених теоретичних та експериментальних результатів досліджень.

Наукова новизна результатів досліджень, перш за все, полягає у розвитку математичних моделей та методів опрацювання для задач опрацювання ЕЕГ та ЕКГ.

Основні наукові здобутки Буція Р.А., котрі відзначаються суттєвою новизною полягають у наступному:

- Розроблено та верифіковано нову математичну модель сукупності електроенцефалографічних сигналів із різних відведень, зареєстрованих в умовах багаторазового повторення ментальних керуючих впливів оператора неінвазивного нейроінтерфейсу, у вигляді вектора циклічних ритмічно пов’язаних випадкових процесів.

- Розроблено методи ритмоадаптивного статистичного аналізу ЕЕГ, що включає в себе виявлення і оцінку нових, інформативних характеристик, що реагують на ментальні керуючі впливи оператора. Це значно підвищує точність ідентифікації впливів у нейроінтерфейсних системах.

- Розроблено високоефективний ритмоадаптивний метод біометричної аутентифікації особи за її ЕКГ, на основі математичної моделі ЕКГ у вигляді циклічного випадкового процесу, за одним циклом ЕКГ.

- Обґрунтовано оптимальні (з точки зору характеристик точності та часової обчислювальної складності) вектори інформативних ознак (перших 40 спектральних коефіцієнтів розкладу статистичних оцінок початкових моментних функцій ЕЕГ та ЕКГ сигналів у ряд Фур’є) в рамках ритмоадаптивного підходу до статистичного опрацювання циклічних біомедичних сигналів, в нейроінтерфейсних системах та в системах біометричної аутентифікації особи за ЕКГ.

Наукова обґрунтованість та достовірність представлених теоретичних та експериментальних результатів досліджень.

Проведено аналіз робіт які присвячені математичним моделям та методам опрацювання циклічних сигналів. Розглянуто відомі методи теорії випадкових процесів та векторів для моделювання ЕЕГ та ЕКГ сигналів, методи математичної статистики, а саме, методи статистичного точкового та інтервального оцінювання для побудови методів опрацювання біомедичних циклічних сигналів. Методи спектрального аналізу сигналів для зменшення розмірності діагностичного простору у нейроінтерфейсних та кардіодіагностичних системах. Методи машинного навчання в задачах класифікації сигналів. Чітке формулювання завдань теоретичних та експериментальних досліджень, використання відомих підходів, математичних моделей та методів опрацювання, ґрунтовний аналіз отриманих результатів свідчать про високий рівень обґрунтованості основних наукових положень та висновків, сформульованих у дисертації Буція Р.А. Достовірність сформульованих висновків забезпечується застосуванням верифікованих математичних моделей методів обробки стохастичних сигналів ЕЕГ та ЕКГ та слушністю отриманих результатів.

Рівень виконання поставленого наукового завдання. Робота виконана на високому науковому рівні, викладення матеріалу є логічним та структурованим. Отримані висновки базуються на результатах виконаних теоретичних та експериментальних досліджень. Основні положення, результати та висновки, отримані у дисертаційній роботі висвітлені у ряді фахових публікацій, у тому числі тих які входять у наукометричні бази Web of Science Core Collection та Scopus. Результати дисертації були апробовані під час доповідей на відповідних фахових наукових конференціях.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена у дисертації нова математична модель сукупності ЕЕГ сигналів у вигляді вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів та методів статистичного опрацювання ЕЕГ сигналів удосконалюють відоме математичне забезпечення сучасних неінвазивних нейроінтерфейсів, а застосування статистичних методів опрацювання ЕКГ удосконалюють системи медичної діагностики та систем біометричної аутентифікації особи за її фізіологічними сигналами. На основі розробленого математичного забезпечення було розроблено програмне забезпечення написане мовою Python для попереднього та основного (статистичного та спектрального) ритмоадаптивного опрацювання циклічних

біомедичних сигналів, а також для проведення процедури класифікації із використанням засобів машинного навчання.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Буція Р.А. є завершеною науковою працею, отримані в дисертаційній роботі результати свідчать про наявність особистого внеску здобувача у розвиток математичних моделей та методів статистичного опрацювання циклічних сигналів.

Вона 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. Дисертація написана українською мовою, матеріал поданий послідовно, логічно та зрозуміло. Автор володіє науковою термінологією, що забезпечує легкість у сприйнятті та розумінні проведеного наукового дослідження. Стиль викладення – науково-технічний.

Дисертаційна робота Буція Романа Андрійовича складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Структура дисертації є узгодженою та послідовною. Повний обсяг дисертації становить 196 сторінок, з яких 135 сторінок основного тексту.

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 15 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 5 статей у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus, з яких 2 статті у виданнях, віднесених до першого та другого квартилів (Q1, Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank і Journal Citation Reports. Також результати дисертації були апробовані на 8 наукових фахових конференціях.

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

Відповідність роботи вимогам, що ставляться до дисертації.

Дисертаційна робота Буція Романа Андрійовича за важливістю вирішених наукових завдань, повнотою теоретичного та експериментального обґрунтування, обсягом проведених досліджень, глибиною сформульованих висновків відповідає вимогам “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 12.01.2022 р. № 44 та “Вимогам до оформлення дисертації” затвердженим Наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. При формулюванні наукової новизни доречно застосовувати так звану «формулу наукової новизни», а саме «...що було зроблено, створено, доведено, завдяки чому, і що це дало...».
2. В дисертаційній роботі було б добре зазначити впровадження у навчальний процес, вказавши кафедру та дисципліни в межах яких застосовуються отримані результати досліджень, а не тільки відобразивши це у додатку (В даному випадку додаток Б).
3. В роботі доцільно було б вживати терміни електрокардіосигнал (ЕКС) та електроенцефалосигнал (ЕЕС), тому що використані автором терміни електрокардіограма (ЕКГ) та електроенцефалограма (ЕЕГ) – мають ознаку того, що даний сигнал фіксується на паперовій стрічці за допомогою тонкого струменя чорнил. Термін графія (від грец. γράφω – пишу, креслю, малюю). А в цифрових системах здійснюється опрацювання кардіо даних чи електричних імпульсів від нейронів тому ми обробляємо електричні сигнали, оскільки автор використовує цифрові дані коректно вживати терміни ЕКС і ЕЕС.
4. В дисертаційній роботі (Таблиця 1.5, стор. 44) не повністю відображено назву математичної моделі зокрема це «Вектор лінійних періодичних у часі з різними періодами випадкових процесів».
5. На сторінці сторж. 49, дисертаційної роботи, перший абзац, повтор слів «...методів методів опрацювання...».
6. В описі математичної моделі стор. 58, не зрозуміло, як визначається область визначення процесу (вказані множини $W_{m,1}$, $W_{m,2}$). Можливо це часові інтервали, які відповідають стану пасивності та активності оператора? Оскільки ці ділянки не перетині тоді слушно було б вказати, що їх перетин дорівнює порожній множині, тобто $W_{m,1} \cap W_{m,2} = \emptyset$.

7. В роботі не зрозуміло, як враховується циклічна структура досліджуваного сигналу, оскільки не наведено де відображена циклічна структура ймовірнісних характеристик моделі (10), стор. 58?
8. Автор зазначає (декларує), що в моделі враховано: «...2) циклічну структуру ймовірнісних характеристик векторної ЕЕГ;...», проте характеристик даної моделі ще не наведено (стор. 59, дисертаційної роботи). Дане зауваження також стосується і змінності ритму, автор зазначає, що математична модель враховує: «...4) нерегулярність (змінність) ритму осциляторного процесу;...», проте в даній математичній моделі це не відображено, оскільки не наведена інформація про функцію ритму і як саме вона пов'язана з областю визначення процесу. Оскільки ритм процесу відображається у його ритмічній структурі, а отже у функції ритму.
9. В дисертаційній роботі у пункт 2.3 стор. 60 автор не зазначив, що є зонами, а що є циклами для досліджуваних процесів ЕЕГ. Автор говорить про: «... ритмічно пов'язані випадкові процеси із двома зонами на циклах...», проте що в даній роботі вибрано за сегменти-зони, а що за сегменти-цикли не зрозуміло. Це питання дуже важливе і принципове, оскільки без отримання сегментної структури (тобто відомості про часові інтервали меж циклів та зон) проведення процедури сегментації (розбиття на цикли та зони) досліджуваних сигналів ЕЕГ на сегменти-цикли чи сегменти-зони і подальшої процедури оцінювання ритмічної структури (оцінювання функції ритму) описаний математичний апарат статистичного опрацювання не можна буде застосувати.
10. В формулах (22-29) дисертаційної роботи, поданих на стор. 62-64 необхідно зазначити, що для функції ритму $T(t, n)$ при проведенні процедур статистичного опрацювання приймається $n=1$ для обрахунку статистичних оцінок математичного сподівання, дисперсії, сумісних кореляційних та коваріаційних функцій. Величина n означає кількість циклів, через які віддалені однофазні значення досліджуваного сигналу.
11. У пункті 3.5 здобувач зазначає, що на другому етапі опрацювання використовується смуговий фільтр 5-го порядку. Смуга пропускання такого фільтра становить 1-17 Гц. Автор каже: «... це дозволяє видалити всі низькочастотні та високочастотні шуми...». Не зрозуміло, в яких частотних діапазонах застосований даний режекторний фільтр усуває високі частоти шумових завад.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота «Моделювання та методи ефективного опрацювання циклічних сигналів в нейроінтерфейсних та кардіодіагностичних системах» є завершеною науковою працею у якій розв'язана важлива наукова і практична задача, що полягає у створенні математичних моделей та методів, для ефективного опрацювання циклічних біомедичних сигналів у сучасних неінвазивних нейроінтерфейсах, системах біометричної аутентифікації особи та системах медичної діагностики.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Буція Романа Андрійовича виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та має істотне значення для галузі. За науковою новизною отриманих результатів, ступенем їх обґрунтованості, актуальністю та практичною цінністю дисертаційна робота відповідає чинним вимогам до оформлення дисертації затвердженим Наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 та вимогам, що передбачені в пп. 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, а її автор Буцій Роман Андрійович заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 11 «Математика та статистика» за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних наук

Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя

Ярослав ЛИТВИНЕНКО

Підпис професора Литвиненка Я.В. засвідчую:

Перший проректор

Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя

доктор технічних наук, професор

Олег ЛЯЩУК



« 19 » 07 2024 року