

## **РЕЦЕНЗІЯ**

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

в галузі знань Математика та статистика

за спеціальністю 113 Прикладна математика.

### **Актуальність теми дисертації**

Розробка високоточних неінвазивних нейроінтерфейсів, систем медичної діагностики функціонального стану серця, а також систем біометричної аутентифікації на основі біомедичних сигналів є важливим завданням сучасної науки та інженерії. Створення ефективних інтерфейсів мозок-комп'ютер (ІМК), що забезпечують прямий зв'язок між людським мозком та комп'ютерними системами через електроенцефалографічні (ЕЕГ) та інші нейронні сигнали, стає все більш актуальним. Розвиток ІМК потребує підвищення точності та зниження обчислювальної складності алгоритмів для розпізнавання патернів і класифікації ЕЕГ сигналів, що важливо для забезпечення точності комунікації та контролю технічних систем.

Попри значний прогрес у цій галузі, існують численні невирішені питання, що потребують подальших досліджень. Серед них — розробка більш адекватних моделей та методів для розпізнавання і класифікації біомедичних сигналів, таких як ЕЕГ та ЕКГ. Сучасні методи повною мірою часто не враховують стохастичність і циклічність біосигналів, змінність їх ритму, що призводить до неточностей у функціонуванні відповідних технічних систем.

Таким чином, вирішення цих проблем підтверджує актуальність даної дисертаційної роботи, що обґрунтовує необхідність розробки адекватних математичних моделей та ефективних методів обробки циклічних біосигналів зі змінним ритмом у сферах неінвазивних нейроінтерфейсів, кардіодіагностики та систем біометричної аутентифікації.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

– Вперше розроблено та верифіковано нову математичну модель сукупності електроенцефалографічних (ЕЕГ) сигналів із різних відведень (електродів), зареєстрованих в умовах багаторазового повторення ментальних

керуючих впливів оператора неінвазивного нейроінтерфейсу, у вигляді вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів.

– Ґрунтуючись на розробленій математичній моделі сукупності ЕЕГ сигналів, зареєстрованих в умовах багаторазового повторення ментальних керуючих впливів оператора неінвазивного нейроінтерфейсу, вперше обґрунтовано методи їх ритмоадаптивного статистичного опрацювання, що дало змогу сформувати множину потенційно чутливих до ментального впливу оператора нейроінтерфейсу інформативних характеристик ЕЕГ сигналів.

– Вперше на основі математичної моделі ЕКГ у вигляді циклічного випадкового процесу розроблено високоефективний ритмоадаптивний метод біометричної аутентифікації особи за її ЕКГ.

– Вперше в рамках ритмоадаптивного підходу до статистичного опрацювання циклічних біомедичних сигналів обґрунтовано оптимальні (з точки зору характеристик точності та часової обчислювальної складності) вектори інформативних ознак в нейроінтерфейсних системах та в системах біометричної аутентифікації особи за ЕКГ.

Достовірність наукових результатів дисертації забезпечена строгим дотриманням методології дослідження та використанням сучасних аналітичних і числових методів аналізу. Застосування відомих аналітичних і експериментальних методів, таких як статистичний аналіз, теорія випадкових процесів і числове моделювання, дозволило точно обробляти та інтерпретувати біомедичні сигнали. Математичні моделі та методи були перевірені численними експериментами, що підтвердили не лише відтворюваність результатів, але й їх практичне застосування.

Обґрунтованість результатів забезпечена порівнянням отриманих даних з результатами інших дослідників та теоретичними передбаченнями, що демонструє їх відповідність фізичним закономірностям вивчених явищ. Крім того, висновки та рекомендації базуються на об'єктивному аналізі даних, який ілюструється численними таблицями, графіками і схемами, що сприяє кращому засвоєнню матеріалу та підтверджує правильність вирішення поставлених задач. Узгодженість результатів із загальноприйнятими науковими підходами та їх відповідність літературним даним підкреслюють наукову значущість та актуальність виконаних досліджень.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання, що включає компаративний аналіз відомих досягнень, розробку нової математичної моделі сукупності ЕЕГ сигналів, верифікацію методів опрацювання ЕЕГ сигналів, розробку ритмоадаптивного методу біометричної аутентифікації особи за ЕКГ, обґрунтування оптимальних векторів інформативних ознак та імплементацію розроблених моделей і методів в систему комп'ютерних програм на мові

Python, 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 Буція Р.А. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 113 Прикладна математика та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Математика та статистика.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого наукового внеску здобувача.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Буція Романа Андрійовича 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 мовою. Робота виконана якісно, із застосуванням логічних переходів та узагальнень, викладена науковим стилем грамотною українською мовою. Загальноприйняті термінологія та спеціальні терміни використані відповідно своєму значенню з необхідними поясненнями.

Дисертаційна робота Буція Романа Андрійовича складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Структура дисертації є узгодженою та послідовною, наявний причинно-наслідковий зв'язок між її елементами. Повний обсяг дисертації становить 196 сторінок, з яких 135 сторінок основного тексту.

*Вступ* дисертації визначає актуальність дослідження, встановлює зв'язок з темою, формулює мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження а також перелічує методи, які використовувалися для досягнення цілей дослідження, наукова новизна, практичне значення результатів, інформація про апробацію та публікації.

У *першому розділі* зосереджено увагу на аналізі технологій обробки біосигналів, з особливим фокусом на ЕКГ і ЕЕГ, обговорюється сучасні методи збору та аналізу даних, а також їх застосування в медичній діагностиці та біометричній аутентифікації. Далі, вивчаються властивості і виклики аналізу ЕЕГ та ЕКГ, оцінюється адекватність існуючих математичних моделей.

Розглядаються стохастичні та детерміновані методи моделювання циклічних біомедичних сигналів і їх клінічне та дослідницьке застосування.

У *другому розділі* аналізуються ключові аспекти математичного моделювання векторної ЕЕГ, акцентуючи на необхідності багатоциклових досліджень для точного виявлення ментальних впливів у нейроінтерфейсах. Розглядається методи побудови вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів для відображення векторного ЕЕГ.

У *третьому розділі* детально описано процеси обробки ЕЕГ у нейроінтерфейсах: від реєстрації до класифікації, включаючи видалення шумів і артефактів та застосування нових методів аналізу для визначення характеристик ЕЕГ. Результати аналізу демонструють високу точність класифікації ментальних впливів.

У *четвертому розділі* досліджено методи аналізу ЕКГ і СКГ сигналів, увагу сфокусовано на статистичні оцінки їх характеристик, ефективності біометричної аутентифікації і порівняльному аналізі класифікаторів.

У *висновках* викладені найбільш важливі наукові та практичні результати, одержані в дисертаційному дослідженні.

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 кuartилів (Q1, Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank і Journal Citation Reports. Також результати дисертації були апробовані на 8 наукових фахових конференціях.

Опубліковані праці та отримані в них наукові результати відповідають вимогам Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 06 березня 2019 року №167.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Вибір параметрів класифікаторів, використаних в експериментах, не був достатньо обґрунтований.

2. Не було розглянуто можливість адаптації запропонованих методів для інших типів біомедичних сигналів.



3. Відсутній детальний аналіз чутливості розроблених методів до змін вхідних даних.

4. Не було проаналізовано можливі ризики використання запропонованих методів у практичних умовах.

5. Підрозділ “3.6. Оцінювання характеристик сигналів” було б доцільно скоротити, перенісши частину рисунків у додатки.

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 Буція Романа Андрійовича на тему «Моделювання та методи ефективного опрацювання циклічних сигналів в нейроінтерфейсних та кардіодіагностичних системах» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, що має істотне значення для розвитку прикладної математики та цифрових біомедичних 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 Буцій Роман Андрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань Математика та статистика за спеціальністю 113 Прикладна математика.

### Рецензент:

Головний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ,

д.т.н., проф.

(посада, місце роботи, науковий ступінь, вчене звання)

  
(підпис)

Юрій Калюх  
(власне ім'я, прізвище)



«22» липня 2024 року

*Підписе головного наукового співробітника  
ІІІІП НАНУ, д.т.н., проф. Калюха  
Юрія Івановича завірею:  
Вікторія Кліменко  
ІІІІП НАНУ*