

## **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 в галузі знань

Математика та статистика за спеціальністю 113 Прикладна математика.

### **Актуальність теми дисертації.**

Розробка високоточних неінвазивних нейроінтерфейсів, систем медичної діагностики стану серця, а також систем біометричної аутентифікації на основі біомедичних сигналів є важливими завданнями у сучасній науці та інженерії. Даний час широко набирає актуальності створення ефективних нейроінтерфейсів, які забезпечують прямий зв'язок між людським мозком та комп'ютерними системами через електроенцефалографічні (ЕЕГ) сигнали. Вдосконалення цих систем вимагає підвищення точності та оптимізації обчислювальних алгоритмів для розпізнавання патернів ЕЕГ, що є ключовим для забезпечення ефективної комунікації та контролю.

Зважаючи на значний прогрес у цій області, існує багато невирішених проблем, таких як розробка більш точних моделей для класифікації біомедичних сигналів, включаючи ЕЕГ та ЕКГ, які мають складну динаміку. Сучасні методи часто не можуть адекватно врахувати важливі структурні аспекти цих сигналів, що призводить до помилок у роботі відповідних систем. Ритмоадаптивні методи опрацювання циклічних біомедичних сигналів можуть значно підвищити точність моніторингу здоров'я, біометричної ідентифікації та роботи нейроінтерфейсів. Вони дозволяють ефективно адаптуватися до змін у ритмі біосигналів, що є вирішальним для точності (достовірності) таких систем систем.

Ґрунтуючись на поданому вище, тема дисертаційної роботи *“Моделювання та методи ефективного опрацювання циклічних сигналів в нейроінтерфейсних та кардіодіагностичних системах”* є актуальною, оскільки спрямована на розробку нових математичних моделей та методів для точного та ефективного аналізу біомедичних сигналів у сферах нейроінтерфейсів, кардіодіагностики та біометричної аутентифікації.

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

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше розроблено та верифіковано нову математичну модель сукупності електроенцефалографічних (ЕЕГ) сигналів з різних електродів, зареєстрованих під час багаторазового повторення ментальних керуючих впливів оператора неінвазивного нейроінтерфейсу. Модель представлена у вигляді вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів, що враховує стохастичність та циклічність біомедичних сигналів.

2. Ґрунтуючись на розробленій математичній моделі, вперше розроблено методи ритмоадаптивного статистичного опрацювання ЕЕГ сигналів, що дозволяє ідентифікувати інформативні характеристики, які є чутливими до ментального впливу оператора нейроінтерфейсу.

3. Вперше запропоновано ритмоадаптивний метод біометричної аутентифікації особи за ЕКГ, заснований на математичній моделі ЕКГ у вигляді циклічного випадкового процесу. Цей метод демонструє високу ефективність, використовуючи один ЕКГ цикл для аутентифікації.

4. У рамках ритмоадаптивного підходу до статистичного опрацювання біомедичних сигналів вперше визначено оптимальні вектори інформативних ознак, що включають перші 40 спектральних коефіцієнтів розкладу статистичних оцінок моментних функцій ЕЕГ та ЕКГ в ряд Фур'є, забезпечуючи високу точність детекції ментального впливу та аутентифікації особи.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів дослідження забезпечені низкою ключових аспектів. По-перше, використання добре встановленого аналітичного та експериментального методологічного апарату, включаючи статистичний аналіз, теорію випадкових процесів та числове моделювання, дозволяє коректно опрацьовувати та інтерпретувати циклічні біомедичні сигнали. Адекватність теоретичних моделей підтверджена через порівняння з експериментальними даними, зокрема в умовах реального часу в неінвазивних нейроінтерфейсах та системах біометричної ідентифікації.

Розроблені математичні моделі та методи були верифіковані через численні експерименти, що забезпечили не тільки відтворюваність результатів, але й можливість їхнього практичного застосування. Висновки дослідження відповідають фізичній суті явищ, що досліджуються, і підкріплені порівняннями з літературними даними, що засвідчує їх наукову валідність та актуальність.

Наукова новизна виявлена у впровадженні ритмоадаптивних методів аналізу та класифікації, які дозволяють більш точно враховувати стохастичні та динамічні характеристики біомедичних сигналів, що підтверджено високою точністю класифікації. Отримані результати детально ілюстровані таблицями, графіками та схемами, що забезпечує ясність та переконливість викладених даних. Рішення, прийняті в рамках дисертації, вирішують актуальні наукові та практичні завдання, вносять значний вклад у розвиток відповідних галузей науки та техніки.

Отже, поставлене наукове завдання в дисертаційній роботі вирішено 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 внеску здобувача у науковий напрям інформаційні технології.

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 виконана українською мовою із послідовним та доступним викладенням матеріалу. Автор демонструє чіткий та зрозумілий стиль мовлення, адекватно використовує загальноприйнятту наукову термінологію, що сприяє зручності сприйняття та розуміння дисертаційного дослідження широкою аудиторією.

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.

У вступі дисертації обґрунтовано актуальність дослідження, встановлено зв'язок роботи з науковими темами, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, а також перелічено методи, які використовувалися для досягнення цілей дослідження. В роботі сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, описано особистий вклад здобувача, а також наведено відомості про апробацію та публікації результатів.

У першому розділі проаналізовано сучасні технології аналізу біосигналів, зокрема, ЕКГ і ЕЕГ, які є важливими для медичної діагностики, біометричної аутентифікації та неінвазивних нейроінтерфейсів. Обговорено покращення методів збору даних, їхній аналіз і використання для біометричної аутентифікації.

У розділі також розглядається методи і моделі для аналізу ЕЕГ та ЕКГ, обговорюється адекватність та точність математичних моделей для діагностики та аутентифікації. Розглянуто як стохастичні, так і детерміновані підходи до моделювання.

У другому розділі акцентовано увагу на властивостях векторної ЕЕГ для математичного моделювання, підкреслено необхідність множинного дослідження для виявлення ментальних впливів і використання статистичних методів для моделювання. Обговорено побудову вектора циклічних випадкових процесів і методи опрацювання ЕЕГ сигналів для точного відтворення часових інтервалів між циклами.

У третьому розділі описано ключові етапи обробки ЕЕГ сигналів у нейроінтерфейсах: реєстрацію, попереднє опрацювання, статистичний аналіз, класифікацію, фільтрацію шумів та зовнішніх артефактів. Результати аналізу демонструють високу точність класифікації ментальних керуючих впливів.

У четвертому розділі досліджено методи опрацювання ЕКГ і СКГ сигналів, акцентуючись на аналізі характеристик сигналів та їх статистичних оцінках. Обговорюється ефективність біометричної аутентифікації та порівняльний аналіз класифікаторів за їхньою ефективністю.

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**

Проведена перевірка дисертації на наявність академічного плагіату, отримані результати свідчать про високу індивідуальність роботи. У дисертації не виявлено текстових запозичень і використання наукових результатів інших науковців без посилань на відповідні джерела.

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.

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

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

1. На мою думку мету роботи слід було би сформулювати більш конкретно.
2. У розділі 2 наведено формули оцінок моментних функцій циклічного випадкового процесу, однак не описані умови їх збіжності.
3. У роботі недостатньо висвітлені питання, які відносяться до похибок оцінювання за експериментальними даними.
4. У роботі поза увагою залишились питання, що стосуються обґрунтування використання перетворень Фур'є для аналізу оцінок моментних функцій.
5. По тексту дисертаційної роботи зустрічаються граматичні і технічні помилки.

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, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що

має істотне значення для розвитку математичного моделювання та методів статистичного опрацювання циклічних сигналів. 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

Офіційний опонент,  
завідувач відділу методів та засобів  
відбору й обробки діагностичних сигналів  
Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка  
Національної академії наук України,  
доктор технічних наук, професор

Роман Юзефович

Підпис професора Романа Юзефовича  
ЗАСВІДЧУЮ  
т.в.о. ученого секретаря  
Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка  
Національної академії наук України



Михайло ЗАЛІСКО