

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу Хоми Юрія Володимировича  
**«Теорія і методи комп'ютерного опрацювання біосигналів на основі  
машинного навчання»,**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

### **Актуальність теми дисертації**

Біосигнали є носіями цінної інформації про особливості поточних фізіологічних процесів в організмі людини. Така інформація важлива не лише у царині медичних застосувань, але й у низці суміжних галузей таких як афективна інформатика (аналіз психоемоційних станів водіїв автомобілів, моніторинг уваги чи втоми операторів на об'єктах критичної інфраструктури), реабілітаційна інженерія (екзоскелети, глибока нейростимулююча терапія), гібридні біо-технічні, або біо-машинні системи (інтерфейс «мозок-комп'ютер», контроль доступу на основі біометричних маркерів тощо).

Методи досліджень електрофізіологічних процесів у організмі людини за допомогою біосигналів мають тривалу історію. Ще наприкінці XVIII століття Луїджі Гальвані відкрив тваринну електрику, а на зламі 1900-х данський фізіолог Вілем Ейнтховен сконструював та ввів у практику медичних досліджень електрокардіограф. Заслуги цього вченого перед людством належно оцінено Нобелівською премією (1924 р.).

Проте, незважаючи на тривалу історію досліджень біосигналів, більшість існуючих засобів для їх відбору, опрацювання та аналізу, зазвичай залишаються вузькоспеціалізованими, тобто орієнтованими на роботу з конкретними типом біосигналу для вирішення конкретної прикладної задачі (наприклад, сигнал електроенцефалограми для діагностування розладів ЦНС серця або сигнал електрокардіограми в задачі поліграфії).

Особливість задач опрацювання біосигналів у зазначених застосуваннях проявляється в: різноманітності та варіативності біосигналів, специфіці завад, які не типові для технічних об'єктів, низьких рівнях сигналів, великих обсягах даних, широкому колі завдань, які складно формалізувати. Як наслідок, доволі обмеженою є ефективність класичних алгоритмів цифрового опрацювання (англ. DSP – digital signal processing) сигналів. Тому актуальним завданням є дослідження можливості ширшого застосування підходів машинного навчання та нечіткої логіки в задачах опрацювання біосигналів.

Дисертаційна робота Хоми Юрія Володимировича спрямована на вирішення науково-прикладної проблеми із покращення методологічного, алгоритмічного та програмно-апаратного забезпечення комп'ютерних систем біоінформатики.

Робота підготовлена в межах держбюджетної науково-дослідницької роботи, що виконувалась за тематичними планами Міністерства освіти і

науки України: «Розроблення програмно-апаратного забезпечення для інструментального методу реабілітації хворих облітеруючим атеросклерозом судин кінцівок шляхом іп-випіт електростимуляції з урахуванням серцевого ритму» (№0120U102205, 2020 р.).

### **Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій та їх достовірність.**

Наукові положення, винесені на захист, обґрунтовані та доведені на належному науковому рівні. Мета, постановка задачі, а також наведені в кінці роботи основні її результати є логічними, віддзеркалюють отримані автором наукові результати, не суперечать відомим математичним та фізичним закономірностям.

Достовірність отриманих теоретичних та практичних результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій ґрунтується на кваліфікованому підході до постановки задач досліджень, логічно правильному обґрунтуванню прийнятих допущень при виборі математичних моделей і коректному використанні математичного апарату. Крім того, достовірність підтверджується доброю збіжністю між результатами теоретичного аналізу та результатами комп'ютерного моделювання і практичною реалізацією алгоритмів опрацювання даних за допомогою сучасних прикладних спеціалізованих програмних пакетів.

**Наукова новизна** дисертаційної роботи полягає в наступному:

1. Вперше обґрунтовано концепцію трьох системних рівнів комп'ютерного опрацювання біосигналів, особливістю якої є чітке розмежування функцій системних рівнів від методів і засобів, що використовуються для їх реалізації, що дало можливість спростити і пришвидшити процеси проектування систем комп'ютерного опрацювання біосигналів, передусім за рахунок гнучкого поєднання алгоритмів цифрового опрацювання сигналів та алгоритмів машинного інтелекту.
2. Розроблено новий метод до виявлення і коригування залишкових аномалій в біосигналах, який базується на застосуванні нейромережових автоенкодерів для нелінійної фільтрації завад, зосереджених в тій самій частині спектру, що і корисний сигнал, а його застосування у 5-7 разів зменшує похибку ідентифікації.
3. Удосконалено метод програмного кондиціонування сигналів ЕКГ/ЕЕГ, який передбачає уніфікацію параметрів цифрових записів цих сигналів шляхом передискретизації, унормування за рівнем і тривалістю, а його застосування незалежне від нейромережовий класифікатор від параметрів біосенсорів і апаратури відбору біосигналів.
4. Вперше запропоновано і використано підхід нейромережового еквалайзера для коригування динамічних похибок вимірювального каналу аналізатора біоімпедансу, що дало змогу на три порядки

розширити смугу робочих частот і дещо покращити точність порівняно із формальним методом алгоритмічного коригування.

5. Удосконалено структуру вимірювального реографічного каналу завдяки принципу компенсації базового біоімпедансу за допомогою кодокерованого тримера, що входить до модифікованої схеми джерела струму Хауленда, а також використання сформованих на засадах прямого цифрового синтезу ортогональних зондувальних сигналів, що дає змогу вдвічі підвищити швидкодію.

**Практична цінність** дисертаційної роботи полягає в тому, що запропоновано декілька варіантів архітектури обчислювальних засобів для задач опрацювання біосигналів, в основі яких лежать принципи раціонального розподілу комп'ютерних ресурсів залежно від умов застосування (хмарна, стаціонарна чи портативна реалізація), зокрема з урахуванням можливостей паралельного використання різних категорій обчислювальних засобів: графічних, сигнальних та універсальних процесорів (GPU), а також програмованих логічних матриць (FPGA) та спеціалізованих мікросхем. Крім того, в додатках роботи наведено вихідні програмні пакети для дослідження, аналізу та інтелектуального опрацювання різних видів біосигналів (електроенцефалограма, електрокардіограма, віброартрограма), які викладені у відкритому доступі через платформу GitHub.

### Структура та обсяг дисертації

Текст дисертаційної роботи складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, додатків, списку використаних джерел та має 282 сторінки основного тексту, 96 рисунків, 25 таблиць, 22 сторінки додатків. Список використаних джерел містить 352 найменування.

Структура дисертації підпорядкована розв'язанню поставлених завдань, а її розділи логічно між собою пов'язані.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дисертаційних досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про їхню апробацію та особистий внесок автора.

У **першому** розділі показано роль і місце комп'ютерного опрацювання біосигналів у галузі біоінформатики, а також поширені застосування поза медичною діагностикою. На основі аналізу актуального стану проблеми сформульовано мету і завдання дисертаційних досліджень спрямованих на пошук ефективних підходів до побудови комп'ютерних біоінформатичних систем. Обґрунтовано доцільність та перспективність застосування методів машинного навчання для підвищення точності та достовірності результатів інтелектуального аналізу біосигналів, націлених на розв'язання різних завдань біоінформатики.

**Другий** розділ присвячено розвитку методів комп'ютерного опрацювання біосигналів, що базується на комплексному використанні штучних нейронних мереж і технологій глибокого навчання у поєднанні із методами цифрового опрацювання сигналів, що дало можливість розширити функціональні можливості і покращити характеристики комп'ютерних систем для ефективного вирішення різнопланових завдань у галузі біоінформатики. Також автором запропоновано, а в подальших розділах апробовано, концепцію трьох системних рівнів комп'ютерного опрацювання біосигналів. За цією концепцією розмежовано функції системних рівнів від методів і засобів, що застосовуються для реалізації цих функцій. Таке розділення сприяє структуризації знань у предметній галузі, уможливорює зіставлення і оцінювання ефективності різних методів, а також вибір кращих рішень на етапі проектування біоінформатичних систем під конкретні завдання із урахуванням умов і сценаріїв їх використання. Обґрунтовано вибір архітектури обчислювальних засобів за використання машинного навчання для різних задач біоінформатики і сценаріїв їх розгортання.

У **третьому** розділі проведено дослідження підходів щодо підвищення точності та обчислювальної ефективності методів і засобів первинного опрацювання біосигналів. Проаналізовано особливості вимірювання біоімпедансу в методі імпедансної плетизмографії (медична діагностика), при визначенні процентного вмісту жирових клітин, міжклітинної та внутрішньоклітинної рідини (клінічний моніторинг), при контролі електродермальної активності в каналі поліграфа (афективна інформатика). Розроблено методи, спрямовані на мінімізацію та уніфікацію аналогової частини вимірювального каналу, а також підвищення обчислювальної ефективності спеціалізованих алгоритмів цифрового оброблення сигналів.

**Четвертий** розділ автор присвятив дослідженню активних біосигналів електричного походження на прикладі ЕЕГ та ЕКГ, зокрема в задачах біометричної аутентифікації та ідентифікації та інтерфейсів віддаленого управління. Основними результатами розділу є розроблення і апробація алгоритмів коригування промахів і спотворень в біосигналах на основі глибоких нейромережових автоенкодерів, а також застосування трьохтактового підходу для оптимізації процедури підбору архітектури і гіперпараметрів штучних нейронних мереж в рамках процедури глибокого навчання.

**П'ятий** розділ автор присвятив удосконаленню методу інтелектуального опрацювання сигналів віброарthroграфії, відмінною особливістю якого є застосування дескрипторів, одержаних статистичними методами на вибраних рівнях хвилькової декомпозиції ВАГ-сигналу. Поєднання формального методу хвилькового перетворення із нечіткими моделями машинного навчання дало змогу побудувати систему підтримки прийняття рішень у діагностиці ступеню дизфункції суглобів із достатніми для потреб практики точністю і чутливістю. Крім того, додатково розглянуто можливість застосування запропонованих в роботі підходів до даних принципово іншої

природи - EMR/ENR записів, що, на відміну від сигналів, являють собою не числові ряди, а послідовність категоріальних величин.

У шостому розділі наведено результати досліджень, які стосуються поєднання технологій цифрового опрацювання сигналів і машинного навчання у задачах біоінформатики, що базуються на вимірюваннях біоімпеданса. Представлено інноваційний підхід до побудови портативного аналізатора біоімпедансу, що базується на застосуванні нейромережевого еквалайзера для коригування спотворень зумовлених інерційністю елементів вимірювального каналу. Досліджено ефективність нейромережевого еквалайзера на прикладі реєстрації діаграм Коула. Також розроблено удосконалену структуру портативного реографічного модуля, придатного до застосування не лише для медичної діагностики, але і у задачах афективної інформатики. Інноваційність підходу полягає у застосуванні принципу компенсації базового біоімпедансу за допомогою кодированого потенціометра (тримера), що входить до модифікованої схеми джерела струму Хавленда, а також використанні сформованих на засадах прямого цифрового синтезу ортогональних зондувальних сигналів, що дає змогу вдвічі підвищити швидкодію.

У додатках містяться програмні коди, написані на мовах програмування Matlab та Python3, які призначені для дослідження, аналізу та інтелектуального опрацювання різних видів біосигналів (електроенцефалограма, електрокардіограма, віброартрограма) та 3 акти про впровадження результатів дисертаційної роботи.

### **Повнота викладу змісту дисертації в опублікованих працях.**

Дисертантом за матеріалами роботи опубліковано у фахових виданнях 32 наукові праці, зокрема 22 статті в наукових періодичних виданнях, в тому числі 7 статей у виданнях, що індексовані у наукометричних базах Scopus та Web of Science.

Автореферат адекватно відображає зміст дисертаційної роботи.

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

1. Мета роботи написана узагальнено і тому не корелюється з назвою дисертації.
2. Серед задач, які необхідно вирішити в процесі виконання роботи, не згадуються дослідження, пов'язані з теорією та методами оброблення біосигналів.
3. Робота повинна бути виконана не лише в рамках однієї НДР роботи кафедри.
4. Використання методів машинного навчання вже давно застосовуються для опрацювання сигналів, в тому числі біосигналів. Тому в роботі

необхідно було б більш чітко обґрунтувати, в чому полягає розроблення теорії.

5. В літературі існують різні моделі оптимізації багат шарового нейрокласифікатора (пошук по ґратці, випадковий пошук, баєсівська оптимізація, градієнтна та інші). Необхідно було б привести порівняльні оцінки та показати переваги та за рахунок чого вони досягнуті у запропонованому в роботі підході.
6. В розділі практичних значень, які були одержані в процесі виконання роботи, необхідно було б навести кількісні оцінки, які б свідчили про перевагу запропонованої методології оцінювання ефективності комп'ютерних систем біометричної ідентифікації.
7. В меті роботи говориться про створення науково обґрунтованої методології покращення характеристик біометричних систем, проте, ні в науковій новизні, ні в практичних значеннях роботи не показано, наскільки ефективніше відбувається застосування біометричних систем.
8. Не зрозуміло, для яких співвідношень сигнал/завада та за рахунок чого вдалося зменшити похибку ідентифікації в 5-7 разів.
9. Відомо, що при аналізі ЕКГ-сигналів важливого значення набуває усунення впливу на вимірювання різного роду артефактів, наприклад високочастотних наводок. Яким чином усувається при опрацюванні таких сигналів вплив артефактів.
10. У висновках, які одержані в процесі написання дисертації, не приведені організації, де впроваджена робота.
11. Не зрозуміло, чому в роботі при такій кількості практичних рішень відсутні патенти, які б підтверджували новизну розроблених методів, наприклад при реалізації цифрового фазоквадратурного перетворювача сигналів імпедансної спектроскопії.
12. В роботі зустрічається велика кількість слів і термінів, які не належать до загальноприйнятої літературної норми, в першу чергу русизми та анґліцизми.

## Висновки

Дисертаційна робота Хоми Юрія Володимировича «Теорія і методи комп'ютерного опрацювання біосигналів на основі машинного навчання» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати в області комп'ютерного опрацювання біосигналів, що в сукупності забезпечують розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми у галузі інструментального забезпечення біомедичної інформатики – створення наукових засад для удосконалення методологічної, алгоритмічної і програмно-технічної бази комп'ютерних систем опрацювання біосигналів.

Зміст роботи свідчить про високий рівень кваліфікації автора, його

наукову зрілість та самостійність. Відзначені недоліки і зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку та вагомість наукових результатів, одержаних в ході дисертаційних досліджень.

Дисертаційна робота Хоми Ю.В. за актуальністю теми, науковим рівнем і цінністю отриманих наукових і практичних результатів задовольняє встановленим вимогам, що ставляться до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567, а її автор Хома Ю.В. заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Офіційний опонент:

завідувач відділу інформаційних  
технологій дистанційного зондування,  
Фізико-механічного інституту  
ім. Г.В. Карпенка НАН України  
д.т.н., проф.

Підпис д.т.н., проф. Русина В.П. засвідчую  
учений секретар ФМІ НАН України  
к.т.н., ст.н.с.



Русин Б.П.

Корній В.В.