

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **ХОМИ Юрія Володимировича** на тему: «**Теорія і методи комп'ютерного опрацювання біосигналів на основі машинного навчання**», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

### **Актуальність теми дисертаційної роботи**

Вимірювання і опрацювання біосигналів дозволяє отримати цінну інформацію про перебіг фізіологічних та психоемоційних процесів, що протікають в живому організмі, тому є актуальними не лише в медичній діагностиці, алей у таких прикладних застосуваннях як цілодобовий клінічний моніторинг, біометрична ідентифікація та автентифікація, афективна інформатика, нейрональна реабілітація і нейро-ергономічне керування технічними об'єктами, тощо.

Біосигнали порівняно із сигналами, які походять від технічних об'єктів, характеризуються низкою особливостей, зокрема і таких, що істотно ускладнюють процес їх аналізування та опрацювання. Передовсім це природна мінливість та низькі рівні біосигналів. Саме ці чинники знижують ефективність традиційних методів цифрового опрацювання сигналів, які спираються на формальні алгоритми. Тому перспективним є застосування до опрацювання біосигналів технологій машинного навчання, в основі яких лежать нечіткі моделі і алгоритми.

Різномірність біосигналів, з одного боку, і різноплановість цілей, з іншого, позначилися на виробленні спеціалізованих рішень щодо програмно-апаратного забезпечення. Це ускладнює обмін знаннями між спеціалістами різних напрямів і перенесення методик з однієї підгалузі в іншу, а відтак стримує розвиток біоінформатики. Тому актуальним є створення цілісної науково обґрунтованої методології застосування машинного навчання для опрацювання та інтелектуального аналізування біосигналів на різних системних рівнях, націлених на ефективне вирішення різнопланових завдань у сфері біоінформатики. Це стане підґрунтям до розширення функціональних можливостей і покращення характеристик комп'ютерних біоінформативних систем. Вирішенню цієї науково-прикладної проблеми і присвячена дисертаційна робота Хоми Ю. В.

**Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність.** Подана дисертаційна робота складається із анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 352 найменувань та 5 додатків. Зміст роботи викладено на 282 сторінках основного тексту, містить 96 рисунків, 25 таблиць та 22 сторінки додатків.

Зміст дисертаційної роботи, стиль та мова викладення, якість ілюстрацій відповідають вимогам МОН України до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

В анотації наведено узагальнений короткий виклад основного змісту дисертації, основні результати дослідження із зазначенням наукової новизни та практичного значення. Наводиться список публікацій здобувача темою за представленої роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами та темами, відмічено наукову новизну та практичну цінність отриманих у роботі результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, публікації, апробацію результатів роботи, обсяг і структуру дисертації.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану та напрямів розвитку комп'ютерних систем аналізу і опрацювання біомедичних даних, запропоновано нову класифікацію біосигналів в залежності від способу їх утворення, а також обґрунтовано можливості застосування штучного інтелекту та методів машинного навчання до завдань біоінформатики.

На основі аналізу застосування сучасних інтелектуальних систем опрацювання біомедичної інформації показано, що наразі відсутня цілісна науково-обґрунтована методологія застосування машинного навчання для комп'ютерного опрацювання біосигналів на різних системних рівнях, націлених на ефективне вирішення різнопланових завдань. Це дозволило авторові сформулювати науково-прикладну проблему дисертаційного дослідження, мету та завдання дослідження, пов'язані з розробленням нових і вдосконалення відомих підходів й методів підвищення точності та обчислювальної ефективності програмно-апаратних засобів комп'ютерного опрацювання біосигналів і даних на основі поєднання методів цифрового опрацювання сигналів і технологій машинного навчання.

У другому розділі описано запропоновану автором концепцію побудови комп'ютерних біоінформатичних систем з покращеними характеристиками. За цією концепцією виділено три системні рівні та два міжсистемні інтерфейси у ланцюгу опрацювання біосигналів, що дозволило уніфікувати процес проектування і розроблення систем та забезпечило додаткову гнучкість при переналаштуванні під конкретний вид вхідного сигналу чи кінцеву задачу. Обґрунтовано застосування глибинного навчання і штучних нейронних мереж в системах комп'ютерного опрацювання біосигналів, зокрема, обґрунтовано доцільність використання алгоритмів штучного інтелекту на всіх рівнях системи починаючи з відбору і кондиціонування сигналів і завершуючи автоматизацією прийняття рішень. В розділі також обґрунтовано методологію подальших досліджень, зокрема вибір критеріїв і метрики оцінювання точності та ефективності комп'ютерних систем опрацювання біосигналів.

У третьому розділі розглянуто питання покращення характеристик і уніфікація засобів збору та первинного опрацювання біосигналів різної природи. Представлено модифікацію перетворювача імпеданс-напруга для потреб імпедансної плетизмографії на основі генератора струму Хауленда, суть якої полягає в компенсації базового імпедансу за допомогою кодированого тримера. Розроблено та досліджено нову структуру високочутливого перетворювача малих відхилень біоімпедансу для контролю електродермальної активності, які можуть застосовуватися в системах розпізнавання емоцій. Також запропоновано новий обчислювально ефективний метод синхронного детектування, що забезпечило збільшення швидкодії і чутливості біоінформативних систем за збереження високого рівня завадостійкості.

Четвертий розділ присвячено розробленню нейромережових систем коригування аномалій та розпізнавання образів в ЕКГ- та БЕГ- сигналах з використанням підходів глибинного навчання. Запропоновано метод автоматичного підбору гіперпараметрів алгоритмів навчання штучних нейронних мереж, який заснований на поєднанні методу Монте-Карло і алгоритмів прогностичного моделювання на основі дерев рішень.

У п'ятому розділі наведено результати застосування технологій машинного навчання у сфері охорони здоров'я. Розроблено систему підтримки прийняття рішення медичної діагностики стану і ступеня дисфункції колінного суглоба на основі інтелектуального аналізу сигналів віброартрографії. Ефективність системи верифіковано на реальних даних у варіантах дво- та п'ятикласового розпізнавання. Крім того, застосовано методи машинного навчання для аналізу даних з електронних медичних реєстрів (EMR-даних) з метою прогнозування ефективності терапії для онкохворих пацієнтів.

У шостому розділі розглянуто питання застосування технологій цифрового опрацювання сигналів і машинного навчання у завданнях біоінформатики, що базуються на вимірюваннях біоімпеданса. Зокрема запропоновано новий підхід до коригування частотних похибок малогабаритного аналізатора біоімпедансу, що базується на застосуванні нейромережового еквалайзера. Це забезпечило розширення діапазону робочих частот на кілька порядків, що важливо для методів, які базуються на спектральному аналізі біоімпедансу.

У висновках сформульовано основні наукові та практичні результати.

У додатках до дисертаційної роботи наведено відомості щодо впровадження результатів роботи, дані, що додатково ілюструють результати проведених досліджень, зокрема, опис програмного забезпечення біоінформативних систем та коди програм для математичного моделювання ключових структурних елементів, а також список публікацій здобувача за темою дисертації.

В цілому, дисертація Хоми Ю.В. є завершеною науковою працею, що містить висунуті здобувачем науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, характеризується єдністю змісту і свідчить про особистий внесок здобувача в науку. Висновки у розділах, а також загальні висновки відповідають отриманим у дисертації науковим і практичним результатам.

Дисертація й автореферат цілком відповідають паспорту спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. Зміст автореферату й основних положень дисертації ідентичні. Практична частина роботи представлена відповідними актами впровадження.

#### **Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації.**

Подана дисертаційна робота визначається науковою новизною, яка полягає в тому, що в ній:

– отримала подальший розвиток теорія комп'ютерного опрацювання біомедичної інформації в частині використання штучних нейронних мереж і технологій глибокого навчання у поєднанні із методами цифрового опрацювання

сигналів. Це відкриває шлях до розширення функціональних можливостей і покращення характеристик комп'ютерних систем для ефективного вирішення різнопланових завдань у сфері біоінформатики;

– вперше представлено концепцію поділу ланцюга комп'ютерного опрацювання біосигналів на три системні рівні, що уможлиблює розмежування функцій системних рівнів від методів і засобів, які застосовуються для реалізації цих функцій, та відкриває нові можливості гнучкого проектування біоінформативних систем під конкретні завдання із урахуванням умов і сценаріїв їх використання;

– вперше запропоновано метод пошуку оптимальних значень гіперпараметрів багатопараметричного нейрокласифікатора біосигналів та архітектури глибоких штучних нейронних мереж за рахунок навчання обчислювально ефективною прогностичною моделлю другого рівня з використанням методу Монте-Карло;

– вперше запропоновано і апробовано підхід до виявлення та коригування залишкових аномалій в біосигналах, який базується на застосуванні нейромережових автоенкодерів для нелінійної фільтрації завад, зосереджених в тій самій частині спектру, що й корисний сигнал. Його застосування дозволило зменшити похибку ідентифікації у кілька разів;

– удосконалено метод інтелектуального опрацювання сигналів віброартрографії шляхом виділення діагностичних ознак, одержаних статистичними методами на вибраних рівнях вейвлет-декомпозиції біосигналу. Такий підхід сприяє підвищенню точності та чутливості класифікатора системи медичної діагностики за малого обсягу даних.

**Практичне значення результатів дисертаційної роботи** полягає в тому, що:

1. Розроблено комплексний підхід для проектування комп'ютерних систем опрацювання біосигналів, який дає змогу спростити і прискорити процеси їх проектування, розробки, верифікації та введення в експлуатацію, забезпечуючи при цьому ефективну імплементацію на різних обчислювальних платформах залежно від специфіки і складності кінцевої задачі.

2. Розроблено нову обчислювально ефективну схему синхронного детектування, лише на основі цифрового акумулятора, без необхідності перемноження вимірювального і ортогонального сигналів, що забезпечило зростання швидкодії і чутливості при збереженні високого рівня завадостійкості.

3. Обґрунтовано методологію оцінювання ефективності комп'ютерних систем біометричної ідентифікації, яка враховує природу біосигналів та особливості технології машинного навчання, а її застосування дає змогу дослідити надійність біометричних маркерів, а також провести порівняльний аналіз відомих і розроблених методів ідентифікації.

4. Розроблено програмні пакети для дослідження, аналізу та інтелектуального опрацювання біосигналів (ЕЕГ, ЕКГ, ВАГ) у різних прикладних застосуваннях, таких як бінарна та багатокатегоріальна класифікація (біометрична ідентифікація та аутентифікація) чи регресійний аналіз (діагностична оцінка ступеня остеоартрозу колінного суглоба).

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** забезпечено використанням фундаментальних законів класичної

теорії вимірювань і системного аналізу та сучасних програмних продуктів, комплексним характером досліджень, узгодженістю отриманих результатів із даними інших авторів (де це порівняння можливе), обговоренням висунутих наукових положень та зроблених висновків на багатьох міжнародних та національних науково-технічних конференціях, численними експериментами. Отримані експериментальні результати знаходяться в задовільній якісній та кількісній відповідності до висунутих теоретичних положень.

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

Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлено у 34 наукових публікаціях, серед яких 15 статей у фахових наукових виданнях України, 7 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, які включено до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, а також 12 публікацій у збірниках матеріалів і праць міжнародних науково-технічних конференцій.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації доповідались й обговорювались на 13 міжнародних, всеукраїнських та регіональних конференціях і семінарах.

#### **Зауваження до дисертаційної роботи:**

1. Пункти 8 та 10 наукової новизни в поданому контексті в більшій мірі стосуються практичних результатів роботи.

2. У першому розділі проаналізовано різні види біосигналів, але деякі з них, наприклад, сигнали електроміографії, фотоплетизмографії у наступних розділах не розглядаються. На думку опонента, варто було б також доповнити аналіз сучасного стану біоінформатики та медичної діагностики прикладами конкретних комп'ютерних систем, що наразі випускаються провідними світовими виробниками.

3. У другому розділі п. 2.6, де проведено огляд існуючих інструментів розробки алгоритмів глибинного навчання, відсутні конкретні висновки, які саме програмно-апаратні рішення доцільно використати для виконання поставлених у роботі завдань. У п. 2.7 представлено лише метрики точності, а доцільно теж подати показники оцінювання обчислювальної ефективності запропонованих рішень.

4. На сторінці 130 дисертації, що стосується методології дослідження, зазначено, що «...третій розділ присвячено найнижчому інструментальному рівню, насамперед уніфікації аналогової частини вимірювального каналу, де відбувається відбір, первинне перетворення, кондиціонування та аналого-цифрове перетворення сигналів, що належать до трьох різних груп...», однак у третьому розділі відсутній аналіз вимірювальних каналів біосигналів неелектричної природи, які за запропованою автором класифікацією належать до другої групи.

5. Четвертий розділ присвячено аналізу ЕЕГ- та ЕКГ-сигналів, які широко використовуються в медичній діагностиці. Проте у роботі проаналізовано застосування згаданих сигналів лише у задачах біометричної ідентифікації та нейро-комп'ютерного управління, що потенційно звужує практичний ефект від одержаних результатів. Бажано було б продемонструвати на конкретних даних можливість переналаштування нейромережевого класифікатора (наприклад, на

основі сигналу ЕКГ) із завдання медичної діагностики на біометричну ідентифікацію.

6. Чому для комп'ютерного опрацювання сигналів віброартрографії (п'ятий розділ) не застосовано процедуру автоматичного підбору гіперпараметрів для системи машинного навчання? Видається, що це можна зробити на етапі вибору дескрипторів, збудованих із компонентів вейвлет-декомпозиції ВАГ-сигналу. Крім того, у розділі 5 розглянуто питання машинного навчання для інтелектуального аналізу біомедичної інформації, представленої в табличному і текстовому вигляді, що прямо не стосується опрацювання біосигналів, які є темою дисертаційної роботи.

7. У шостому розділі метод нейромережевої корекції похибок застосовано до автокомпенсаційної схеми, хоча враховуючи результати розділу 3, доцільніше було б апробувати цей підхід на перетворювачі імпедансу на основі генератора струму Хауленда. Також не використано машинне навчання до аналізу біоімпедансу на верхньому системному рівні.

#### **Загальні висновки**

Наведені зауваження та побажання жодним чином не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи Хоми Ю.В., яка є завершеним науковим дослідженням, що містить отримані особисто здобувачем нові наукові результати, направлені на вирішення важливої науково-прикладної проблеми розроблення нових та вдосконалення відомих підходів і методів підвищення точності й обчислювальної ефективності програмно-апаратних засобів комп'ютерного опрацювання біосигналів і даних на основі поєднання методів цифрового опрацювання сигналів і технологій машинного навчання.

Сформульовані у дисертації наукові положення, висновки та рекомендації повністю відображені у наукових статтях, опублікованих у фахових виданнях, та доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях.

Дисертаційна робота Хоми Ю.В. відповідає паспортів спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, а також профілеві спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08.

На підставі проведеного аналізу дисертаційної роботи **«Теорія і методи комп'ютерного опрацювання біосигналів на основі машинного навчання»** можна зробити висновок про те, що за актуальністю вирішеної науково-прикладної проблеми, отриманими науковими результатами і практичною цінністю роботи, вона відповідає пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р. за № 567 з відповідними змінами, а її автор, **ХОМА Юрій Володимирович**, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Офіційний опонент:

заступник директора з наукової роботи  
Інституту технічної теплофізики НАН України,  
член-кореспондент НАН України,  
доктор технічних наук, професор



В.П. Бабак

Підпис гр. *В.П. Бабак*

**ЗАВІРЯЮ**  
" *02* " *02* 20*14* р.  
Зав. канцелярією *Лого*