

**Голові спеціалізованої вченої ради
ДФ 20 051.178
Карпатського національного
університету
імені Василя Стефаника
доктору фізико-математичних наук,
професору Володимиру
Коцюбинському
(76018, м. Івано-Франківськ,
вул. Шевченка, 57)**

РЕЦЕНЗІЯ

**доктора фізико-математичних наук, професора,
професора кафедри прикладної фізики і матеріалознавства
Карпатського національного університету імені Василя Стефаника
Рачія Богдана Івановича**

**на дисертаційну роботу Приймака Тараса Володимировича
«Трансформація імпедансних спектрів біологічних тканин під впливом
деструктивних факторів», подану на здобуття ступеня доктора філософії в
галузі знань 10 Природничі науки
за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали**

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю розвитку сучасних неінвазивних та високочутливих методів діагностики структурно-функціонального стану біологічних тканин. У контексті стрімкого розвитку медичної фізики, біоелектроніки та нанотехнологій особливої ваги набувають підходи, що дозволяють виявляти ранні стадії деструктивних змін у тканинах, зокрема під впливом температурних, механічних та хімічних чинників.

Важливість дослідження визначається також потребами практичної медицини, зокрема трансплантології, онкології та діагностики, де критичною є оцінка життєздатності тканин, виявлення початкових ознак некротичних процесів та контроль за їх перебігом у реальному часі. Як показано в роботі, застосування імпедансної спектроскопії відкриває можливості для отримання інформативних параметрів, пов'язаних із морфологічною та функціональною організацією тканин, що суттєво розширює інструментарій сучасних діагностичних методів.

Окремої уваги заслуговує проблема відсутності уніфікованих підходів до інтерпретації імпедансних спектрів біологічних об'єктів. Саме тому дослідження, спрямовані на встановлення зв'язку між електрофізичними

параметрами та структурними змінами тканин, є надзвичайно актуальними як з фундаментальної, так і з прикладної точок зору.

Таким чином, тема дисертації є своєчасною та обґрунтованою, відповідає сучасним тенденціям розвитку прикладної фізики та біомедичних досліджень і має важливе значення для подальшого вдосконалення методів діагностики та моніторингу стану біологічних систем.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі отримано низку нових наукових результатів, які розширюють уявлення про електрофізичні властивості біологічних тканин та їх трансформацію під впливом деструктивних чинників.

Уперше встановлено закономірності трансформації імпедансних спектрів біологічних тканин різної морфології залежно від температури, тривалості впливу та умов експерименту, що проявляються у зміні структури електричних еквівалентних схем, зокрема у втраті окремих елементів при досягненні критичних станів деградації. Науково обґрунтовано та запропоновано багатоелементні електричні еквівалентні схеми для опису інтактних і пошкоджених біологічних тканин різних органів, а також встановлено їх зв'язок із морфологічною та функціональною організацією тканин. Показано, що параметри активного опору та елементів із постійною фазою є чутливими індикаторами структурних змін.

Встановлено температурно-часові закономірності зміни комплексного опору біологічних тканин, що супроводжуються зменшенням опору та ємнісних характеристик, зростанням тангенса кута втрат і перебудовою частотної дисперсії, що пов'язано з порушенням цілісності клітинних мембран. Подальшого розвитку набув підхід до аналізу частотної дисперсії електричних параметрів тканин шляхом використання першої та другої похідних провідності, що дозволило виявити стабільні частотні екстремуми як маркери структурної організації та ступеня пошкодження тканини.

Встановлено вплив геометричних параметрів зразків на характеристики імпедансних спектрів та параметри еквівалентних схем, що підтверджує роль просторової організації тканин у формуванні їх електрофізичних властивостей. Також виявлено вплив режимів вимірювання на стан досліджуваних об'єктів, зокрема показано можливість індукованих змін у мембранних структурах при повторних або тривалих вимірюваннях, що є важливим для розроблення коректних експериментальних протоколів.

Отримані результати формують наукове підґрунтя для створення нових підходів до структурно-чутливої діагностики біологічних тканин на основі імпедансної спектроскопії.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення дисертаційної роботи полягає у розробленні та експериментальному обґрунтуванні підходів до структурно-чутливого аналізу біологічних тканин на основі методу імпедансної спектроскопії, що дозволяє оцінювати ступінь їх пошкодження за електрофізичними параметрами. Запропоновано та апробовано методику отримання імпедансних спектрів біологічних тканин в лабораторних умовах, яка забезпечує високу відтворюваність результатів і може бути використана у подальших експериментальних та прикладних дослідженнях. Розроблені конструкції вимірювальних комірок і обґрунтовані геометричні

параметри зразків сприяють підвищенню точності та коректності інтерпретації результатів.

Практичну цінність мають запропоновані електричні еквівалентні схеми інтактних і пошкоджених тканин, які можуть бути використані для кількісної оцінки їх структурно-функціонального стану та впроваджені у системи обробки експериментальних даних. Встановлені частотні та параметричні маркери (зокрема екстремуми дисперсійних залежностей) можуть застосовуватися для ранньої діагностики деструктивних змін у біологічних тканинах, що є перспективним для використання у медичній діагностиці, біомедичних дослідженнях та контролі якості біологічних матеріалів.

Отримані результати щодо впливу температури, тривалості експозиції, геометричних характеристик зразків і режимів вимірювання можуть бути використані при розробленні стандартів та протоколів проведення імпедансних досліджень біологічних об'єктів.

Таким чином, результати роботи мають вагомим прикладне значення та можуть бути використані при створенні нових діагностичних і моніторингових систем на основі імпедансної спектроскопії, а також у науково-дослідній практиці в галузі прикладної фізики та біомедицини.

Відповідність дисертації профілю спеціалізованої вченої ради. За результатами перевірки дисертаційної роботи та опублікованих матеріалів не виявлено ознак академічного плагіату чи фальсифікації результатів. За своїм змістом дисертація Приймака Тараса Володимировича на тему «Трансформація імпедансних спектрів біологічних тканин під впливом деструктивних факторів», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії, повністю відповідає вимогам за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Аналіз змісту дисертації

Дисертаційна робота складається із вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та додатку.

У першому розділі дисертації здійснено ґрунтовний аналіз сучасного стану досліджень у галузі вивчення процесів руйнування біологічних тканин та їх електрофізичних властивостей. Розглянуто морфологічні особливості деструктивних процесів, їх стадійність і механізми, а також визначено основні клітинні структури, що зазнають змін. Значну увагу приділено електричним властивостям біологічних тканин, механізмам перенесення заряду та методам їх дослідження. Окремо проаналізовано можливості імпедансної спектроскопії як інструменту для вивчення як інтактних, так і пошкоджених тканин, визначено її переваги та обмеження. Розділ має оглядовий характер і створює теоретичне підґрунтя для подальших досліджень.

У другому розділі викладено фізичні основи та методичні аспекти проведення імпедансної спектроскопії біологічних тканин. Детально описано сутність методу, зокрема поняття комплексного імпедансу та фізичний зміст його параметрів. Розглянуто підходи до інтерпретації експериментальних даних, включаючи діаграми Найквіста та електричні еквівалентні схеми. Значну увагу приділено методиці експерименту: умовам підготовки зразків, вибору частотного діапазону, конструкції вимірювальних комірок та забезпеченню відтворюваності результатів. Розділ є методично виваженим і забезпечує належний рівень обґрунтування експериментальної частини роботи.

Третій розділ є основним за змістом і присвячений викладенню результатів власних експериментальних досліджень автора. У ньому представлено результати імпедансної спектроскопії біологічних тканин різних органів як у інтактному стані, так і після дії деструктивних факторів. Проведено аналіз імпедансних спектрів, побудовано відповідні електричні еквівалентні схеми та досліджено їх параметричні зміни. Особливу увагу приділено впливу температури та часу експозиції на характеристики тканин, встановлено закономірності зміни провідності, тангенса кута втрат та резонансної частоти. Також досліджено вплив геометричних параметрів зразків і умов експерименту на результати вимірювань. Розділ відзначається значним обсягом експериментальних даних та їх ґрунтовним аналізом.

У четвертому розділі здійснено узагальнення та інтерпретацію отриманих результатів. Проведено порівняльний аналіз імпедансних характеристик тканин різної морфології, розглянуто температурну деструкцію як модель контрольованих структурних змін. Обґрунтовано можливість використання частотних та параметричних характеристик (зокрема дисперсії, провідності та тангенса кута втрат) як маркерів структурної деградації біологічних тканин. Окрему увагу приділено оцінці обмежень методу та перспективам його подальшого розвитку. Розділ має узагальнюючий характер і демонструє здатність автора до системного аналізу отриманих результатів.

Зауваження до змісту тексту дисертації:

1. У другому розділі дисертації детально викладено фізичні основи методу імпедансної спектроскопії та способи графічної інтерпретації результатів. Проте, опис окремих методичних аспектів (зокрема вибору частотного діапазону та конфігурації електродів) міг би бути більш структурованим і доповненим коротким узагальненням причин їх застосування саме для дослідження біологічних тканин різної морфології.

2. У роботі продемонстровано високу чутливість методу імпедансної спектроскопії до ранніх стадій деструктивних змін у тканинах. Водночас у дисертації недостатньо чітко окреслено межі застосовності запропонованого підходу, зокрема щодо відокремлення зворотних та незворотних змін структури тканини. Більш явне формулювання таких обмежень підвищило б методологічну завершеність дослідження.

3. При аналізі результатів для тканин різних органів основна увага зосереджена на якісному зіставленні імпедансних спектрів та еквівалентних схем. Проте, додаткове використання узагальнених або безрозмірних параметрів могло б спростити порівняння між різними типами тканин і підсилити міждисциплінарну складову роботи.

4. У роботі доцільно було б більш детально розглянути питання похибок вимірювання та статистичної обробки експериментальних результатів, що підвищило б рівень достовірності отриманих висновків.

Висновок

Аналіз дисертаційного дослідження Приймака Т.В. на тему «Трансформація імпедансних спектрів біологічних тканин під впливом деструктивних факторів» дає підстави стверджувати, що робота є завершеним

науковим дослідженням, яке має важливе наукове та практичне значення. У роботі послідовно вирішено комплекс актуальних завдань, спрямованих на розробку й дослідження нових електродних матеріалів для систем накопичення енергії, що підтверджує її високий рівень виконання. Основні результати науково обґрунтовані, логічно викладені, експериментально підтверджені та достатньо висвітлені у публікаціях автора у фахових наукових виданнях.

Дисертація відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України, зокрема положенням «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 та наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами). За змістом, обсягом та науковим рівнем дисертаційна робота повністю відповідає спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали, а її автор Приймак Тарас Володимирович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за зазначеною спеціальністю.

Рецензент:

доктор фізико-математичних наук,
професор, професор кафедри
прикладної фізики і
матеріалознавства
Карпатського національного
університету імені Василя Стефаника

Богдан РАЧІЙ