

Голові спеціалізованої вченої ради
ДФ 20.051.178
Прикарпатського національного
університету імені Василя Стефаника
доктору фізико-математичних наук,
професору Коцюбинському
Володимиру Олеговичу
(76018, м. Івано-Франківськ,
вул. Шевченка, 57)

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, старшого дослідника,
завідувача кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства
Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів)

Іващишина Федора Олеговича

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. Актуальність теми дисертаційної роботи Приймака Т.В. зумовлена зростаючою потребою у розвитку високочутливих, неінвазивних та інформативних методів дослідження структурно-функціонального стану біологічних тканин, зокрема в умовах впливу деструктивних чинників.

У сучасній біофізиці, медичній діагностиці та біомедичній інженерії особливого значення набувають методи, що дозволяють здійснювати ранню діагностику патологічних змін, контролювати процеси деградації тканин та оцінювати їх життєздатність у реальному часі. У цьому контексті імпедансна спектроскопія виступає перспективним інструментом, оскільки базується на аналізі електричних властивостей біологічних об'єктів, які є чутливими до змін їхньої мікроструктури, морфології та фізіологічного стану.

Разом з тим, незважаючи на значний потенціал методу імпедансної спектроскопії, на сьогодні залишається невирішеною проблема уніфікованої інтерпретації отриманих імпедансних спектрів, а також ідентифікації інформативних параметрів, що можуть слугувати надійними маркерами структурних змін та пошкоджень у біологічних тканинах. Особливої складності набуває аналіз трансформації спектрів у випадку дії комплексних деструктивних факторів, таких як температура, тривалість впливу та морфологічні особливості тканин.

У цьому зв'язку науково обґрунтоване дослідження закономірностей зміни імпедансних характеристик біологічних тканин, побудова адекватних еквівалентних електричних схем та встановлення їх параметричних маркерів є важливим науковим і практичним завданням.

Дисертаційна робота Приймака Т.В. «Трансформація імпедансних спектрів біологічних тканин під впливом деструктивних факторів» спрямована

саме на вирішення зазначених проблем, що свідчить про її актуальність, наукову значущість і відповідність сучасним тенденціям розвитку прикладної фізики, біофізики та медичних технологій.

Наукова новизна отриманих результатів:

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розвитку фізичних підходів до аналізу імпедансних характеристик біологічних тканин та встановленні нових закономірностей їх трансформації під впливом деструктивних факторів.

Зокрема, автором:

- встановлено особливості зміни комплексного імпедансу біологічних тканин залежно від їх геометричних параметрів та структурного стану, що дозволило показати зв'язок між макроскопічними розмірами зразка і його ефективними електрофізичними характеристиками ;
- обґрунтовано доцільність використання похідних спектральних характеристик (зокрема першої та другої похідних провідності) як високочутливих індикаторів змін мікроструктури тканини;
- виявлено наявність стабільних частотних екстремумів, пов'язаних із структурною організацією біологічного середовища, що можуть розглядатися як універсальні маркери його фізіологічного стану;
- показано, що зміщення положення характерних максимумів у спектрах провідності відображає перебіг деструктивних процесів, зокрема порушення мембранних властивостей та міжклітинної взаємодії;
- розвинено підходи до інтерпретації експериментальних даних на основі аналізу дисперсійних явищ та використання узагальнених моделей типу Коула–Коула.

Сукупність отриманих результатів свідчить про вагомий внесок автора у розвиток фізики біологічних систем та методів їх дослідження.

Практичне значення. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх використання для розроблення нових методів діагностики стану біологічних тканин на основі імпедансної спектроскопії. Запропоновані підходи до аналізу спектральних характеристик дозволяють підвищити чутливість та інформативність методу, що є важливим для задач раннього виявлення патологічних змін.

Отримані залежності та встановлені закономірності можуть бути використані при створенні апаратно-програмних комплексів для медичної діагностики, а також у фундаментальних дослідженнях електрофізичних властивостей біологічних об'єктів.

Відповідність дисертації профілю спеціалізованої вченої ради. За змістом дисертація Приймака Тараса Володимировича «Трансформація імпедансних спектрів біологічних тканин під впливом деструктивних факторів» представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії повністю відповідає спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Аналіз змісту дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, який містить 297 найменувань та додатків. Обсяг дисертації 220 сторінок, в тому числі 78 рисунків і 9 таблиць. Всі елементи роботи викладені у логічному та послідовному порядку. Мета,

завдання, об'єкт і предмет дослідження чітко визначені. Наукова новизна, а також наукове й практичне значення отриманих результатів сформульовані зі зрозумілою точністю, із зазначенням їх апробації. Матеріали дисертації опубліковані в 3 наукових статтях у фахових виданнях, які індексуються наукометричною базою Scopus, 1 статті з переліку наукових фахових видань України категорії Б, 1 матеріалах конференції у збірнику, який індексується наукометричною базою Scopus та 4 тезах міжнародних конференцій.

Значна кількість цікавих експериментальних результатів, які в дисертаційній роботі систематизовані та проаналізовані на сучасному рівні, їх продумана інтерпретація свідчать про достатньо високу професійну кваліфікацію автора.

У *першому розділі* здійснено ґрунтовний аналіз сучасного стану досліджень електрофізичних властивостей біологічних тканин, розглянуто механізми їх провідності, а також основні підходи до моделювання імпедансних характеристик.

У *другому розділі* описано фізичні основи імпедансної спектроскопії. Розглянуто поняття комплексного імпедансу, особливості його частотної залежності, методи побудови та аналізу діаграм Найквіста, а також використання еквівалентних електричних схем. Особливу увагу приділено дисперсійним явищам (α -, β -, γ -дисперсії), що відіграють визначальну роль у формуванні спектральних характеристик біологічних тканин.

У *третьому розділі* наведено результати експериментальних досліджень. Показано, що:

- геометричні параметри зразків істотно впливають на величину комплексного імпедансу, що необхідно враховувати при інтерпретації результатів;
- температура, розташування електродів та морфологічні особливості тканини визначають форму імпедансного спектра;
- екстремуми другої похідної дисперсійної кривої є чутливими до змін мікроструктури тканини та можуть використовуватися як універсальний індикатор її стану;
- стабільні частотні особливості, зокрема мінімум у низькочастотній області, відображають переходи між різними механізмами провідності;
- зміщення спектральних максимумів корелює з процесами структурної деградації тканини.

У *четвертому розділі* представлено узагальнення отриманих результатів та окреслено перспективи подальшого розвитку досліджень із використанням методу імпедансної спектроскопії.

Загалом слід відзначити високий рівень експериментальної роботи, коректність інтерпретації результатів та їх узгодженість із сучасними уявленнями про електрофізичні властивості біологічних середовищ.

Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертації

Загальна оцінка дисертаційної роботи є позитивною. У той же час є деякі зауваження і побажання:

1. У дисертації застосовується елемент постійної фази (CPE) для апроксимації експериментальних спектрів, що є цілком обґрунтованим

підходом для неоднорідних систем. Водночас параметри СРЕ (коефіцієнт та показник степеня) інтерпретуються переважно формально, без глибокого фізичного пов'язання з морфологічною неоднорідністю тканини, розподілом релаксаційних часів або фрактальними властивостями середовища. Більш детальний аналіз цих параметрів дозволив би підсилити зв'язок між експериментальними даними та мікроструктурою біологічного об'єкта.

2. У роботі практично не розглянуто внесок контактного імпедансу, який є суттєвим, особливо в низькочастотній області. Відомо, що поляризаційні ефекти на межі електрод-біологічна тканина можуть істотно спотворювати вимірювані характеристики, зокрема призводити до появи додаткових дуг на діаграмах Найквіста. Доцільно було б або експериментально оцінити цей внесок, або обґрунтувати його нехтування, наприклад, через використання відповідної електродної конфігурації.
3. Біологічні тканини є структурно складними та анізотропними середовищами, що зумовлює просторову залежність їх електрофізичних властивостей. У роботі цей аспект лише побіжно згадується, тоді як більш детальний аналіз (зокрема, можливі варіації імпедансу залежно від напрямку струму або локальних неоднорідностей) міг би суттєво поглибити фізичну інтерпретацію отриманих результатів.
4. Отримані результати доцільно було б співставити з відомими теоретичними моделями, зокрема моделями Фрікке, Хейдена або узагальненими багаточисловими моделями біологічних тканин. Таке порівняння дозволило б не лише верифікувати експериментальні дані, але й уточнити фізичний зміст виявлених спектральних особливостей.
5. У роботі представлено значний обсяг експериментальних даних, проте недостатньо уваги приділено статистичній обробці результатів. Зокрема, відсутня інформація щодо кількості вимірювань, величини розкиду параметрів, довірчих інтервалів та похибок визначення основних характеристик імпедансу. Врахування цих аспектів є важливим для оцінки відтворюваності та надійності отриманих результатів.
6. Оскільки дослідження спрямоване на аналіз впливу деструктивних факторів, важливим є не лише фіксація змін спектрів, але й їх часової еволюції. У роботі цей аспект розглянуто обмежено, хоча саме динамічні характеристики можуть містити додаткову інформацію про механізми деградації тканини та стадії її пошкодження.
7. У роботі переважно використовується якісний аналіз спектральних характеристик (зміщення максимумів, поява екстремумів тощо). Разом з тим, доцільним було б ширше застосувати параметричну апроксимацію імпедансних спектрів із визначенням числових значень еквівалентних елементів, що дозволило б перейти від описового рівня до кількісного моделювання процесів у тканині.
8. У роботі більшу увагу потрібно було би приділити оформленню рисунків так як написи наведені англійською мовою, позначення та означення кривих не завжди описані в тексті, підписи до рисунків не

завжди вдало сформулювані, також в тексті присутні неточності та описки.

Однак, зазначені зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи і не мають відношення до висновків та наукових положень, що становлять наукову новизну отриманих результатів.

Висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Аналізуючи дисертаційне дослідження Приймака Тараса Володимировича «Трансформація імпедансних спектрів біологічних тканин під впливом деструктивних факторів» можна стверджувати, що робота є комплексною, завершеною, має як наукове, так і практичне значення. Основні результати дослідження достатньо висвітлені у наукових працях. Робота повністю відповідає усім вимогам МОН України: «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 (зі змінами) та наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами), які пред'являються до дисертацій, а її автор Приймак Тарас Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії (PhD) з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, старший дослідник,
завідувача кафедри прикладної фізики
і наноматеріалознавства Національного
Університету «Львівська політехніка»

Федір ІВАЦІШИН