

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

«На правах рукопису»
УДК 621.317

До захисту допущено

Зав. кафедри

Андрій МОВЧАНЮК

«21» травня 2026 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою «Радіоелектронна інженерія»

за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

**на тему: «Електромагнітна сумісність діелектричних імплантаційних
матеріалів з тілом людини»**

Виконав
студент 2 курсу,
групи РЕ-41мн

Гайдай Леся Русланівна

Науковий керівник:
Д.т.н., професор

Яненко Олексій Пилипович

Рецензент:
Доцент, к.т.н.

Гусєва Олена Володимирівна

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2026 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітньо-наукова програма «Радіоелектронна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



Андрій МОВЧАНЮК

«01» жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Гайдай Леся Русланівна

(прізвище ім'я по батькові)

1. Тема дисертації «Електромагнітна сумісність діелектричних імплантаційних матеріалів з тілом людини»

науковий керівник дисертації д.т.н., професор Яненко Олексій Пилипович
(прізвище ім'я по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «02» квітня 2026 р. №1377-с

2. Термін подання студентом дисертації 18 травня 2026 року

3. Об'єкт дослідження: процеси взаємодії низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання міліметрового діапазону з діелектричними імплантантами біоматеріалами та біологічними тканинами організму людини.

4. Предмет дослідження: електромагнітні характеристики діелектричних імплантантах біоматеріалів у міліметровому діапазоні частот та їх вплив на оцінку біосумісності з тканинами організму людини.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

- Проаналізувати сучасні критерії біосумісності імплантантах біоматеріалів.

- Дослідити фізичні основи формування електромагнітного випромінювання біотканин та діелектричних матеріалів.
- Описати методику та апаратурне забезпечення для вимірювання низькоінтенсивних мм-хвиль.
- Провести експериментальні дослідження випромінювальної та поглинальної здатності біоматеріалів.
- Оцінити електромагнітну сумісність досліджуваних матеріалів з тканинами організму людини.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: таблиці експериментальних даних, графік порівняння потужностей теплового електромагнітного випромінювання досліджуваних матеріалів, рисунок три моделі взаємодії між біотканиною та імплантатом

7. Орієнтовний перелік публікацій: Тези доповіді у збірнику матеріалів міжнародної науково-практичної конференції «Концепт науки XXI: стратегії, методи та наукові інструменти», м. Ужгород, 26 грудня 2025 р. та на 25ій міжнародній н/т конференції: «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2026 р.

9. Дата видачі завдання 01 жовтня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання теми магістерської дисертації	01.10- 20.10. 2025р.	
2	Аналіз літературних джерел	20.11.2025-20.02.2026	
3	Проведення експериментальних досліджень	20.02.2026-30.02.2026	
4	Обробка та аналіз результатів	30.02.2026-30.03.2026	
5	Написання розділів магістерської дисертації	30.03.2026-30.04.2026	
6	Підготовка презентації та доповіді	01.05.2026-15.05.2026	
7	Оформлення магістерської дисертації	16.05.2026р.	

Студент

Леся ГАЙДАЙ

Науковий керівник

Олексій ЯНЕНКО

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Прикладної радіоелектроніки» Національного технічного університету України "Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського".

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Яненко Олексій Пилипович Національного технічного університету України "Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського".

Зміст

Реферат	7
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ІМПЛАНТНИХ БІОМАТЕРІАЛІВ	15
1.1 Біоматеріали для кісткової та м'якотканинної регенерації	15
1.2 Поняття біосумісності та критерії її оцінювання	19
1.3 Методи електромагнітної ідентифікації біологічних тканин	24
1.4 Електромагнітні властивості біотканин людини	26
1.5 Особливості мікрохвильового випромінювання мм-діапазону	30
1.6 Вплив низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання на біологічні системи	32
ВИСНОВОК ДО 1 РОЗДІЛУ	37
РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ З БІОТКАНИНАМИ ЛЮДИНИ	39
2.1 Фізична модель біотканини як джерела теплового електромагнітного випромінювання	39
2.2 Теплове електромагнітне випромінювання біологічних систем	42
2.3 Закон Кірхгофа для електромагнітного випромінювання біотканин	45
2.4 Модель Найквіста–Больцмана для біотканин та імплантату	48
2.5 Енергетична модель взаємодії “імплантат – біотканина”	50
ВИСНОВОК ДО 2 РОЗДІЛУ	57
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ	59
3.1 Об'єкти дослідження та їх класифікація	59

3.2	Методика радіометричних вимірювань	62
3.3	Розрахунок коефіцієнта випромінювальної здатності	69
3.4	Експериментальні результати.....	72
3.5	Аналіз результатів.....	78
3.6	Модель взаємодії біотканина-імплантат	80
3.7	Критерії електромагнітної сумісності.....	84
ВИСНОВОК ДО 3 РОЗДІЛУ		86
ВИСНОВКИ.....		89
Список використаних джерел		92
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....		95

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається із змісту, переліку умовних позначень, вступу, 3-х розділів, висновків, списку використаних джерел, містить: 2-ілюстрацій, 4-таблиці, 96-сторінок.

1. Розглянуто сучасні підходи до створення імплантатних біоматеріалів та основні критерії їх біосумісності.
2. Запропоновано використання рівня низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання міліметрового діапазону як додаткового критерію оцінки сумісності біоматеріалів з тканинами організму людини.
3. Описано апаратурне забезпечення та методику експериментальних досліджень випромінювальної та поглинальної здатності діелектричних біоматеріалів.
4. Проведено експериментальне порівняння електромагнітних характеристик біоматеріалів природного та синтетичного походження з власним випромінюванням тіла людини.
5. Показано, що матеріали на основі природних компонентів мають електромагнітні характеристики, найближчі до біотканин людини, що свідчить про їх вищу електромагнітну сумісність.

Ключові слова

Біоматеріали, імплантати, біосумісність, міліметровий діапазон, низькоінтенсивне електромагнітне випромінювання, радіометрія.

ABSTRACT

The structure and scope of the dissertation

The thesis consists of a table of contents, a list of abbreviations, an introduction, three chapters, conclusions, and a list of references. It includes: 2 figures, 4 tables, and 96 pages.

1. Modern approaches to the development of implant biomaterials and the main criteria of their biocompatibility are reviewed.
2. The use of the level of low-intensity millimeter-wave electromagnetic radiation as an additional criterion for assessing the compatibility of biomaterials with human tissues is proposed.
3. The experimental setup and methodology for investigating the emissive and absorptive properties of dielectric biomaterials are described.
4. An experimental comparison of electromagnetic characteristics of natural and synthetic biomaterials with the intrinsic radiation of the human body is performed.
5. It is shown that materials based on natural components exhibit electromagnetic characteristics closest to human biological tissues, indicating higher electromagnetic compatibility.

Keywords

Biomaterials, implants, biocompatibility, millimeter-wave range, low-intensity electromagnetic radiation, radiometry.

Скорочення:

НІЕМВ – Низькоінтенсивне електромагнітне випромінювання

АЧТ – абсолютно чорне тіло

БТ – біотканина

ІМП – імплантат

ЕМВ – електромагнітне випромінювання

Na⁺, K⁺, Cl⁻ – іони натрію, калію та хлору

мм-діапазон – міліметровий діапазон електромагнітних хвиль

ВСТУП

Актуальність теми

У сучасній медицині широко застосовуються імплантантні матеріали для відновлення кісткових і м'яких тканин. Поряд із традиційними вимогами до біоматеріалів, такими як біологічна толерантність, хімічна стабільність та механічна міцність, все більшої уваги набувають їх електромагнітні властивості, які до цих пір практично не досліджувались.

Відомо, що біотканини людини за температури тіла випромінюють власне низькоінтенсивне електромагнітне випромінювання у широкому діапазоні частот в тому числі у міліметровому діапазоні. Імпланти, виготовлені з діелектричних матеріалів, також формують електромагнітні поля, які можуть взаємодіяти з навколишніми тканинами, порушуючи локальний електромагнітний гомеостаз.

Наявність відмінностей між електромагнітними характеристиками імплантату та біотканини може призводити до небажаних біофізичних і біохімічних ефектів, що ускладнює процеси регенерації та адаптації імплантату. Тому дослідження електромагнітної сумісності імплантантних біоматеріалів є актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами:

Дисертаційна робота виконана на кафедрі Прикладної електроніки Національного технічного університету України "Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського".

Мета і завдання дослідження:

Мета роботи – дослідити електромагнітні властивості діелектричних імплантантних біоматеріалів та оцінити їх біосумісність на основі рівня низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання міліметрового діапазону.

Завдання роботи:

1. Проаналізувати сучасні критерії біосумісності імплантатних біоматеріалів.
2. Дослідити фізичні основи формування електромагнітного випромінювання біотканин та діелектричних матеріалів.
3. Описати методику та апаратне забезпечення для вимірювання низькоінтенсивних мм-хвиль.
4. Провести експериментальні дослідження випромінювальної та поглинальної здатності біоматеріалів.
5. Оцінити електромагнітну сумісність досліджуваних матеріалів з тканинами організму людини.

Технічні вимоги до дослідницької системи

1. Діапазон частот дослідження: міліметровий діапазон електромагнітних хвиль.
2. Рівень реєстрованих сигналів: низькоінтенсивне власне електромагнітне випромінювання біологічних тканин та біоматеріалів.
3. Об'єкти вимірювання: діелектричні імплантатні біоматеріали природного та синтетичного походження.
4. Метод вимірювання: радіометрична реєстрація рівня електромагнітного випромінювання.
5. Вихідні параметри: рівень випромінювання, поглинальна здатність, зсув спектральних характеристик у мм-діапазоні.

Об'єкт дослідження:

Об'єктом дослідження є процеси взаємодії низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання міліметрового діапазону з діелектричними імплантатними біоматеріалами та біологічними тканинами організму людини.

Предмет дослідження:

Предметом дослідження є електромагнітні характеристики діелектричних імплантатних біоматеріалів у міліметровому діапазоні частот та їх вплив на оцінку біосумісності з тканинами організму людини.

Методи дослідження:

У роботі використано:

- методи теоретичного аналізу електромагнітних властивостей діелектричних матеріалів та біотканин;
- радіометричні методи реєстрації низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання мм-діапазону;
- методи порівняльного аналізу випромінювальної та поглинальної здатності біоматеріалів;
- комп'ютерне моделювання та обробку експериментальних даних з використанням програмного забезпечення MathCad.

Наукова новизна одержаних результатів:

На основі проведених досліджень отримано такі наукові результати:

1. Запропоновано використання рівня низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання міліметрового діапазону як додаткового критерію оцінювання біосумісності діелектричних імплантатних матеріалів.
2. Досліджено відмінності електромагнітних характеристик біоматеріалів природного та синтетичного походження у порівнянні з біологічними тканинами людини.
3. Встановлено вплив електромагнітних параметрів матеріалів на їх сумісність з електромагнітним фоном організму людини.
4. Обґрунтовано можливість застосування радіометричних методів мм-діапазону для неінвазивної оцінки біосумісності імплантатних матеріалів.

Практичне значення одержаних результатів:

Одержані результати можуть бути використані для:

- підвищення ефективності вибору імплантатних біоматеріалів з урахуванням їх електромагнітної сумісності з тканинами організму людини;

- удосконалення методів попередньої експериментальної оцінки біосумісності імплантатів;
- зниження ризику ускладнень після імплантації та покращення процесів адаптації матеріалів в організмі;
- подальшого розвитку неінвазивних методів біофізичної діагностики на основі мм-хвиль.

Особистий внесок здобувача:

Основні положення дисертації отримано автором самостійно ґрунтуючись на попередніх дослідженнях на обладнанні кафедри «Прикладної радіоелектроніки» Національного технічного університету України "Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського". Автором:

- проведено порівняльний аналіз електромагнітних властивостей діелектричних імплантантних біоматеріалів;
- досліджено рівні власного електромагнітного випромінювання біоматеріалів у мм-діапазоні;
- виконано експериментальну оцінку їх сумісності з біологічними тканинами;
- узагальнено результати та сформульовано висновки щодо можливості застосування мм-радіометрії для оцінки біосумісності.

Апробація матеріалів дисертації:

Основні положення та результати магістерської дисертації доповідалися та обговорювалися на IX студентській науковій конференції «Концепт науки XXI: стратегії, методи та наукові інструменти» (м. Ужгород, 26 грудня 2025 р.) та 25й міжнародній н/т конференції: «Приладобудування: стан і перспективи» (м. Київ, 2026). Отримані результати можуть бути використані при подальших наукових дослідженнях у галузі біомедичної електроніки та радіофізики.

Дисертаційна робота складається із змісту, переліку умовних позначень, вступу, 3-х розділів, висновків, списку використаних джерел, загальним об'ємом 96 сторінок.

Основний зміст роботи

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, об'єкт і предмет дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення роботи.

У першому розділі розглянуто сучасні підходи до створення імплантатних біоматеріалів, основні критерії їх біосумісності та фізичні основи електромагнітного випромінювання біологічних тканин у міліметровому діапазоні.

У другому розділі описано методику та моделювання радіометричних досліджень, апаратне забезпечення та принципи вимірювання низькоінтенсивних сигналів мм-діапазону від біоматеріалів і біотканин.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень, проведено порівняльний аналіз електромагнітних характеристик біоматеріалів та сформульовано висновки щодо їх біосумісності.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ІМПЛАНТНИХ БІОМАТЕРІАЛІВ

1.1 Біоматеріали для кісткової та м'якотканинної регенерації

Сьогодні імплантаційні біоматеріали активно використовуються в різних напрямках відновлювальної медицини для заміщення пошкоджених або втрачених тканин. Найчастіше їх застосовують у стоматології, ортопедії, травматології та щелепно-лицевій хірургії, де необхідно не лише відновити анатомічну цілісність, а й забезпечити подальше функціональне відновлення тканин. Важливою умовою їх використання є створення середовища, яке сприятиме стабільному приживленню імплантату та регенерації навколишніх структур [1].

Завдяки прогресу в науці про біомедичні матеріали, було розроблено велику різноманітність речовин, які знаходять застосування для регенерації як кісткової, так і м'яких тканин. Умовно всі біоматеріали для регенерації тканин можна розділити на три основні групи залежно від їх походження: природні, синтетично отримані та композитні. Кожен із цих типів має власні переваги та обмеження, що визначають їх клінічне застосування [2].

Матеріали природного походження

Матеріали, здобуті з природи, поділяються на аутологічні, аlogenні та ксеногенні трансплантати.

Аутологічні трансплантати отримують із власних тканин пацієнта, що практично повністю виключає ризик імунної несумісності. Такі матеріали містять біологічно активні компоненти, зокрема клітини остеогенного ряду та фактори росту, які безпосередньо беруть участь у формуванні нової кісткової тканини. Типовим прикладом є використання власної кісткової тканини для заповнення дефектів після оперативних втручань [3].

Аlogenні трансплантати добувають від інших осіб; як правило, вони проходять обробку для видалення клітинного компонента та стерилізації. Вони дають змогу отримати більші обсяги кісткової маси, проте існує потенційний

ризик імунної реакції, хоча актуальні технології обробки цей ризик суттєво знижують.

Матеріали ксеногенного походження здобуваються від тварин (наприклад, великої рогатої худоби чи свиней) і застосовуються лише після спеціальної підготовки, що усуває клітини та знижує антигенність. Вони демонструють добрі остеокондуктивні властивості й використовуються при значних обсягах втрати кісткових тканин.

Застосування трансплантатів природного походження має певні обмеження, пов'язані з обсягом донорського матеріалу, потребою у додаткових хірургічних маніпуляціях для його вилучення, а також ризиком виникнення ускладнень після операції. З огляду на ці чинники, широкого розповсюдження набули синтетичні біоматеріали [1].

Синтетичні біоматеріали

Серед синтетичних біоматеріалів важливе місце займають керамічні матеріали на основі фосфатів кальцію, зокрема гідроксиапатиту.

Одним із найпоширеніших синтетичних матеріалів є гідроксиапатит, який за своєю хімічною природою наближений до мінеральної складової кісткової тканини. Завдяки цьому він демонструє високу біосумісність і здатність підтримувати процес формування нової кістки. Його пориста структура сприяє проникненню клітин та поступовій заміні імплантованого матеріалу природною тканиною [4].

Додатково, синтетичні речовини, такі як β -трикальційфосфат, біоактивні скельця та полімери, здатні комбінувати здатність до провідності кістки із суттєвими механічними характеристиками. Ці матеріали гарантують збереження форми трансплантата, гнучкість у створенні різноманітних конфігурацій та можливість регулювати ступінь пористості.

Матеріали, що наслідують біологічні зразки (біоміметики), копіюють природну кісткову архітектуру. Вони вирізняються багат шаровою пористістю, що полегшує транспорт поживних елементів та переміщення клітин,

стимулюючи прикріплення, розмноження та спеціалізацію клітин кістки (остеобластів), чим пришвидшують процес зрощення (інтеграції) [2].

Композитні матеріали

Складені біосубстанції являють собою злиття природних складників (на кшталт колагену чи біополімерів) із штучно створеними (зокрема гідроксиапатитом чи кальцієвими фосфатами). Такий підхід дає змогу довести до досконалості механічні характеристики, забезпечити необхідну опорну архітектуру для тканини в процесі її відновлення, а також активно заохотити діяльність клітин. Застосування цих композитних матеріалів гарантує належну рівновагу між їхньою міцністю та придатністю для живих систем, що є життєво важливим для зон кісток, які зазнають значних навантажень, як-от у щелепно-лицьовій галузі.

Вплив фізичних характеристик

Спроможність імплантаційного матеріалу працювати належним чином обумовлена не лише його хімічними та біологічними якостями, а й фізичними ознаками поверхні – мікрорельєфом, здатністю до поглинання (пористістю), хімічним складом та поверхневими енергетичними властивостями. Ці аспекти напряму впливають на прилипання клітин, утворення зв'язків між ними, розмноження та спеціалізацію остеобластів, а також на те, як швидко імплантат зростеться з кісткою. Надзвичайно важливими є належна будова пор та ступінь шорсткості поверхні, що стимулює рух клітин та вироблення кісткової речовини [2].

Взаємодія імплантату з біологічною тканиною не обмежується лише механічними та хімічними процесами. У зоні контакту також формуються слабкі електромагнітні ефекти, які пов'язані з тепловим випромінюванням біологічних структур при температурі тіла. Такі процеси можуть впливати на перенесення іонів, клітинну активність та сигнальні механізми, що беруть участь у регенерації тканин [5].

Матеріалознавство та біомедицина виявляють особливу увагу до діелектричних субстанцій, які можуть випускати електромагнітні хвилі в межах

міліметрового діапазону, коли нагріваються до температури людського тіла. Рівень цього випромінювання є залежним від:

- діелектричної проникності матеріалу,
- структури та пористості,
- хімічного складу та наявності полярних компонентів,
- коефіцієнта випромінювальної здатності поверхні.

Якщо електромагнітні характеристики імплантату суттєво відрізняються від параметрів навколишніх тканин, у зоні контакту можуть виникати локальні неоднорідності поля. Такі ефекти потенційно впливають на поведінку клітин, зокрема остеобластів, і можуть змінювати інтенсивність процесів формування кісткової тканини. Отже, діелектричні якості матеріалу можуть мати прямий вплив на темпи формування кістки та успішність злиття імплантату з організмом [6].

Серед ключових діелектричних речовин, які застосовуються або як окремі імплантати, або як складові частини композитних систем, можна виділити:

- пористий гідроксиапатит з підвищеною полярністю,
- композити на основі кальційфосфатів і полімерів,
- біоактивне скло, яке демонструє не лише остеокондуктивність, а й здатність генерувати слабе електромагнітне випромінювання, що активує клітинні сигнальні шляхи.

Експериментально ефекти електромагнітного випромінювання досліджуються за допомогою:

- мікроскопії кальцію – для оцінки остеогенезу,
- іонних сенсорів та електродів – для вимірювання змін електричного потенціалу клітин,
- спектроскопії низькоінтенсивного випромінювання – для оцінки локальних електромагнітних потоків на поверхні матеріалу.

Наявні наукові дані свідчать про те, що локальні електромагнітні поля здатні посилювати здатність до утворення кістки навколо імплантату, стимулюючи розвиток мікроскопічної судинної системи, а також покращуючи

його зрощення з кістковою тканиною, що пришвидшує відновлення тканин. Якщо ж електромагнітний баланс довкола імплантату порушується, це може спричинити зниження ефективності регенерації аж до повної чи часткової відмови імплантату [7].

Ключовим моментом у проектуванні таких біоактивних імплантатів, що мають одночасно механічну стійкість та здатність стимулювати відновлення, є обов'язковий облік їхніх електромагнітних характеристик та здатності діелектричних речовин генерувати локальні хвилі. Це, своєю чергою, відкриває шляхи для активного контролю над процесом формування кістки шляхом підбору матеріалів із чітко визначеними електрофізичними параметрами.

Клінічні та експериментальні аспекти

Сучасні матеріали проходять експериментальні оцінки остеокондуктивності, біосумісності та інтеграції в живому організмі. Наприклад:

- Пористі гідроксиапатитні каркаси демонструють високу швидкість росту кісткової тканини і поступове заміщення імплантату.
- Композити колаген-гідроксиапатит забезпечують гарну механічну підтримку, а одночасно стимулюють клітинну активність.
- Біоміметичні конструкції значно прискорюють диференціацію остеобластів і формування мікросудинної мережі.

Отже, актуальні імплантаційні біоматеріали зобов'язані задовольняти механічні, біологічні та фізичні критерії, до яких належать і електромагнітні характеристики, котрі здатні мати вирішальне значення для процесу інтеграції. Осмислення цих атрибутів дає змогу вдосконалювати матеріали відповідно до специфічних клінічних потреб, покращувати результати регенерації тканин і мінімізувати ймовірність виникнення післяопераційних проблем [1-7].

1.2 Поняття біосумісності та критерії її оцінювання

Спроможність субстанції (матеріалу) вступати у контакт із живими клітинами та тканинами, не провокуючи при цьому отруєння, алергічних чи інших небажаних відгуків, а навпаки — підтримуючи належну роботу організму

й регенерацію тканин, зветься біокомпонентністю. Ця характеристика набуває першочергового значення для будь-яких виробів, що призначені для введення в тіло (імплантатів), адже навіть найдосконаліша з погляду фізичних властивостей речовина виявиться не придатною, якщо її взаємодія з клітинним чи тканинним середовищем не задовольняє стандартів безпеки.

Біосумісність матеріалу охоплює кілька рівнів взаємодії з організмом:

- Клітинна сумісність означає, що матеріал здатний підтримувати прикріплення, ріст та спеціалізацію клітин, не спричиняючи при цьому шкідливої дії. Щодо кісткових протезів, вирішальним є вплив на остеобласти, остецити й остеокласти, адже саме вони відповідають за процес утворення нової кістки та її подальше оновлення.
- З'єднання з навколишніми тканинами, що є стабільним, – ось що ми називаємо інтеграцією тканин. Важливо, аби не виникло тривалого запалення чи фіброзного нашарування, яке б блокувало відновлення. Матеріал має спонукати ріст нової кісткової чи сполучної структури, тим самим гарантуючи стійкість імплантату протягом тривалого часу.
- Безпека системи — це стан, за якого не утворюються шкідливі продукти розпаду чи негативні наслідки для інших систем та органів людського тіла. Це має першочергове значення для полімерів та композитів, що піддаються біорозкладанню, адже їхні розпадні компоненти здатні спровокувати як місцеве, так і загальне запалення [8].

Критерії оцінювання біосумісності

Оцінювання біосумісності проводиться із застосуванням *in vitro*, *in vivo* та комбінованих методів, що дозволяє комплексно аналізувати взаємодію матеріалу з біологічними системами.

1. In vitro оцінка

На першому етапі матеріал аналізується в контрольованих лабораторних умовах із використанням клітинних культур. Це дозволяє оцінити первинну взаємодію матеріалу з біологічним середовищем.

- Клітинні культури. Найчастіше використовують остеобласти або мезенхімальні стовбурові клітини. Досліджується їх здатність закріплюватися на поверхні матеріалу, підтримувати проліферацію та зберігати життєздатність при тривалому контакті.
- Оцінка цитотоксичності. Для визначення рівня токсичного впливу застосовують стандартні методи, такі як МТТ-тест, Alamar Blue або Live/Dead фарбування, що дають змогу визначити частку життєздатних клітин після взаємодії з матеріалом.
- Аналіз запальної реакції. Вивчається рівень виділення прозапальних цитокінів, зокрема TNF- α , IL-6 та IL-1 β , які є маркерами імунної відповіді організму.
- Оцінка остеогенних процесів. Визначають активність ферменту лужної фосфатази, утворення мінералізованого матриксу, а також експресію ключових генів остеогенезу (RUNX2, OCN, OPN).
- Дослідження електрофізичних взаємодій. Окремо аналізується вплив діелектричних матеріалів на клітини: фіксуються зміни локальних електричних потенціалів і можливі електромагнітні ефекти, які можуть впливати на клітинну диференціацію та активність остеобластів [8, 3, 6].

2. In vivo оцінка

На наступному етапі матеріали випробовуються в умовах живого організму, що дозволяє оцінити їхню поведінку в реальному біологічному середовищі.

- Тваринні моделі. Імплантація матеріалів проводиться на щурах, кроликах або свинях із подальшим аналізом реакції тканин і ступеня інтеграції.
- Гістологічні дослідження. Вивчається формування нової кісткової тканини, ступінь васкуляризації та наявність запальних процесів.

- Морфометричний аналіз. Виконується кількісна оцінка об'єму новоутвореної кістки (BV/TV), а також параметрів її структури, таких як товщина трабекул і щільність тканини.
- Довготривалі спостереження. Додатково аналізується поведінка матеріалу в часі: швидкість його деградації, стабільність структури та вплив продуктів розпаду на функціональний стан органів, включаючи печінку, нирки та імунну систему [3, 8].

3. Фактори, що впливають на біосумісність

На біосумісність імплантаційних матеріалів впливає низка взаємопов'язаних характеристик, які визначають їхню поведінку в біологічному середовищі та ефективність інтеграції з тканинами організму.

- Хімічний склад: важливе значення має наявність потенційно небажаних домішок або іонів, зокрема важких металів, які можуть порушувати нормальну життєдіяльність клітин і викликати токсичні реакції.
- Стан поверхні та пористість: мікрорельєф і структура поверхні суттєво впливають на взаємодію з клітинами. Помірна шорсткість і пориста організація матеріалу зазвичай сприяють прикріпленню клітин кісткової тканини та їх подальшому розвитку.
- Фізико-механічні властивості: важливим є узгодження механічних характеристик імплантату з властивостями кісткової тканини. Це дозволяє зменшити ризик локальних перевантажень, які можуть ускладнювати процеси відновлення.
- Електрофізичні параметри: електричні властивості матеріалу, зокрема рівень провідності та здатність формувати локальні електромагнітні ефекти, можуть впливати на клітинну активність і процеси формування кісткової тканини, що потенційно відображається на швидкості інтеграції імплантату з біологічним середовищем [5].

Додаткові критерії для біоактивних матеріалів

Для біоактивних імплантаційних матеріалів оцінка їхньої ефективності та сумісності з біологічними тканинами включає низку додаткових характеристик, що відображають здатність матеріалу не лише заповнювати дефект, але й брати участь у процесах регенерації.

- **Остеокондуктивність** – здатність матеріалу виступати структурною основою, уздовж якої відбувається ріст нової кісткової тканини.
- **Остеоіндуктивні властивості** – можливість матеріалу впливати на клітини-попередники та сприяти їх перетворенню на остеобласти, які беруть участь у формуванні кістки.
- **Остеогенна активність** – участь матеріалу у підтриманні процесів безпосереднього утворення кісткової тканини, зокрема через взаємодію з клітинними елементами та мікрооточенням.
- **Взаємодія з факторами росту** – здатність матеріалу взаємодіяти з біологічно активними молекулами, такими як колаген, BMPs та VEGF, які регулюють процеси остеогенезу та формування судинної мережі.

Приклади оцінки біосумісності для різних матеріалів

- **Гідроксиапатит** характеризується високою здатністю до взаємодії з кістковими клітинами, що сприяє їх прикріпленню та формуванню мінералізованого міжклітинного матриксу. У більшості випадків відзначається стабільне приживлення з мінімальною вираженістю запальної реакції.
- **Композити на основі колагену та гідроксиапатиту** поєднують механічну підтримку з біологічною активністю, що створює сприятливі умови для клітинної колонізації, утворення нових судин і запуску процесів кісткової регенерації.
- **Біоміметичні матеріали** завдяки структурній подібності до природної кісткової тканини та складній пористій організації забезпечують більш ефективне проникнення клітин і сприяють їх диференціації, а також формуванню мікросудинної мережі.

- Електрофізичні властивості діелектричних матеріалів можуть супроводжуватися формуванням локальних електромагнітних ефектів, які потенційно впливають на клітинну активність і процеси кісткоутворення, що відображається на швидкості інтеграції імплантату з тканинами [6].

Отже, визначення ступеня біосумісності являє собою багатогранну процедуру, котра інтегрує фізико-хімічні характеристики субстанції, випробування *in vitro* на клітинах, а також експерименти на живих системах. Це дає змогу заздалегідь оцінити рівень безпеки й дієвості біоматеріалів, призначених для імплантації, і слугує фундаментальною передумовою для їхнього запровадження у медичну практику.

1.3 Методи електромагнітної ідентифікації біологічних тканин

У сфері апробації сумісності імплантатів, методи розпізнавання біологічних тканин на основі їхніх електромагнітних характеристик набувають значної ваги. Це обумовлено потребою у вдосконаленні точності медичних обстежень, особливо при локалізації новоутворень та окресленні меж оперативних втручань. На відміну від звичних підходів до візуалізації, електромагнітні техніки надають змогу аналізувати фізичні атрибути тканин на мікроскопічному рівні, розширюючи арсенал неінвазивних та інтраопераційних діагностичних засобів.

Концепція електромагнітного розпізнавання спирається на факт, що різні види біологічних субстанцій демонструють відмінні електрофізичні показники, зокрема властивості діелектричної проникності, електропровідність, а також особливості взаємодії з електромагнітним полем. Саме ці параметри формують специфіку розповсюдження електромагнітної хвилі у середовищі. Коли сигнал проходить крізь тканину, його амплітуда, фаза та ступінь послаблення трансформуються. Детальний аналіз цих змін дає змогу розрізняти окремі типи тканин, як-от дерма, жирові відкладення, м'язова маса чи патологічні утворення.

Зазвичай, для вивчення електромагнітних властивостей біологічних структур використовують методи з одним портом, які базуються на вимірюванні

коефіцієнта відбиття сигналу. Такі методи дозволяють оцінити локальні характеристики тканини, проте володіють певними обмеженнями. Зокрема, вони вимагають складного калібрування і не завжди гарантують необхідну точність при дослідженні тканин, чий електромагнітні профілі близькі між собою, що нівелює їхню ефективність у диференціації складних біологічних конфігурацій.

З огляду на це, було розроблено більш прогресивні двопортові техніки електромагнітного розпізнавання. Вони передбачають задіяння двох шляхів – введення та прийому сигналу, що дає можливість паралельно досліджувати як відбиття, так і проходження електромагнітної хвилі крізь тканину. Цей підхід істотно розширює обсяг зібраної інформації та підвищує вірогідність ідентифікації. Більше того, у певних модифікаціях двопортові системи здатні функціонувати без потреби у громіздкому калібруванні, що спрощує їхнє практичне впровадження.

Ключовим інструментом у цих методиках є застосування S-параметрів, які описують відгук електромагнітного сигналу у досліджуваній системі. Найбільш змістовними виступають коефіцієнт відбиття S_{11} та коефіцієнт передачі S_{21} . Параметр S_{11} характеризує взаємодію сигналу з поверхнею тканини, тоді як S_{21} відображає процес його поширення у товщі середовища між двома точками з'єднання. Дослідження свідчать, що значення S_{11} доволі часто є подібними для різних видів тканин, що ускладнює їхнє розмежування. На противагу цьому, S_{21} демонструє більш виразні розбіжності, оскільки він інтегрує процеси поглинання та розсіювання сигналу в об'ємі тканини. Саме тому аналіз коефіцієнта передачі є більш дієвим для виявлення патологічних утворень.

Для детальнішого опису електромагнітних властивостей біотканин використовуються математичні моделі, що враховують залежність від частотної характеристики. Зокрема, для типових тканин (дерма, жирова клітковина, м'язи) широко застосовується модель Коула-Коула, яка адекватно описує складну діелектричну реакцію середовища з урахуванням релаксаційних феноменів. Для новоутворень частіше обирають модель Дебая, яка ефективно репрезентує їхні електрофізичні ознаки. Інкorporація цих моделей дозволяє визначити

залежність діелектричної проникності та електропровідності від частоти, а також оцінити внутрішні механізми поляризації в тканинах.

Практичне втілення двопортових електромагнітних технік є багатонадійним у сфері медицини. Їх можна задіяти для інтраопераційного визначення пухлин, встановлення меж резекції тканин, а також для неінвазивного дослідження біологічних структур. Суттєвою перевагою є потенціал виявлення новоутворень невеликого розміру, що підвищує результативність хірургічного лікування. Додатково підтверджено, що ці методики мають низький рівень питомого коефіцієнта поглинання (SAR), що засвідчує їхню безпечність для живих тканин.

Окрім діагностичної функції, електромагнітні методи розпізнавання можуть бути використані для вивчення біоматеріалів. Вони, зокрема, надають можливість оцінити відповідність електромагнітних параметрів матеріалу властивостям живих тканин, включаючи аналіз діелектричної проникності, коефіцієнтів поглинання та випромінювання, а також стійкості параметрів у міліметровому частотному діапазоні. Такий підхід є критичним під час створення імплантатів, оскільки дозволяє прогнозувати їхню поведінку в організмі та оцінювати ступінь успішності інтеграції з біологічними матрицями.

Таким чином, електромагнітні техніки ідентифікації дають змогу отримувати додаткові відомості про фізичний стан біологічних тканин і можуть слугувати інструментом для апробації їхніх характеристик [9].

1.4 Електромагнітні властивості біотканин людини

Електромагнітні ознаки людських біологічних тканин є заплутаними і виникають внаслідок їхнього хімічного складу, організації структури та фізіологічних змін, що відбуваються всередині клітин. Параметрами, що визначають електромагнітну поведінку біотканин, є питома електропровідність, діелектрична проникність, електричний імпеданс та здатність поглинати чи випромінювати електромагнітні хвилі. Ці властивості визначають, як тканини реагують на електричні та електромагнітні поля різної частоти, і вони критично важливі для контролю біологічних процесів.

Електромагнітні характеристики біотканин сильно залежать від їхніх молекулярних складових. Переважна більшість тканин в організмі містить значну кількість води, іонів та біополімерів, які формують складні системи діелектриків. Вода слугує головним середовищем для перенесення електричного заряду у біологічних субстанціях, тоді як розчинені в ній іони (натрію, калію, кальцію, хлору) забезпечують провідність тканин. Завдяки цьому біологічні структури можуть проводити електричний струм і реагувати на зовнішні електромагнітні поля. Проте, різні типи тканин демонструють відмінні електрофізичні показники. Наприклад, м'язова та нервова тканини мають вищу електропровідність через значну частку води та іонів, тоді як жирова тканина показує меншу провідність через меншу кількість рідини.

Клітинні оболонки відіграють важливу роль у формуванні електромагнітних властивостей біотканин. Мембрана клітини складається з подвійного ліпідного шару та білкових комплексів, що утворюють бар'єр, який частково пропускає речовини між внутрішнім та зовнішнім середовищем клітини. Через нерівномірний розподіл концентрацій іонів по обидва боки мембрани формується мембранний потенціал, що є основою електричної активності клітин. Цей потенціал бере участь у проведенні імпульсів у нервах, скороченні м'язів та регулюванні клітинного обміну речовин. Зміни в електричних параметрах клітинних мембран можуть впливати на процеси прилипання клітин, їхнього поділу та спеціалізації.

Окрему увагу слід приділити діелектричним властивостям тканин у біологічних системах. Біотканини можна розглядати як нерівномірні діелектрики, що складаються з клітин, рідини міжклітинового простору та структурних білків. Коли на них діє електромагнітне поле, ці структури поляризуються, що призводить до накопичення електричних зарядів у різних ділянках тканини. Подібні процеси можуть впливати на переміщення іонів через клітинні оболонки, активність ферментів та швидкість біохімічних реакцій.

Особливе значення електромагнітні явища мають у кістковій тканині. Кістка являє собою складний композитний матеріал, що містить гідроксиапатит

та органічну основу, головним елементом якої є колаген. Колагенові нитки мають п'єзоелектричні характеристики, тобто можуть генерувати електричні потенціали під час механічного навантаження. При рухах чи фізичному навантаженні в кістковій тканині створюються локальні електричні поля, які стимулюють активність остеобластів та сприяють утворенню нової кістки. Таким чином, електромеханічні процеси суттєво впливають на перебудову та відновлення кістки [3].

Крім того, біотканини здатні взаємодіяти з електромагнітними хвилями різної частоти. Ця взаємодія супроводжується поглинанням енергії поля, що може викликати локальні зміни температури, орієнтацію молекул (поляризацію) та зміну електричних потенціалів. Подібні процеси використовуються у медичній діагностиці та лікуванні, наприклад, у магнітно-резонансній томографії, електротерапії та методах стимуляції відновлення тканин.

Розуміння електромагнітних властивостей біотканин має велике значення для розробки сучасних імплантатів. Якщо електрофізичні характеристики імплантату узгоджуються з навколишніми тканинами, це може позначитися на процесах приживлення матеріалу, прилипанні клітин та активності остеобластів. Тому при проектуванні біоматеріалів слід брати до уваги не лише механічні та біохімічні ознаки, а й електромагнітні параметри, які можуть визначати ефективність їхнього функціонування у взаємодії з біологічними структурами.

Взаємодія електромагнітного поля з біологічними тканинами є складною фізичною подією, яка залежить від електрофізичних характеристик середовища та параметрів самого поля, зокрема частоти, потужності та просторового розподілу. Людські біотканини є неоднорідними середовищами, що містять як провідні, так і діелектричні складові, що зумовлює багатогранний характер їхньої реакції на електромагнітне випромінювання.

Одним із головних механізмів взаємодії є індукування електричних струмів у тканинах під впливом змінного електромагнітного поля. Цей процес пов'язаний з електропровідністю біологічних субстанцій, яка залежить від вмісту іонів та води у тканинах. В результаті виникають провідні струми, які можуть

спричинити локальне поглинання енергії та зміну електричних параметрів тканин.

Іншим важливим механізмом є діелектрична поляризація, що виявляється у зміщенні заряджених частинок та вирівнюванні дипольних молекул (особливо молекул води) під дією електромагнітного поля. Цей процес супроводжується діелектричними втратами, що трансформують електромагнітну енергію у теплову [10].

Тепловий ефект є однією з ключових відмінностей взаємодії електромагнітного поля з біотканинами. Він проявляється у підвищенні температури тканин через поглинання електромагнітної енергії. Кількісно цей процес описується питомим коефіцієнтом поглинання енергії (SAR), який показує швидкість, з якою одиниця маси тканини поглинає енергію [11].

Характер взаємодії значною мірою залежить від частоти електромагнітного поля. У низькочастотному діапазоні домінують індуковані в тканинах провідні струми, тоді як у високочастотному та мікрохвильовому діапазонах ключову роль відіграють процеси діелектричних втрат та пов'язане з цим нагрівання [10].

Також важливим є ефект проникнення електромагнітного поля в біотканини, який визначається глибиною проникнення та залежить від електрофізичних властивостей середовища. Тканини з високою провідністю, як-от м'язова тканина, зазвичай мають меншу глибину проникнення порівняно з менш провідними середовищами, наприклад, жировою тканиною [10].

Отже, взаємодія електромагнітного поля з біологічними тканинами визначається сукупністю провідникових, діелектричних та теплових процесів, які, у свою чергу, залежать від параметрів поля та характеристик середовища. Розуміння цих механізмів є необхідною базою для подальшого моделювання електромагнітних процесів у біотканинах та аналізу впливу імплантатів на розподіл електромагнітного поля.

1.5 Особливості мікрохвильового випромінювання мм-діапазону

Діапазон хвиль у міліметрах (мм) охоплює частоти, що коливаються приблизно між 30 та 300 гігагерцами (ГГц), а довжини хвиль, що їм відповідають, становлять близько 1–10 мм. У межах цієї частини спектра електромагнітні поля виявляють певні особливості, які диктують, як вони взаємодіють із фізичними субстанціями та живими організмами, зокрема людськими тканинами та встановленими імплантатами. Згадані властивості значно розходяться з тими, що притаманні хвилям нижчих частот, і саме тому мм-область є значущою для проведення біофізичних оцінок та використання у медицині [12].

1.5.1 Фізичні властивості мм-випромінювання

Міліметровий діапазон електромагнітних хвиль вирізняється значною частотністю при одночасно невеликих довжинах хвиль. З цієї причини їхня взаємодія з речовиною зумовлена не лише тими класичними явищами, що притаманні низькочастотним радіохвилям, а й процесами, котрі пов'язані зі специфікою молекулярної та клітинної будови середовища. Щодо біологічних тканин та ізоляторів, ключовими моментами стають залежні від частоти параметри – питома діелектрична проникність (ϵ) та електропровідність (σ). Ці показники трансформуються при збільшенні частоти, що веде до активнішого засвоєння електромагнітної енергії в приповерхневих шарах об'єкта.

На фізичному рівні це має прояв у тому, що, проходячи крізь середовище, мм-випромінювання спричиняє вібраційні рухи та процеси релаксації дипольних молекул, зокрема молекул води. Як наслідок, частина енергії електромагнітного поля конвертується у теплову енергію, спричиняючи зміни у розташуванні та релаксаційному стані структур середовища. Подібна взаємодія є типовою для тих діелектричних матеріалів, які мають високий рівень діелектричної проникності, що є ознакою як живих тканин, так і багатьох біоматеріалів. [13].

1.5.2 Біологічні та біофізичні аспекти взаємодії

Специфіка застосування міліметрових хвиль у контексті живих систем полягає у тім, що енергія електромагнітного поля переважно поглинається поверхневими шарами біологічних матеріалів, не проникаючи глибше за міліметр (або навіть менше). Таке явище зумовлене високою здатністю водних складових біологічного середовища до накопичення енергії (високою діелектричною проникністю). Взаємодія коливань електромагнітного поля з молекулами води, які мають дипольний характер, а також з білковими комплексами та іонами у тканинах, може призводити не лише до виділення тепла, але й до потенційних біофізичних змін, котрі неможливо повністю пояснити лише нагрівальним ефектом від такого випромінювання [12].

Аналіз останніх наукових праць демонструє, що міліметрове випромінювання здатне модулювати функціональність клітинних ансамблів, якщо дотримані певні умови щодо частоти та рівня енергії. Йдеться, зокрема, про вплив на процеси функціонування іонних рецепторів та каскадів внутрішньоклітинної комунікації. Даний факт підкреслює багатогранність та складність процесу, як електромагнітне поле взаємодіє з об'єктами біологічного походження [14]

1.5.3 Спектральні характеристики

Будь-який об'єкт, чия температура перевищує абсолютний нуль, випромінює власне теплове електромагнітне поле. У міліметровому діапазоні потужність цього випромінювання значною мірою обумовлена діелектричними та структурними особливостями оточуючого середовища. Через це різні речовини, зокрема живі тканини та вживлені діелектричні пристрої, мають унікальні спектри випромінювання, що формуються їхніми фізико-хімічними показниками.

Подібні спектральні характеристики активно застосовуються у сучасних методах діагностики та сенсорики для визначення стану тканин та фіксації структурних модифікацій. Стосовно системи, що складається з «біотканини та імплантату», це відкриває шлях для визначення того, наскільки електромагнітні

властивості матеріалу імплантату відрізняються від властивостей природних органічних тканин.

1.5.4 Практичне значення для оцінки біосумісності

Через значну сприйнятливість міліметрових хвиль до змін фізико-хімічних умов довкілля, вони постають як перспективний метод для визначення придатності імпантованих матеріалів з погляду біосумісності. Якщо показники поглинання матеріалу суттєво збігаються з відповідними властивостями живих тканин, це може вказувати на їхню електромагнітну гармонійність із навколишнім біологічним полем. Це є важливим кроком для мінімізації локальних порушень електромагнітного поля, які потенційно можуть завадити природному відновленню та адаптації організму після введення імплантату.

Отже, зіставлення характеристик електромагнітного випромінювання біоматеріалів та тканин людського тіла у міліметровому діапазоні може слугувати доповненням до загальноприйнятих оцінок біосумісності, що базуються на механічних та біохімічних тестах [13].

Таким чином, застосування міліметрового спектру електромагнітного випромінювання для вивчення взаємодії «біотканина – діелектричний імплантат» є обґрунтованим, зважаючи на високу чутливість хвиль цієї частотної смуги до діелектричних властивостей та структурних аспектів середовища. Інтенсивне поглинання у поверхневих шарах, залежність характеристик випромінювання від складу речовини та здатність фіксувати специфічні спектральні ознаки дають змогу використовувати мм-діапазон для перевірки електромагнітної сумісності та загальної біосумісності матеріалів, призначених для імплантації.

1.6 Вплив низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання на біологічні системи

Електромагнітне випромінювання малої потужності (ЕМВМП) привертає значну увагу у сучасних біомедичних наукових розробках через його здатність впливати на живі процеси без спричинення суттєвого теплового ефекту. На

протидію високоенергетичному випромінюванню, де головним наслідком є нагрівання тканин, ЕМВМП має потенціал для модуляції функціонального стану клітин завдяки залученню витончених біофізичних механізмів [15].

Одна з ключових рис дії слабких електромагнітних хвиль полягає у їхньому зв'язку з клітинними оболонками. Оболонки містять білкові структури та іонні канали, чутливі до варіацій електричного поля. Під впливом ЕМВМП може змінюватися здатність оболонок пропускати іони кальцію, калію та натрію, що веде до зсуву мембранного потенціалу та ініціювання внутрішньоклітинних ланцюгів передачі сигналів. Це, своєю чергою, відбивається на клітинному поділі, спеціалізації та запрограмованій клітинній смерті [16].

Важливим елементом дії електромагнітного випромінювання низької інтенсивності є його вплив на взаємодію іонів та молекул у біологічних середовищах. Біологічні тканини містять чимало заряджених компонентів, полярних молекул та іонів, які здатні реагувати на зовнішні електромагнітні поля навіть при менших енергетичних рівнях. Як наслідок, можуть змінюватися локальні фізико-хімічні характеристики клітинного середовища та характер взаємодії між молекулами.

До числа основних механізмів належить зміна орієнтації дипольних молекулярних утворень, зокрема молекул води, які формують значну частину біологічних матриць. Під впливом електромагнітного поля відбувається переналаштування диполів та перебудова структури гідратаційних шарів навколо клітинних білків, іонів та біомолекул. Оскільки саме водне середовище диктує умови для переважної більшості біохімічних реакцій, навіть мінорні зміни у його структурі здатні впливати на функціональну активність клітини.

Подібні процеси можуть спричиняти зміни активності ензимів, темпів біохімічних перетворень та ефективності перенесення субстанцій через клітинні бар'єри. Особливо вразливими до електромагнітного впливу є ферментні системи та білкові комплекси, залучені до регулювання клітинного обміну речовин, генерації енергії та передачі сигналів між клітинами [17]. Отже, електромагнітне

поле може опосередковано впливати на загальний функціональний стан усього біологічного субстрату.

Крім того, модифікація структури водного середовища та його гідратаційних оболонок може позначитися на стійкості великих молекул, просторовому розташуванні білків та ефективності взаємодії між окремими елементами клітини. Це має вирішальне значення для тих систем, чия функціональна спроможність залежить від тонкого просторового облаштування молекулярних структур.

Окрема увага приділяється впливу ЕМВМП на спадковий апарат клітини. Сучасні дослідження свідчать, що електромагнітні поля здатні впливати на активність генів, зокрема тих, що кодують білки, пов'язані із ростом клітин, відповіддю на запалення, пристосуванням до стресових умов та процесами відновлення тканин [18].

Припускається, що такий вплив реалізується через модифікацію активності внутрішньоклітинних сигнальних шляхів, рівня концентрації іонів кальцію, окисно-відновного стану клітини та роботи рецепторів на поверхні мембран. В результаті цього може відбуватися активація чи пригнічення певних генів, що визначають реакцію клітини на зовнішні фізичні чинники.

Особливий інтерес постає перед можливістю стимуляції генів, залучених у процеси регенерації та синтезу структурних білків. Це відкриває горизонти для застосування електромагнітних полів у галузі відновлювальної медицини, інженерії тканин та біомедичних технологій з метою цілеспрямованого управління клітинною активністю.

Водночас, механізми такого впливу залишаються багатогранними і досі не до кінця з'ясованими, оскільки реакція живих систем залежить від численних параметрів: частоти електромагнітного поля, його потужності, тривалості експозиції, типу тканини та поточного функціонального стану клітин. Саме тому наукові пошуки у сфері молекулярних механізмів взаємодії електромагнітного випромінювання з біологічними структурами зберігають свою актуальність у сучасній біофізиці та біомедичній інженерії.

У контексті відновлювальної медицини ЕМВМП розглядається як один із факторів, здатних позитивно впливати на хід репаративних процесів у біологічних тканинах. Дослідження демонструють, що електромагнітні поля в міліметровому діапазоні можуть змінювати функціональну активність клітин, регулювати інтенсивність зв'язку між клітинами та впливати на швидкість загоєння пошкоджених структур. Це викликає підвищений інтерес у сфері відновлення кісткової тканини та біоінженерії, де критичне значення має узгодження фізичних характеристик імплантату з біологічним оточенням організму.

Встановлено, що низькоінтенсивне електромагнітне випромінювання може:

- стимулювати проліферацію остеобластів;
- підвищувати синтез колагену;
- активувати формування кісткової матриці;
- сприяти утворенню нових кровоносних судин [19].

Вважається, що такий ефект зумовлений здатністю електромагнітних хвиль трансформувати проникність оболонок клітин, впливати на переміщення іонів кальцію та регулювати роботу сигнальних механізмів усередині клітин. Як наслідок, прискорюються процеси обміну речовин на клітинному рівні, нарощується виробництво білків, необхідних для побудови, та стимулюється утворення свіжої тканини у місці відновлення.

Особливої уваги заслуговує вплив на формування кісток, адже електромагнітна стимуляція здатна пришвидшити перетворення клітин на кісткову тканину і посилити якість створення речовини, що знаходиться між клітинами.

Окрім сприятливих наслідків, необхідно зважати й на можливі небезпеки, які несе дія електромагнітних полів на живі системи. Затяжний або некерований вплив може спричинити порушення рівноваги клітинного середовища, змінити функціонування каналів для іонів, надмірно активувати сигнальні ланцюги та змінити робочий стан клітин. У певних ситуаціях це може мати наслідком

виникнення місцевого напруження тканин або розладу звичайного керування клітинними процесами.

Отже, при проектуванні біоматеріалів та медичних приладів критично важливо скрупульозно відслідковувати параметри випромінювання, а саме: частоту, потужність та час впливу електромагнітного поля [12]. Значення має не просто факт наявності випромінювання, але й наскільки його показники збігаються з тими електромагнітними умовами, що властиві біологічному оточенню.

Ключовим моментом є синхронізація електромагнітних властивостей імплантату з характеристиками тканин, що його оточують. Якщо параметри випромінювання й поглинання наближені до природних для організму, це сприяє утворенню сталої електромагнітної обстановки, яка підтримує належний хід фізіологічних функцій. За таких обставин знижується ризик виникнення локальних невідповідностей у розподілі енергії та збоїв у процесах пристосування тканини до вживленого матеріалу.

Натомість, якщо електромагнітні ознаки імплантату суттєво різняться від таких у біотканинах, це може спричинити виникнення локально незбалансованого електромагнітного поля, яке здатне впливати на хід відновлення, життєдіяльність клітин та успішність злиття імплантату з біологічним середовищем [13].

З огляду на це, слабе електромагнітне випромінювання являє собою суттєвий фізичний чинник, який може не тільки стимулювати, а й змінювати біологічні процеси у тканинах. Його врахування під час вивчення біоматеріалів та конструювання імплантатів дає змогу підвищити результативність регенерації, удосконалити умови вбудовування імплантованих структур і закласти підвалини для розробки нових методик у галузі відновлювальної медицини та цілеспрямованої біомедичної терапії [12].

ВИСНОВОК ДО 1 РОЗДІЛУ

У першому розділі увага зосереджена на актуальних методах застосування імплантованих біоматеріалів у відновлювальній медицині, а також на їхній класифікації, характеристиках та засадах взаємодії з живими тканинами. Встановлено, що матеріали, призначені для регенерації кісткової та м'яких тканин, поділяються на три головні категорії: натуральні, синтетичні та комбіновані, кожна з яких має свої переваги та недоліки стосовно біологічної ефективності та клінічного використання.

Аналіз натуральних матеріалів виявив їхню високу сумісність з організмом та здатність стимулювати формування кісткової тканини; проте, були помічені обмеження, пов'язані з дефіцитом матеріалу-донора та ризиками додаткових хірургічних втручань. Синтетичні біоматеріали, зокрема ті, що базуються на фосфатах кальцію та гідроксиапатиті, надають можливість контролювати механічні та структурні параметри, що дозволяє припасувати їх до специфічних клінічних завдань. Композитні засоби інтегрують переваги обох груп, забезпечуючи баланс між міцністю, біосумісністю та потенціалом стимулювання процесів відновлення.

Особливу увагу приділено фізичним аспектам поверхні імплантатів, які грають ключову роль у процесах прикріплення клітин, їхнього росту та спеціалізації. З'ясовано, що рельєф, пористість та електрофізичні властивості матеріалу суттєво позначаються на швидкості та якості злиття імплантату з оточуючими тканинами.

Продемонстровано, що взаємодія імплантатів з організмом не обмежується лише механічними та біохімічними взаємодіями, а охоплює також електромагнітні феномени. Біологічні тканини та діелектричні речовини за температури тіла здатні генерувати слабе електромагнітне випромінювання, яке може впливати на активність клітин, процеси перенесення іонів та регенерацію тканин. Це наголошує на важливості врахування електрофізичних характеристик матеріалів на етапі їх розробки.

Розглянуто методи електромагнітного визначення характеристик біотканин, зокрема системи вимірювань з одним та двома портами, а також застосування S-параметрів для аналізу взаємодії електромагнітних хвиль із біологічними структурами. Зроблено висновок, що двопортові методи надають більше інформації для розрізнення тканин та оцінки їхніх електромагнітних властивостей.

Окремо проаналізовано електромагнітні властивості біологічних тканин, які зумовлені їхньою складною архітектурою, вмістом води, іонів та біополімерів. Встановлено, що ці властивості залежать від частоти та значно впливають на поглинання, випромінювання та поширення електромагнітних хвиль у тканинах.

Також вивчено особливості електромагнітних хвиль у міліметровому діапазоні та їхню взаємодію з біологічними середовищами. Показано, що випромінювання мм-діапазону високочутливе до діелектричних властивостей тканин і може бути використане як діагностичний інструмент та для оцінки біосумісності матеріалів.

Додатково було досліджено вплив низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання на біологічні системи, зокрема його здатність модифікувати клітинні процеси, впливати на іонні канали, експресію генів та стимулювати відновлення тканин.

Отже, у першому розділі сформовано цілісне розуміння фізико-біологічних засад взаємодії імплантатів із живими тканинами, що охоплює як традиційні біомедичні підходи, так і електромагнітні механізми контакту. Отримані результати закладають теоретичний фундамент для подальшого аналізу електромагнітних процесів у системі "імплантат–біотканина" та для створення моделей їхньої енергетичної взаємодії.

РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ З БІОТКАНИНАМИ ЛЮДИНИ

2.1 Фізична модель біотканини як джерела теплового електромагнітного випромінювання

Тканини біологічного походження — це комплексні, багатокомпонентні та різномірні системи, що містять водний розчин, іони, клітинні елементи, біополімери та інтерстиціальну рідину. На рівні будови це не однорідна субстанція, а скоріше ієрархічний конгломерат, де можна виділити рівні організації: молекулярний, клітинний та тканинний. Кожному з цих рівнів властиві свої механізми електромагнітної взаємодії, проте всі вони пов'язані спільною тепловою картиною та розподілом електричних зарядів.

Розглядаючи з позицій електрофізики, біотканина цілком коректно описується як втратний, неоднорідний діелектрик, де паралельно реалізуються два головні процеси: акумулювання енергії через поляризацію та її розсіювання внаслідок провідності. Поляризація охоплює як орієнтацію диполів води, так і деформацію електронних хмар та зміщення іонних скупчень. Провідність, натомість, забезпечується міграцією як вільних, так і зв'язаних іонів у просторі між клітинами. Саме взаємне протистояння цих двох явищ визначає частотну залежність електромагнітного відгуку тканини.

Важливо усвідомлювати, що біотканина функціонує як відкрита системи в термодинамічному розумінні, неминуче обмінюючись енергією з оточенням. Через це її внутрішній стан жодним чином не є станом рівноваги у класичному розумінні; натомість він характеризується напівстаціонарними коливаннями параметрів, як-от температура, локальне опортівості та електричний потенціал.

На найдрібнішому, мікроскопічному рівні, першоджерелом електромагнітної активності є тепловий рух заряджених частинок. У біотканинах присутні такі іони, як Na^+ , K^+ , Cl^- , а також великі кількості заряджених фрагментів протеїнів та мембранних структур. Їхня рухливість у водному середовищі є випадковою, хоча й не абсолютно незалежною, оскільки вона

обмежується просторовим оформленням тканини та електростатичними взаємодіями.

Цей рух породжує постійні збурення у локальній концентрації зарядів та потоках струму. У кожній мікрзоні тканини миттєво виникають електричні диполі та мікроструми, які хаотично змінюються з часом. Саме ці явища слугують первинним фізичним підґрунтям для теплового електромагнітного випромінювання біологічних об'єктів.

Окремо варто підкреслити, що вода, яка становить значну частину біотканини, відіграє вирішальну роль у формуванні її електромагнітних властивостей. Молекули H_2O мають виражений дипольний момент, а отже, навіть незначні температурні коливання спричиняють їхню орієнтаційну перебудову. Це вносить додатковий внесок у коливання електричного поля, особливо у високочастотних діапазонах, зокрема ГГц.

Більше того, клітинні мембрани виступають як локальні бар'єри, на поверхнях яких формуються поверхневі заряди та утворюються подвійні електричні шари. Такі структури є джерелами міжфазної поляризації, що суттєво впливає на релаксаційні характеристики тканини. Як наслідок, система демонструє широкий діапазон характерних часових констант релаксації, що зумовлює її багаточастотну та складну електромагнітну реакцію.

З погляду статистичної фізики, ці явища можна трактувати як накладення величезної кількості випадкових джерел електромагнітного поля. Кожен маленький об'єм тканини поводить себе як мікроскопічний емітер, а загальне поле є результатом їхньої суперпозиції. Завдяки величезній кількості таких джерел формується стаціонарний електромагнітний шум, чий спектральні ознаки визначаються температурою та внутрішньою архітектурою середовища.

Проте цей шум не є абсолютно некорельованим чи "білим". Завдяки наявності тканинної структури, зв'язків між клітинами та градієнтів іонів виникають певні просторово-часові співвідношення. Це означає, що коливання у різних ділянках тканини можуть бути статистично взаємопов'язаними, що

призводить до відхилення спектру випромінювання від ідеалізованої моделі абсолютно незалежного процесу.

Якщо розглядати енергетичний аспект, біотканину можна уявити як систему, що розсіює енергію, де теплова енергія безперервно трансформується в електромагнітне випромінювання. Частина енергії, що надходить у систему або утворюється в ній завдяки метаболізму, розсіюється у формі теплового шумового поля.

Для кількісного опису цього процесу використовується порівняння з еталонною моделлю абсолютно чорного тіла, яке є ідеальним випромінювачем:

$$P_{\text{бт}} = \beta_{\text{бт}} P_{\text{АЧТ}} \quad (2.1)$$

де $P_{\text{бт}}$ – інтегральна потужність випромінювання біотканини, $P_{\text{АЧТ}}$ – потужність абсолютно чорного тіла при тій самій температурі, а $\beta_{\text{бт}}$ – коефіцієнт випромінювальної здатності.

Фізичний зміст коефіцієнта $\beta_{\text{бт}}$ полягає в тому, що він узагальнює всі механізми відхилення реальної системи від ідеального випромінювача. Зокрема, він враховує:

- електропровідність середовища та втрати на джоулеве нагрівання;
- дипольну та іонну поляризацію;
- структурну неоднорідність тканини;
- релаксаційні процеси різних масштабів часу;
- вплив водного середовища як основного носія дипольних коливань.

З погляду фізики, показник $\beta_{\text{бт}}$ вказує, наскільки вдало внутрішня теплова енергія перетворюється на випромінювання. Коли у середовищі зростають втрати, спостерігається посилення коливань (флуктуацій) струмів і дипольних моментів, що, своєю чергою, викликає наростання електромагнітного шуму.

Ключовим моментом є те, що ця модель не можна спрощувати до звичайного теплового випромінювання у класичному його розумінні. Біологічна тканина функціонує як об'єкт із розподіленими джерелами, де електромагнітне випромінювання формується внаслідок одночасної роботи безлічі

мікроскопічних процесів, які є як незалежними, так і частково взаємопов'язаними.

Таким чином, біотканину слід сприймати як динамічне, дисипативне середовище, що випромінює електромагнітні хвилі статистичного характеру. Саме ця ознака перетворює її з простого пасивного елемента на активного учасника електромагнітної взаємодії у парі "імплантат – біотканина".

2.2 Теплове електромагнітне випромінювання біологічних систем

Живі тканини відносяться до класу відкритих термодинамічних систем, що безперервно взаємодіють із довкіллям шляхом обміну енергією, масою та ентропією. Описати їхній фізичний стан лише макроскопічною температурою неможливо, оскільки всередині таких систем постійно відбуваються мікроскопічні електродинамічні явища, пов'язані з рухом заряджених частинок та змінами у локальних електричних полях.

На мікроскопічному рівні біотканина є складною електрохімічною сумішшю, що включає водні електроліти, клітинні оболонки, внутрішньоклітинні структури та біополімери з різними електричними характеристиками. Усі ці елементи утворюють просторово неоднорідне середовище, де електричні заряди розподілені нерівномірно і можуть осідати або переміщуватися у певних точках.

Тепловий рух заряджених частинок завжди викликає у тканині коливання електричного потенціалу. Ці збурення зумовлені хаотичними зіткненнями іонів, вібрацією молекул та перебудовою водневих зв'язків у водній основі. Як наслідок, у будь-якому невеликому об'ємі тканини виникають тимчасові електричні диполі та мікроструми, які змінюються у часі випадковим чином.

Якщо розглядати це з позицій електродинаміки, кожен такий найменший об'єм можна трактувати як мікроскопічне джерело електромагнітного випромінювання. Це випромінювання не є впорядкованим сигналом, а скоріше набором випадкових коливань, чийі параметри диктуються місцевою температурою та електрофізичними властивостями оточення.

Об'єднання великої кількості таких мікроджерел формує загальне електромагнітне поле тканини. Це поле має шумовий характер і охоплює широкий частотний діапазон — від повільних коливань іонних процесів до швидких збурень, спричинених рухом водних молекул та біомолекул.

Важливою особливістю біологічних систем є те, що їхнє випромінювання не є абсолютно некорельованим. Між клітинами існують електрохімічні сполучення, потенціали мембран та градієнти іонів, які сприяють частковій синхронізації або взаємозв'язку локальних збурень. Це призводить до утворення нерівномірного шуму, чий спектр відрізняється від звичайного "білого шуму".

Додаткову складність спектру надає вода як основний компонент живої тканини. Її молекули мають помітний дипольний момент і демонструють широкий спектр процесів релаксації. Орієнтаційна поляризація молекул води, а також зміна водневих зв'язків спричиняють частотно-залежні втрати, що прямо впливають на характеристики електромагнітного випромінювання.

Клітинні оболонки та поверхні розділу фаз слугують додатковими осередками релаксаційних процесів. На цих межах формуються електричні подвійні шари, здатні акумулювати заряд і повільно його вивільняти. Це породжує низькочастотні складові електромагнітного спектра, які є характерними саме для біологічних середовищ.

Відтак, тепле електромагнітне випромінювання біотканин є багат шаровим явищем: воно утворюється через накладання швидких мікроскопічних збурень і повільніших структурних змін, що відбуваються на різних часових інтервалах.

З точки зору статистичної фізики, таку систему можна описати як сукупність величезної кількості випадкових генераторів, що створюють електромагнітні сигнали з різними часовими зв'язками. В результаті, загальне поле має складну спектральну густину, яка залежить не тільки від температури, але й від внутрішньої організації середовища.

Для ідеалізованого випадку, коли система наближається до стану локальної рівноваги, середня потужність теплового випромінювання в частотній смузі Δf визначається співвідношенням:

$$P_{\text{АЧТ}} = kT\Delta f \quad (2.2)$$

де k – стала Больцмана, T – абсолютна температура системи, Δf – ширина частотної смуги.

Цей вираз відображає фундаментальний зв'язок між енергією тепла та потужністю електромагнітних хвиль, що коливаються: вища температура спричиняє посилення розмаху хаотичних переміщень заряджених елементів, що, своєю чергою, веде до підвищення рівня генерації випромінювання.

Проте, у дійсності, живі тканини демонструють значні розбіжності із цим спрощеним уявленням. Спричинено це низкою чинників: наявністю структурної нерівномірності, властивістю провідності іонів, залежністю діелектричної проникності від частоти, а також складністю процесів релаксації, які відбуваються у водному середовищі та біополімерних сполуках.

Як наслідок, лише певна частка накопиченої теплової енергії трансформується у вигляд електромагнітного випромінювання. Щоб це врахувати, запроваджується коефіцієнт здатності до випромінювання, позначений як β , який вносить корективи до ідеальної моделі.:

$$P = \beta kT\Delta f \quad (2.3)$$

де β характеризує ефективність перетворення внутрішньої енергії середовища у електромагнітне випромінювання.

Параметр β , якщо розглядати його з фізичної точки зору, дає уявлення про рівень "електромагнітної жвавості" оточуючого середовища. Його величина обумовлена такими чинниками, як електрична провідність, здатність до накопичення електричного поля (діелектрична проникність), вміст вологи, особливості переміщення заряджених частинок (іонний транспорт), а також характер процесів згасання коливань (релаксаційні процеси). Ступінь заплутаності внутрішньої архітектури матерії визначає більшу розбіжність у розподілі мікроскопічних полів, що, своєю чергою, призводить до розширення діапазону частот випромінювання.

Слід підкреслити, що теплова еманція біологічних матерій не є сталою ні у просторі, ні в часі. Оскільки окремі зони тканини здатні локально демонструвати відмінні температурні показники та електрофізичні властивості, загальний реєстрований відгук постає як накладення (суперпозиція) численних локальних внесків.

Внаслідок цього сукупне електромагнітне поле набуває заплутаної часової будови, яка не зводиться до звичайних гармонійних коливань, а постає як багатоскладовий випадковий процес із широким діапазоном кореляційних зв'язків.

З погляду енергетики теплове випромінювання являє собою спосіб часткового переходу внутрішньої енергії системи у форму зовнішнього електромагнітного поля. При цьому ключовим є те, що це випромінювання не є побічним явищем, а невід'ємним складником термодинамічного стану будь-якої відкритої біологічної системи.

Таким чином, біологічна тканина функціонує як енергійне випадкове джерело електромагнітного випромінювання, чиї характеристики задаються температурою, рівнем структурного упорядкування та внутрішніми процесами релаксації в цьому середовищі.

2.3 Закон Кірхгофа для електромагнітного випромінювання біотканин

У роботах, присвячених аналізу тепловіддачі електромагнітного випромінювання від біологічних об'єктів, вирішальне значення має застосування принципу Кірхгофа. Цей принцип визначає нерозривний зв'язок між здатністю субстанції асимілювати електромагнітну енергію та її здатністю цю енергію емітувати. У рамках класичних фізичних уявлень цей закон формулюється для систем, які досягли термодинамічної рівноваги, проте коли йдеться про біологічні структури, його імплементація вимагає обліку локального та квазістаціонарного стану рівноваги.

Жодна біотканина чи штучно введений матеріал не являють собою ідеально збалансованих систем, адже вони безперервно піддаються впливу ендогенних

метаболических реакций, ruchu ионов та теплових коливань. Проте, якщо розглядати доволі невеликі просторові та часові інтервали, можливо запровадити концепцію локальної термодинамічної злагоди, де електромагнітні параметри оточення змінюються значно повільніше, ніж відбувається релаксація самого електромагнітного поля.

Використовуючи таке наближення, закон Кірхгофа дозволяє трактувати кожен мікроскопічний об'єм біотканини як середовище, що перебуває у квазі-рівновазі, де встановлюється гармонія між поглинанням та випромінюванням електромагнітної енергії. Це прямо свідчить про те, що інтенсивність випромінювання самої системи є безпосередньо пропорційною її коефіцієнту поглинання.

З погляду фізики, даний висновок є прямим наслідком детального балансу процесів на мікрорівні: будь-який акт захоплення електромагнітної енергії зарядженими компонентами неминуче супроводжується протилежним явищем — емісією, яка спричинена тепловими флуктуаціями цих самих компонентів. Таким чином, випромінювання та поглинання в умовах рівноваги виступають як нерозривно пов'язані прояви однакових мікрофізичних механізмів.

У біологічних середовищах цей баланс ускладнюється через наявність численних механізмів втрат. До них належать рух іонів у водному розчині, дипольна орієнтація молекул води, процеси релаксації біополімерів, а також ефекти на межах фаз клітинних мембран. Кожен із цих шляхів має свій визначений час повернення до рівноваги і неоднаково впливає на залежність поглинання від частоти.

У результаті біотканина демонструє складну частотно-залежну електромагнітну відповідь, яка не може бути описана одним параметром. Саме тому для узагальненого опису вводиться коефіцієнт випромінювальної здатності β , який інтегрує ефекти всіх мікроскопічних процесів у єдиний макроскопічний параметр.

У рамках цього підходу випромінювальні властивості біотканини та імплантату можуть бути записані у вигляді:

$$\beta_{\text{бт}} = \frac{P_{\text{бт}}}{P_{\text{АЧТ}}} \quad (2.4)$$

$$\beta_{\text{імп}} = \frac{P_{\text{імп}}}{P_{\text{АЧТ}}} \quad (2.5)$$

де $P_{\text{бт}}$ і $P_{\text{імп}}$ – інтегральні потужності теплового електромагнітного випромінювання відповідних середовищ, а $P_{\text{АЧТ}}$ – еталонне значення для абсолютно чорного тіла при тій самій температурі.

Нормування через абсолютно чорне тіло має принципове значення, оскільки дозволяє порівнювати різні матеріальні середовища в єдиній енергетичній шкалі незалежно від їх хімічного складу, структури чи агрегатного стану. Таким чином, β стає універсальним безрозмірним параметром, що характеризує ступінь відхилення реального середовища від ідеального випромінювача.

З позиції мікрофізики коефіцієнт β відображає баланс між механізмами поглинання та генерації електромагнітного поля. Якщо в середовищі домінують дисипативні процеси, пов'язані з втратами енергії на іонний рух та релаксацію поляризації, то зростає інтенсивність теплових флуктуацій, що безпосередньо впливає на рівень випромінювання.

Важливо, що для біологічних систем ідея локальної рівноваги має ключове значення. Через просторову неоднорідність тканини різні її ділянки можуть мати різні значення β та температури, тому система в цілому описується як сукупність великої кількості локально рівноважних елементів. Кожен з них генерує власне випромінювання, а сумарне поле формується як їх статистична суперпозиція.

У цьому контексті закон Кірхгофа виступає не як глобальне обмеження, а як локальний принцип балансу енергії, який виконується в кожному малому об'ємі тканини або імплантату. Це дозволяє перейти від макроскопічного опису до розподіленої моделі електромагнітного середовища.

З точки зору системи “імплантат – біотканина” цей закон має особливе значення, оскільки обидва компоненти можуть розглядатися як взаємопов'язані випромінювальні середовища з різними значеннями β . Внаслідок цього між ними виникає різниця в інтенсивності теплового випромінювання навіть за однакової температури.

Таким чином, саме відмінність у випромінювальних властивостях, а не лише температурний градієнт, визначає характер електромагнітної взаємодії між біотканиною та імплантатом. Це створює основу для подальшого аналізу енергетичного обміну та формування узагальнених моделей взаємодії.

2.4 Модель Найквіста–Больцмана для біотканин та імплантату

Електромагнітне випромінювання біологічних середовищ та імплантованих матеріалів доцільно розглядати як прояв внутрішніх термодинамічних флуктуацій, які мають статистичну природу. У такому підході система не описується як детерміноване джерело сигналу, а інтерпретується як ансамбль випадкових мікроскопічних процесів, що формують сумарне електромагнітне поле.

У біотканинах ці процеси зумовлені тепловим рухом заряджених частинок: іонів міжклітинної рідини, електрично активних фрагментів біомолекул та полярних молекул води. У результаті постійних зіткнень і перебудов локальної структури середовища виникають випадкові флуктуації електричного струму, які є первинним джерелом електромагнітного шуму.

Аналогічні фізичні механізми реалізуються і в імплантованих матеріалах, однак їх характер визначається електропровідністю, структурною однорідністю та типом втратних процесів у конкретному матеріалі. Таким чином, і біотканина, і імплантат можуть бути розглянуті як незалежні стохастичні джерела теплового електромагнітного випромінювання.

У класичній теорії електромагнітних шумів та статистичної фізики такий процес описується через підхід Найквіста–Больцмана, який встановлює прямий зв'язок між температурою системи та середньою потужністю її флуктуацій у заданій частотній смузі. Температура в цьому випадку виступає мірою середньої енергії хаотичного руху заряджених частинок.

Для ідеалізованої системи, що наближається до моделі абсолютно чорного тіла, середня потужність теплового електромагнітного випромінювання в смузі частот Δf визначається як:

$$P_{\text{АЧТ}} = kT\Delta f \quad (2.6)$$

де k – стала Больцмана, T – абсолютна температура, Δf – ширина частотної смуги.

Цей вираз має фундаментальний фізичний зміст: він відображає той факт, що кожен ступінь свободи термодинамічної системи при ненульовій температурі є джерелом енергії теплових флуктуацій. У випадку електромагнітного поля ці флуктуації проявляються як випадкові коливання струмів і напруженості поля.

Однак реальні біологічні тканини не є ідеальними випромінювачами, оскільки їх електромагнітна поведінка визначається складною внутрішньою структурою. Наявність іонної провідності, частотно-залежної діелектричної проникності, релаксаційних процесів у водному середовищі та мембранних ефектів призводить до значних відхилень від ідеальної моделі.

З фізичної точки зору ці відхилення означають, що лише частина теплової енергії системи переходить у форму електромагнітного випромінювання, тоді як інша частина розсіюється через внутрішні дисипативні процеси. Для врахування цього вводиться коефіцієнт випромінювальної здатності β , який модифікує ідеальне співвідношення:

$$P_{\text{бт}} = \beta_{\text{бт}} kT_1 \Delta f \quad (2.7)$$

$$P_{\text{імп}} = \beta_{\text{імп}} kT_2 \Delta f \quad (2.8)$$

де $\beta_{\text{бт}}$ і $\beta_{\text{імп}}$ – коефіцієнти випромінювальної здатності відповідно біотканини та імплантату, T_1 і T_2 – їх термодинамічні температури.

Отже, параметр β виконує роль узагальненого мікрофізичного коефіцієнта, який інтегрує вплив усіх втратних і релаксаційних механізмів у середовищі. Він відображає не лише здатність матеріалу випромінювати енергію, але й характер її внутрішнього перерозподілу між різними ступенями свободи.

З точки зору статистичної фізики, система “біотканина – імплантат” може бути представлена як сукупність двох незалежних шумових генераторів, кожен з яких характеризується власними значеннями β та температури. Їхні

випромінювання не є детермінованими сигналами, а являють собою випадкові процеси з певною спектральною густиною потужності.

Сумарне електромагнітне поле в такій системі формується як результат накладання двох стохастичних внесків. При цьому важливо, що навіть у разі рівності температур обох середовищ їх випромінювання може відрізнятися через різні значення β , що підкреслює ключову роль матеріальних властивостей у формуванні електромагнітного шуму.

З енергетичної точки зору дана модель дозволяє перейти від опису окремих мікропроцесів до узагальненої характеристики системи через параметри температури та випромінювальної здатності. Це створює основу для подальшого аналізу асиметрії енергетичного обміну між біотканиною та імплантатом у наступних підрозділах.

Отже, модель Найквіста–Больцмана забезпечує статистичний зв'язок між тепловими процесами та електромагнітним випромінюванням у біологічних середовищах і дозволяє описувати їх як джерела стохастичного електромагнітного шуму, параметри якого визначаються температурою та мікроструктурою матеріалу.

2.5 Енергетична модель взаємодії “імплантат – біотканина”

Біотканина та імплантат у межах електромагнітної взаємодії розглядаються як два складні дисипативні середовища, кожне з яких характеризується власним термодинамічним станом та внутрішньою структурною організацією. Їхня взаємодія не може бути описана як класичний контакт двох “пасивних” тіл, оскільки обидва компоненти системи постійно генерують теплове електромагнітне випромінювання, яке має статистичну природу та залежить від мікроскопічних процесів у матеріалі.

Ключовими параметрами, що визначають електромагнітну поведінку кожного середовища, є температура та коефіцієнт випромінювальної здатності β . Якщо температура визначає загальний енергетичний рівень теплових флуктуацій, то коефіцієнт β узагальнює електрофізичні властивості матеріалу,

включаючи механізми втрат, характер поляризації, провідність та структурну неоднорідність.

Завдяки наявності внутрішніх дисипативних процесів обидва середовища не перебувають у стані ідеальної рівноваги, а постійно генерують стохастичні електромагнітні поля. У біотканині ці процеси посилюються за рахунок високої концентрації води, іонної провідності та складної клітинної архітектури. В імплантаті ж характер випромінювання визначається матеріальною однорідністю, типом діелектрика або провідника та рівнем внутрішніх втрат.

При просторовому контакті біотканини та імплантату відбувається накладання їхніх електромагнітних полів. Це накладання не є простим додаванням у класичному сенсі, оскільки поля є корельованими стохастичними процесами, які взаємодіють через спільну граничну область. У результаті формується складна просторово-часова структура сумарного електромагнітного поля, яка залежить як від внутрішніх параметрів кожного середовища, так і від умов їхнього контакту.

Для кількісного опису енергетичного балансу системи вводиться узагальнений параметр енергетичної взаємодії:

$$\Delta P = k\Delta f(\beta_{\text{імп}}T_{\text{імп}} - \beta_{\text{бт}}T_{\text{бт}}) \quad (2.9)$$

де k – стала Больцмана, Δf – ширина частотної смуги, $\beta_{\text{бт}}$ – коефіцієнт випромінювальної здатності біотканини, T_1 – термодинамічна температура біотканини, $\beta_{\text{імп}}$ – коефіцієнт випромінювальної здатності імплантату, T_2 – термодинамічна температура імплантату.

Після введення параметра енергетичної взаємодії система “імплантат – біотканина” може бути описана через три характерні режими, які відображають різні стани енергетичного балансу між компонентами. Ці режими не є жорстко відокремленими, а утворюють безперервний континуум можливих станів, що визначається зміною температурних параметрів та коефіцієнтів випромінювальної здатності β .

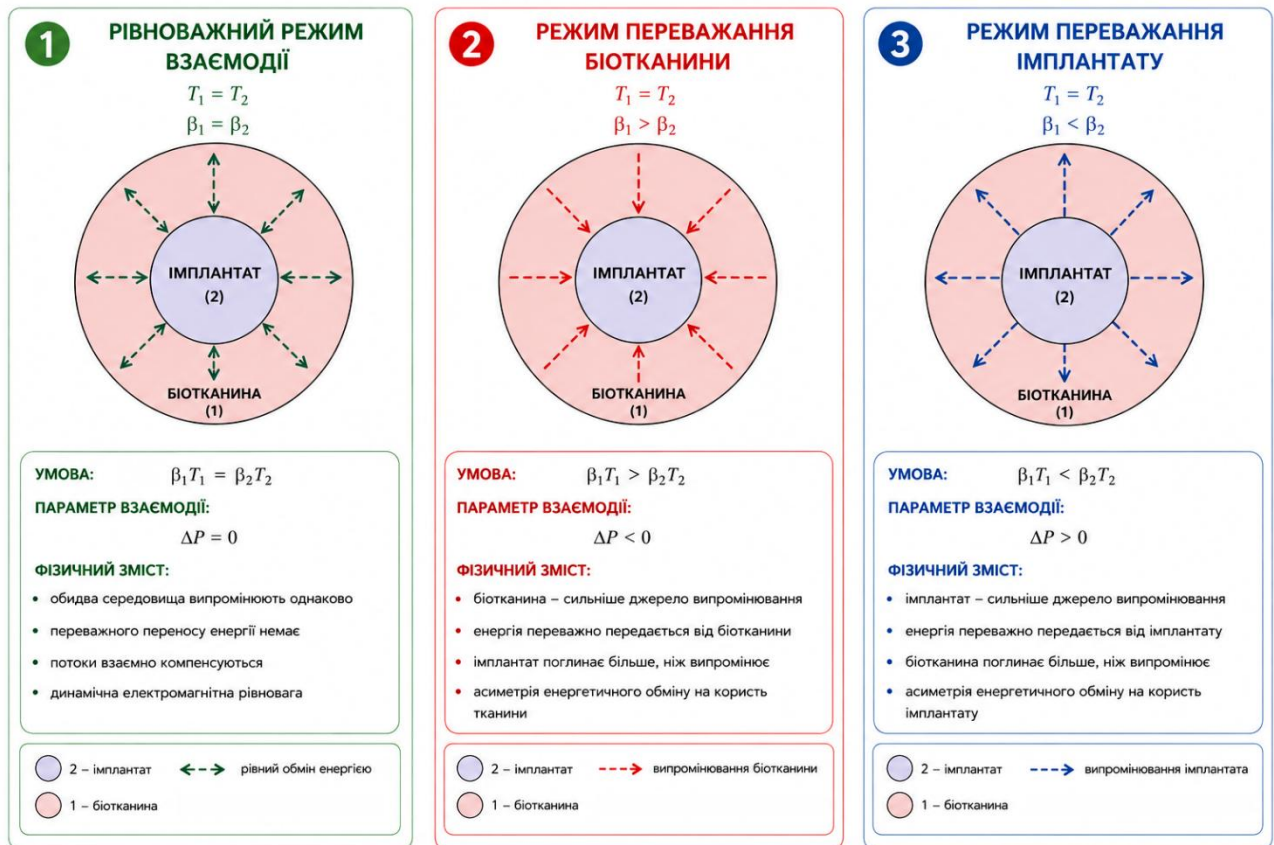


Рис. 2.1 – Три моделі взаємодії між біотканиною та імплантатом

1. Рівноважний режим взаємодії

Рівноважний режим взаємодії між імплантатом і біотканиною реалізується за умови узгодження їхніх енергетичних характеристик, коли інтенсивності теплового електромагнітного випромінювання обох середовищ стають однаковими. Математично ця умова описується співвідношенням:

$$\beta_{\text{імп}} T_{\text{імп}} = \beta_{\text{бт}} T_{\text{бт}} \quad (2.10)$$

За цієї умови параметр енергетичної взаємодії набуває нульового значення:

$$\Delta P = 0 \quad (2.11)$$

Це означає, що сумарний енергетичний обмін між біотканиною та імплантатом у середньому компенсується, і не виникає переважного напрямку переносу теплового електромагнітного випромінювання. Обидва середовища генерують електромагнітне поле однакової статистичної інтенсивності в заданій частотній смузі, що забезпечує енергетичну симетрію системи.

З фізичної точки зору такий стан не слід розглядати як повну відсутність взаємодії. Навпаки, система перебуває у стані динамічної статистичної рівноваги, в якій постійно відбуваються мікроскопічні флуктуаційні процеси випромінювання та поглинання енергії. Однак ці процеси є взаємно врівноваженими, тому їхній сумарний макроскопічний ефект дорівнює нулю.

У такому режимі кожен елемент системи — як біотканина, так і імплантат — виступає одночасно і як джерело, і як приймач теплового електромагнітного випромінювання. При цьому відсутній домінуючий потік енергії, а електромагнітне поле в області контакту формується як результат суперпозиції двох статистично еквівалентних внесків.

Важливою особливістю рівноважного режиму є його чутливість до найменших змін параметрів середовища. Навіть незначне відхилення температури або зміна електрофізичних властивостей (зокрема провідності, діелектричної проникності чи структурної організації тканини) призводить до порушення балансу та переходу системи в один із нерівноважних режимів.

З точки зору енергетичної інтерпретації, рівноважний стан відповідає мінімуму різниці потужностей випромінювання між компонентами системи. Це робить його найбільш узгодженим режимом взаємодії, в якому відсутні спрямовані енергетичні потоки, здатні змінювати локальний стан одного з середовищ.

Таким чином, рівноважний режим можна розглядати як базовий еталонний стан системи “імплантат – біотканина”, відносно якого аналізуються всі інші можливі режими енергетичної взаємодії.

2. Режим переважання біотканини

Режим переважання біотканини реалізується у випадку, коли енергетичні характеристики біологічного середовища перевищують відповідні характеристики імплантованого матеріалу. Це формально описується нерівністю:

$$\beta_{\text{бт}} T_{\text{бт}} > \beta_{\text{імп}} T_{\text{імп}} \quad (2.12)$$

За таких умов параметр енергетичної взаємодії набуває від'ємного значення:

$$\Delta P < 0 \quad (2.13)$$

Це означає, що біотканина є більш інтенсивним джерелом теплового електромагнітного випромінювання, ніж імплантат, і саме вона визначає домінуючий енергетичний внесок у систему “імплантат – біотканина”. У результаті формується спрямований середній потік електромагнітної енергії від біологічного середовища до імплантованого матеріалу.

З фізичної точки зору такий режим є наслідком сукупності мікроскопічних процесів, характерних для біотканини. Зокрема, висока концентрація води, інтенсивна іонна провідність, наявність дипольних молекул та складна клітинна структура призводять до підсилення теплових флуктуацій електричних полів. Це, у свою чергу, збільшує інтенсивність випадкових мікрострумів, які й формують теплове електромагнітне випромінювання.

У цьому режимі імплантат опиняється в полі, що генерується переважно біологічним середовищем, і виконує роль більш пасивного елемента системи. Він не є самостійним домінуючим джерелом випромінювання, а переважно поглинає та перерозподіляє енергію, яка надходить від біотканини. Таким чином, енергетичний баланс зміщується на користь природного середовища.

Важливо, що переважання біотканини не означає повної односторонності процесу. Імплантат також генерує власне теплове випромінювання, однак його інтенсивність є меншою у порівнянні з біотканиною. У результаті взаємодії формується асиметричний енергетичний обмін, в якому один із компонентів системи відіграє домінуючу роль.

З точки зору просторового розподілу поля, у зоні контакту спостерігається зміщення максимуму електромагнітної активності в бік біотканини, тоді як імплантат перебуває в області підвищеного поглинання. Це може призводити до локальної перебудови енергетичних потоків у приповерхневих шарах системи.

Таким чином, режим переважання біотканини характеризується енергетичною асиметрією, за якої біологічне середовище визначає основні

параметри електромагнітного поля, а імплантат виступає як вторинний елемент, що адаптується до зовнішнього теплового випромінювання.

3. Режим переважання імплантату

Режим переважання імплантату реалізується у випадку, коли енергетичні характеристики імплантованого матеріалу перевищують відповідні характеристики біотканини. Це формально описується умовою:

$$\beta_{\text{імп}} T_{\text{імп}} > \beta_{\text{бт}} T_{\text{бт}} \quad (2.14)$$

За таких умов параметр енергетичної взаємодії набуває додатного значення:

$$\Delta P > 0 \quad (2.15)$$

Це означає, що імплантат стає більш інтенсивним джерелом теплового електромагнітного випромінювання, ніж навколишня біотканина, і саме він визначає домінуючий внесок у формування сумарного електромагнітного поля системи “імплантат – біотканина”. У результаті виникає спрямований середній потік енергії від імплантованого матеріалу до біологічного середовища.

З фізичної точки зору такий режим обумовлений як температурними умовами, так і електрофізичними властивостями самого імплантату. Матеріал імплантату може мати підвищену ефективність випромінювання через особливості своєї структури, наявність втратних механізмів, провідність або специфічну діелектричну поведінку. У сукупності це призводить до того, що рівень теплових флуктуацій електромагнітного поля в імплантаті стає вищим, ніж у біотканині.

У цьому режимі біотканина опиняється в полі, що формується переважно штучним середовищем, і виконує роль більш пасивного елемента системи. Вона поглинає частину енергії, яка надходить від імплантату, та здійснює її подальший перерозподіл у власній структурі. Таким чином, енергетичний баланс системи зміщується на користь імплантованого матеріалу.

Важливо підкреслити, що навіть у режимі домінування імплантату біотканина не втрачає власної здатності до генерації теплового електромагнітного випромінювання. Однак його інтенсивність є меншою, що формує стійку енергетичну асиметрію між компонентами системи.

З точки зору просторової структури поля, у зоні контакту спостерігається концентрація електромагнітної енергії поблизу імплантату з поступовим її розсіюванням у біологічному середовищі. Це призводить до формування градієнта енергетичної щільності, який визначає напрямок переносу енергії та характер локальних взаємодій.

Таким чином, режим переважання імплантату характеризується домінуванням штучного компонента в енергетичній структурі системи, що визначає основні параметри електромагнітного поля в зоні взаємодії та формує умови підвищеного впливу імплантованого матеріалу на біологічне середовище.

З урахуванням розглянутих режимів взаємодії можна зробити висновок, що параметр енергетичної взаємодії ΔP дозволяє формалізовано описати стан системи “імплантат – біотканина” як функцію їхніх термодинамічних та електрофізичних характеристик. У межах даної моделі система не є статичною, а характеризується змінним характером енергетичного обміну, який безпосередньо залежить від співвідношення температур та коефіцієнтів випромінювальної здатності β обох середовищ.

Введений параметр ΔP виступає узагальненим критерієм, що одночасно визначає напрямок та інтенсивність переносу теплового електромагнітного випромінювання між компонентами системи. Це дозволяє перейти від якісного опису фізичних процесів до їх кількісної інтерпретації в межах єдиної енергетичної моделі.

У рамках запропонованого підходу виділено три основні режими взаємодії: рівноважний режим, режим переважання біотканини та режим переважання імплантату. Кожен із них відображає окремий стан енергетичного балансу системи та характеризує відповідну спрямованість і інтенсивність електромагнітного обміну в зоні контакту.

Перехід між цими режимами є безперервним і визначається зміною внутрішніх параметрів середовища, що підкреслює динамічний характер взаємодії та її чутливість до локальних фізичних умов.

ВИСНОВОК ДО 2 РОЗДІЛУ

У другому розділі розглянуто особливості моделювання процесів взаємодії електромагнітного поля з біологічними тканинами людини та сформовано фізико-математичний опис їх електродинамічної поведінки. Показано, що біотканини доцільно розглядати як складні дисипативні середовища з вираженими діелектричними втратами, у яких електромагнітна енергія зазнає як накопичення, так і незворотного перетворення у теплову форму.

Встановлено, що комплексна діелектрична проникність визначає частотнозалежні електрофізичні властивості біотканин, а процеси провідності та поляризації формують єдиний механізм дисипації енергії. Це дозволяє розглядати біологічні тканини як середовища з розподіленими втратами, у яких взаємодія з електромагнітним полем визначається їх мікроструктурними особливостями.

Показано, що теплове електромагнітне випромінювання біотканин є наслідком сукупності мікроскопічних процесів, пов'язаних із тепловим рухом заряджених частинок і полярних молекул. У результаті біотканина може розглядатися як статистичне джерело широкосмугового електромагнітного випромінювання, інтенсивність якого визначається як температурою, так і електрофізичними параметрами середовища.

На основі закону Кірхгофа встановлено зв'язок між випромінювальною та поглинальною здатністю біотканин, що дозволило ввести ефективний коефіцієнт випромінювальної здатності. Використання моделі Найквіста–Больцмана показало, що біотканина є джерелом власного теплового електромагнітного випромінювання навіть за відсутності зовнішнього електромагнітного збудження.

У рамках енергетичної моделі взаємодії «імплантат – біотканина» встановлено, що обидва середовища можуть розглядатися як взаємопов'язані джерела теплового випромінювання, між якими формується результуючий енергетичний потік. Запропонований параметр ΔP дозволяє кількісно описати

енергетичну асиметрію системи та визначити напрямок переважного переносу енергії.

Таким чином, у другому розділі сформовано узгоджену багаторівневу модель, яка поєднує електромагнітний, термодинамічний і статистичний підходи до опису біотканин. Отримані результати створюють теоретичну основу для подальшого аналізу електромагнітної сумісності біологічних систем та імплантованих матеріалів, а також для інтерпретації процесів енергетичної взаємодії в зоні їх контакту.

Додатково слід відзначити, що запропонований підхід дозволяє перейти від якісного опису електромагнітних властивостей біотканин до формалізованого енергетичного аналізу, який є придатним для подальшого моделювання складних біоелектродинамічних систем. Використання єдиної системи параметрів, що включає діелектричні характеристики, коефіцієнт випромінювальної здатності та термодинамічні змінні, забезпечує узгодженість опису процесів як у внутрішньому середовищі тканини, так і на межі поділу «біотканина – імплантат».

Отримані результати формують основу для подальших досліджень у напрямку кількісної оцінки електромагнітної сумісності біоматеріалів та аналізу впливу слабких теплових електромагнітних полів на біологічні системи. Це створює передумови для розвитку моделей, які можуть бути використані в біомедичній інженерії, зокрема при проєктуванні та оптимізації імплантованих пристроїв з урахуванням їх електромагнітної взаємодії з оточуючими тканинами.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Об'єкти дослідження та їх класифікація

У межах експериментальних досліджень було використано біоматеріали природного та синтетичного походження, які характеризуються різними електрофізичними властивостями та різним ступенем взаємодії з електромагнітним полем. Вибір об'єктів дослідження зумовлений необхідністю порівняльного аналізу природних біологічних тканин та імплантаційних матеріалів у рамках енергетичної моделі, розглянутої у попередньому розділі.

Усі об'єкти дослідження поділено на дві основні групи за критерієм походження та структурно-функціональних особливостей: природні біологічні тканини та синтетичні біоматеріали.

До групи природних біологічних тканин віднесено як зразки живих тканин людини, так і матеріали тваринного походження, які мають близьку до кісткової структуру. У даній роботі використано: ділянку тіла людини (вимірювання виконувались із середини внутрішньої сторони долоні як репрезентативної зони поверхневого випромінювання), цілісний хребець тваринного походження, а також подрібнену кісткову тканину хребця.

Окремо до цієї групи включено біоматеріали, що застосовуються в регенеративній медицині та мають природне або біоактивне походження. Зокрема, це кісткозамінний матеріал Cerabone (BotissDental), який характеризується стабільною пористою структурою та високою гідрофільністю поверхні, що забезпечує його подібність до людської кісткової тканини. Також до цієї групи віднесено колагенові конуси Parasorb (Resorba), які виготовлені з нативних колагенових волокон і забезпечують швидку гемостатичну дію та подальшу регенерацію тканин, а також гемостатичну губку Gelatamp (Roeko) на основі желатину та колоїдного срібла.

Біологічні тканини та матеріали природного походження характеризуються високим вмістом води, наявністю іонних компонентів та складною структурною

організацією, що суттєво впливає на їх електромагнітні властивості у міліметровому діапазоні хвиль. Вода, яка є основним компонентом більшості біотканин, має виражені дипольні властивості, тому під дією електромагнітного поля в тканинах виникають процеси дипольної поляризації та релаксації. У результаті частина поглинутої електромагнітної енергії перевипромінюється у вигляді власного теплового шумового випромінювання.

Для кісткових та колагеновмісних матеріалів важливу роль також відіграють структурні особливості, зокрема пористість, неоднорідність внутрішньої будови та ступінь гідратації. Саме ці фактори визначають ефективність взаємодії матеріалу з електромагнітним полем та впливають на рівень інтегральної потужності теплового випромінювання.

До групи синтетичних біоматеріалів віднесено імплантаційні та керамічні матеріали, які мають штучне походження та використовуються для заміщення або відновлення кісткових структур. Сюди входять медичні клеї з фолієвою кислотою (МГ+ФА) та без неї (МГ-ФА), які є біокомпозитами на основі поліуретанової матриці з властивістю полімеризації в кістковій порожнині. Також до цієї групи належать гідроксиапатитний порошок, склокерамічний матеріал Синтекіст, а також двофазні кераміки Біомін GT-700 і Біомін GT-500, які відрізняються гранулометричним складом та співвідношенням фаз гідроксиапатиту і трикальційфосфату.

Синтетичні біоматеріали характеризуються іншими механізмами взаємодії з електромагнітним полем порівняно з природними біотканинами. Для більшості таких матеріалів характерними є нижчий вміст вільної води, менша концентрація рухомих іонів та більш впорядкована структура, що призводить до зниження інтенсивності дипольної поляризації у мм-діапазоні.

У діелектричних імплантатних матеріалах процеси поглинання та перевипромінювання електромагнітної енергії визначаються переважно електронною та орієнтаційною поляризацією, які є менш вираженими порівняно з біологічними тканинами. Унаслідок цього рівень власного теплового

електромагнітного випромінювання синтетичних матеріалів, як правило, є нижчим, а їх характеристики віддаляються від моделі абсолютно чорного тіла.

Вибір досліджуваних матеріалів зумовлений необхідністю аналізу електромагнітних властивостей середовищ із різним ступенем гідратації, структурної організації та діелектричної проникності. Особливий інтерес становлять матеріали, які застосовуються у реконструктивній та щелепно-лицевій хірургії, оскільки їх взаємодія з біологічними тканинами визначається не лише механічними, а й фізичними характеристиками.

Загальний перелік досліджуваних об'єктів за походженням подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Об'єкти дослідження

Об'єкти дослідження			
Номер об'єкта	Природне походження	Номер об'єкта	Синтетичне походження
1	Долоня людини (середній рівень радіації)	7	МГ+ФА
2	Цілісний хребець	8	МГ-ФА
3	Подрібнена кісткова тканина хребця	9	Гідроксиапатит (порошок)
4	Церабон (гранули)	10	Синтекіст (порошок)
5	Колагенова губка	11	Біомін GT -700 (порошок)
6	Желатинова губка	12	Біомін GT -500 (порошок)
		13	Абсолютне чорне тіло

Наведена класифікація досліджуваних об'єктів дозволяє простежити поступовий перехід від біологічних тканин із вираженими природними електромагнітними властивостями до синтетичних діелектричних матеріалів із більш інертною структурою. Очікується, що матеріали природного походження, які містять значну кількість води, органічних компонентів або мають пористу структуру, будуть характеризуватися вищими значеннями інтегральної потужності теплового випромінювання та коефіцієнта випромінювальної здатності β .

Найбільш близькими до біологічної тканини за електромагнітними характеристиками можуть бути біоактивні та колагеновмісні матеріали, оскільки їх структура частково імітує природне біологічне середовище. Водночас синтетичні керамічні та композитні матеріали, для яких характерні менший вміст води, висока щільність або переважання мінеральних компонентів, імовірно будуть мати нижчі значення випромінювальної здатності у мм-діапазоні.

Таким чином, таблиця 3.1 відображає не лише перелік досліджуваних об'єктів, а й формує умовну градацію матеріалів за ступенем їх очікуваної електромагнітної подібності до біологічної тканини. Це створює основу для подальшого порівняльного аналізу експериментально визначених радіометричних характеристик.

Експериментальні вимірювання інтегральної потужності теплового електромагнітного випромінювання виконувалися для всіх наведених зразків. На основі отриманих даних було проведено розрахунок коефіцієнта випромінювальної здатності, який дозволяє порівнювати досліджувані матеріали відносно еталонного рівня.

3.2 Методика радіометричних вимірювань

Методика радіометричних вимірювань базується на реєстрації власного теплового електромагнітного випромінювання біоматеріалів у міліметровому діапазоні хвиль із подальшим порівнянням експериментально отриманих характеристик із теоретичними моделями шумового випромінювання. Такий підхід дозволяє оцінювати випромінювальні та поглинальні властивості біоматеріалів, а також визначати ступінь їх електромагнітної сумісності з біологічними тканинами.

Радіометричний метод належить до пасивних методів електромагнітних досліджень, оскільки не передбачає зовнішнього опромінення об'єкта або внесення додаткової енергії у досліджувану систему. Основою методу є реєстрація власного теплового електромагнітного випромінювання, яке

природно генерується будь-яким матеріалом за температур вище абсолютного нуля.

На відміну від активних методів, у яких використовується зовнішнє джерело електромагнітного поля, радіометричні вимірювання дозволяють оцінювати фізичні властивості матеріалів у природному енергетичному стані. Це особливо важливо при дослідженні біологічних тканин і біоматеріалів, оскільки дає можливість мінімізувати вплив вимірювальної системи на об'єкт дослідження та реєструвати його власні шумові електромагнітні характеристики.

Перевагою радіометричного підходу є також висока чутливість до змін діелектричних властивостей середовища, вмісту води та структурної організації матеріалу. Завдяки цьому метод може використовуватися для порівняльного аналізу біологічних тканин і синтетичних імплантаційних матеріалів за параметрами їх теплового електромагнітного випромінювання.

Важливим етапом дослідження є вибір робочого частотного діапазону. У даній роботі використано міліметровий діапазон частот 37–53 ГГц, який характеризується високою чутливістю до діелектричних властивостей біологічних середовищ і матеріалів. Застосування цього діапазону забезпечує можливість:

- реєстрації слабких теплових електромагнітних сигналів, характерних для біоматеріалів і тканин людини;
- зменшення впливу зовнішніх електромагнітних шумів та інтерференцій у лабораторних умовах;
- порівняння експериментальних результатів із теоретичними розрахунками шумового випромінювання, оскільки для мм-діапазону та біологічних температур виконується наближення Релея–Джинса.

Міліметровий діапазон частот (37–53 ГГц) відповідає довжинам електромагнітних хвиль порядку кількох міліметрів, що робить його особливо чутливим до параметрів біологічних середовищ, зокрема до їх діелектричної проникності та вмісту води. У цьому діапазоні навіть незначні зміни структури

або складу матеріалу можуть призводити до помітних змін у рівні поглинання та випромінювання електромагнітної енергії.

Важливою особливістю є також обмежена глибина проникнення випромінювання, яка зменшується зі зростанням частоти та залежить від електрофізичних властивостей середовища. У результаті реєстровані сигнали переважно відображають стан приповерхневих шарів досліджуваного матеріалу, що є критично важливим при аналізі біологічних тканин та імплантаційних структур.

Таким чином, використання мм-діапазону дозволяє не лише фіксувати інтегральні характеристики теплового випромінювання, але й підвищує інформативність вимірювань щодо мікроструктурних та діелектричних особливостей матеріалів.

Основними параметрами вимірювання були:

- смуга частот $\Delta f = 1$ ГГц для інтегральної оцінки потужності випромінювання;
- температурний режим у межах 25–37 °C залежно від типу досліджуваного зразка;
- стабілізовані умови проведення вимірювань для зменшення впливу зовнішніх факторів.

3.2.1 Фактори, що впливають на точність вимірювань

На точність радіометричних вимірювань теплового електромагнітного випромінювання у міліметровому діапазоні впливає низка фізичних та експериментальних факторів, які можуть змінювати як абсолютні значення реєстрованої потужності, так і відтворюваність результатів.

Одним із ключових чинників є температурна стабільність зразка та навколишнього середовища, оскільки навіть незначні відхилення температури безпосередньо впливають на рівень теплового випромінювання відповідно до статистичних законів випромінювання. Зміна температури призводить до пропорційної зміни інтенсивності сигналу, що може викликати систематичну похибку.

Важливу роль також відіграє вологість середовища та стан гідратації досліджуваних біологічних зразків, оскільки вода є основним носієм дипольної поляризації у міліметровому діапазоні. Зміна вмісту води навіть у межах одного зразка може суттєво впливати на його електромагнітні характеристики.

До зовнішніх факторів належать фонові електромагнітні шуми та інтерференційні завади, які можуть виникати від роботи вимірювального обладнання або сторонніх джерел випромінювання. Їх вплив частково мінімізується шляхом модуляційного принципу роботи радіометричної системи, однак повністю виключити їх неможливо.

Також на точність вимірювань впливає стабільність приймального тракту радіометричної системи, зокрема дрейф підсилювальних каскадів та нестабільність калібрувальних характеристик. Це вимагає періодичної перевірки та калібрування вимірювального обладнання.

Окремим фактором є положення та геометрія розташування зразка відносно приймальної антени, оскільки зміна відстані або кута нахилу може призводити до зміни ефективної площі прийому випромінювання.

Нарешті, неоднорідність структури біологічних та синтетичних матеріалів також вносить вклад у похибку вимірювань, оскільки локальні відмінності у щільності, пористості та хімічному складі призводять до просторової варіації електромагнітних властивостей.

3.2.2 Високочутлива радіометрична система

Для проведення експериментальних досліджень використовувалася високочутлива радіометрична система, призначена для реєстрації низькоінтенсивного теплового електромагнітного випромінювання у мм-діапазоні. До складу системи входили:

- модуляційний радіометр, який здійснював прийом і перетворення теплового електромагнітного випромінювання у вихідний електричний сигнал;
- генератор сигналу Г4-141, що використовувався для перевірки стабільності та точності вимірювальної системи;

- атенюатор ДЗ-37, призначений для регулювання рівня сигналу та запобігання перевантаженню приймального тракту;
- вольтметри 27А/1 і В7-26, за допомогою яких здійснювалася реєстрація електричних параметрів системи;
- система калібрування, що включала калібрувальну характеристику залежності вихідної напруги від потужності електромагнітного випромінювання.

Радіометрична система має класичну структурну побудову, яка забезпечує послідовне перетворення слабого теплового електромагнітного сигналу у вимірюваний електричний параметр. Першим елементом системи є антена, яка виконує функцію прийому електромагнітного випромінювання від досліджуваного зразка та його просторового узгодження з вхідним трактом приймача.

Далі сигнал надходить до приймального блоку, де здійснюється первинне виділення корисної складової з урахуванням частотного діапазону вимірювань. Після цього він проходить через підсилювальний каскад, який забезпечує необхідний рівень сигналу для подальшої обробки, компенсуючи його надзвичайно малу амплітуду.

Наступним етапом є детектування, у процесі якого високочастотний сигнал перетворюється у пропорційний низькочастотний або постійний електричний сигнал, зручний для вимірювання. Завершальним елементом є система реєстрації, яка фіксує отримані значення та забезпечує їх подальшу обробку і калібрування відповідно до експериментальної методики.

Така структурна організація дозволяє забезпечити високу чутливість, стабільність та відтворюваність вимірювань у міліметровому діапазоні навіть при реєстрації надзвичайно слабких теплових сигналів.

Принцип роботи радіометричної системи полягав у прийомі теплового електромагнітного випромінювання від досліджуваного зразка з подальшим виділенням корисного сигналу на фоні шумів за допомогою модуляції. Модуляційний принцип у радіометричних системах застосовується для підвищення чутливості вимірювання слабких теплових електромагнітних

сигналів, які знаходяться на рівні власних шумів приймального тракту. Основна ідея модуляції полягає у перенесенні корисного сигналу в іншу частотну область, де рівень фонових шумів є значно нижчим або більш стабільним, що дозволяє ефективніше виділяти сигнал досліджуваного об'єкта.

У випадку вимірювання біологічних тканин та біоматеріалів це є особливо важливим, оскільки рівень їх теплового випромінювання є надзвичайно низьким і порівняним із власними шумами електронних компонентів системи. Без використання модуляції корисний сигнал може бути частково або повністю замаскований шумами підсилювальних каскадів, що призводить до зниження точності вимірювань.

Додатковою перевагою модуляційного підходу є можливість застосування методів синхронного детектування, які дозволяють виділяти сигнал саме на частоті модуляції, відсікаючи некорельовані шумові складові. Це суттєво покращує співвідношення сигнал/шум і забезпечує стабільність отриманих результатів навіть при вимірюванні слабкоінтенсивного випромінювання.

Отриманий електричний сигнал реєструвався вимірювальною системою та перетворювався у значення потужності випромінювання відповідно до калібрувальної характеристики.

Калібрувальна характеристика радіометричної системи забезпечує перетворення вимірюної вихідної напруги у фізичну величину потужності теплового електромагнітного випромінювання. Оскільки радіометр безпосередньо реєструє електричний сигнал, отримане значення напруги не є фізично інтерпретованим без попереднього встановлення відповідності між електричними та енергетичними параметрами.

Формування калібрувальної залежності здійснюється шляхом використання еталонних джерел електромагнітного випромінювання з відомими значеннями потужності. Для кожного контрольного рівня фіксується відповідна вихідна напруга приймального тракту, після чого будується функціональна залежність між потужністю випромінювання та електричним сигналом системи. Отримана

характеристика використовується як базова функція перерахунку експериментальних даних у ватні одиниці.

Застосування калібрування є необхідним для забезпечення коректності вимірювань, оскільки дозволяє врахувати нелінійність детектора, коефіцієнт підсилення тракту та можливі температурні дрейфи елементів системи. Це забезпечує стабільність перетворення сигналу та підвищує метрологічну достовірність отриманих результатів.

3.2.3 Методика визначення випромінювальної здатності біоматеріалів

Визначення випромінювальної здатності досліджуваних матеріалів проводилося за наступною методикою.

На першому етапі здійснювалася підготовка зразків. Біоматеріали та біологічні об'єкти доводилися до робочої температури 36–37 °С. Для мінімізації теплового впливу навколишніх поверхонь зразки розташовувалися на теплоізоляційній підкладці.

Після стабілізації температурного режиму проводився контроль температури зразка за допомогою вимірювальної системи. На основі температурних параметрів визначалося теоретичне значення потужності теплового випромінювання відповідно до закону Релея–Джинса:

$$P = kT\Delta f \quad (3.1)$$

де k – стала Больцмана, T – абсолютна температура зразка, Δf – смуга частот приймача.

Застосування закону Релея–Джинса є коректним для умов даного експерименту, оскільки для міліметрового діапазону частот і біологічних температур виконується умова квантового наближення:

$$h\nu \ll kT \quad (3.2)$$

Це означає, що енергія кванта електромагнітного випромінювання є значно меншою за теплову енергію системи, що дозволяє розглядати випромінювання в рамках класичної статистики без врахування квантових обмежень. У таких умовах потужність теплового випромінювання прямо пропорційна температурі та смузі частот.

Експериментальне визначення випромінювання здійснювалося шляхом реєстрації вихідного сигналу модуляційного радіометра. Отримане значення напруги перераховувалося у потужність електромагнітного випромінювання за допомогою калібрувальної характеристики системи.

Для підвищення достовірності результатів для кожного зразка проводилося не менше трьох повторних вимірювань. Необхідність повторних вимірювань зумовлена стохастичною природою теплового випромінювання та наявністю шумових складових у вимірювальному тракті. Усереднення результатів дозволяє зменшити вплив випадкових флуктуацій сигналу та підвищити статистичну надійність отриманих даних.

Похибки вимірювання визначаються сукупністю факторів, серед яких основними є нестабільність температурного режиму зразка, власні шуми приймального тракту радіометричної системи, а також можливі неоднорідності досліджуваних матеріалів. Сукупний вплив цих факторів може призводити до варіацій виміряних значень, що враховується шляхом повторних вимірювань і усереднення результатів.

Після цього визначалися середні значення напруги та потужності випромінювання, а також оцінювалися можливі похибки вимірювань.

На завершальному етапі здійснювалося порівняння експериментально визначених параметрів випромінювання з теоретичними значеннями, отриманими на основі моделі теплового шумового випромінювання.

3.3 Розрахунок коефіцієнта випромінювальної здатності

Однією з основних характеристик теплового електромагнітного випромінювання матеріалів є коефіцієнт випромінювальної здатності β , який характеризує ступінь наближення реального об'єкта до абсолютно чорного тіла у заданому частотному діапазоні.

Коефіцієнт β є безрозмірною величиною, що визначається як відношення експериментально виміряної потужності випромінювання до теоретичної потужності абсолютно чорного тіла. Такий підхід дозволяє уніфікувати

порівняння різних матеріалів незалежно від їх геометричних розмірів, температури та абсолютного рівня випромінюваної енергії.

Зручність використання параметра β полягає в тому, що він є нормованою характеристикою, яка відображає лише властивості матеріалу як випромінювача. Це дозволяє безпосередньо порівнювати біологічні тканини та синтетичні матеріали в однакових умовах експерименту, не враховуючи масштабні фактори. Таким чином, β виступає інтегральним показником електромагнітної активності матеріалу в міліметровому діапазоні.

Теоретична потужність теплового шумового випромінювання абсолютно чорного тіла у заданій смузі частот визначається відповідно до співвідношення Найквіста:

$$P_{\text{АЧТ}} = kT\Delta f \quad (3.3)$$

де $P_{\text{АЧТ}}$ – теоретична потужність випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; T – абсолютна температура тіла, К; Δf – смуга частот приймача, Гц.

Для реальних біологічних об'єктів потужність випромінювання є меншою за потужність абсолютно чорного тіла. Тому експериментально визначена потужність випромінювання $P_{\text{експ}}$ пов'язується з теоретичним значенням через коефіцієнт випромінювальної здатності β :

$$\beta = \frac{P_{\text{експ}}}{P_{\text{АЧТ}}} \quad (3.4)$$

де β – коефіцієнт випромінювальної здатності; $P_{\text{експ}}$ – експериментально визначена потужність випромінювання зразка (далі $P_{\text{бт}}$ і $P_{\text{імп}}$ – інтегральні потужності теплового електромагнітного випромінювання відповідних зразків); $P_{\text{АЧТ}}$ – теоретична потужність випромінювання абсолютно чорного тіла.

Значення коефіцієнта β лежить у межах:

$$0 \leq \beta \leq 1 \quad (3.5)$$

де значення, близькі до 1, відповідають матеріалам із високою інтенсивністю теплового випромінювання, а малі значення характерні для матеріалів з низькою електромагнітною активністю.

Приклад розрахунку для біотканини людини

Для біотканини людини вимірювання проводилися при температурі:

$$T = 36.6^{\circ}\text{C} \approx 310\text{ K} \quad (3.6)$$

Смуга частот радіометричної системи становила:

$$\Delta f = 1 \cdot 10^8\text{ Гц} \quad (3.7)$$

Теоретична потужність випромінювання абсолютно чорного тіла визначається за формулою Найквіста:

$$P_{\text{АЧТ}} = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 310 \cdot 10^8 \approx 4.28 \cdot 10^{-13}\text{ Вт} \quad (3.8)$$

За результатами експерименту для біотканини людини отримано потужність випромінювання:

$$P_{\text{бт}} = 2.3 \cdot 10^{-13}\text{ Вт} \quad (3.9)$$

Тоді коефіцієнт випромінювальної здатності становить:

$$\beta_{\text{бт}} = \frac{2.3 \cdot 10^{-13}}{4.28 \cdot 10^{-13}} \approx 0.54 \quad (3.10)$$

Отримане значення $\beta \approx 0.54$ свідчить про високу випромінювальну здатність біологічної тканини. Це означає, що понад половина енергетичного рівня ідеального абсолютно чорного тіла реалізується у вигляді власного теплового електромагнітного випромінювання біотканини у міліметровому діапазоні.

Такий рівень β є характерним для водонасичених біологічних середовищ і суттєво перевищує значення, характерні для більшості синтетичних діелектричних матеріалів, що мають значно слабшу дипольну релаксацію.

Приклад для кісткової тканини

Для кісткової тканини експериментально отримано:

$$P_{\text{к}} = 1.8 \cdot 10^{-13}\text{ Вт} \quad (3.11)$$

Тоді:

$$\beta_{\text{к}} \approx 0.42 \quad (3.12)$$

Зниження коефіцієнта порівняно з м'якими тканинами пояснюється меншою кількістю води та більш щільною мінералізованою структурою, що зменшує інтенсивність дипольної поляризації у міліметровому діапазоні.

Приклад для синтетичного матеріалу

Для синтетичного біоматеріалу (наприклад, гідроксиапатитного порошку) отримано:

$$P_c = 0.2 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} \quad (3.13)$$

Тоді:

$$\beta_c \approx 0.05 \quad (3.14)$$

Таке низьке значення β свідчить про слабку здатність матеріалу до випромінювання теплової електромагнітної енергії. Це пояснюється відсутністю водних та іонних компонентів, які забезпечують основні механізми дипольної релаксації в біологічних середовищах.

Отримане значення $\beta \approx 0.54$ для біотканини є відносно високим і свідчить про те, що біологічні тканини у міліметровому діапазоні поведуться як ефективні природні випромінювачі, наближені до моделі абсолютно чорного тіла.

У порівнянні з цим, кісткова тканина ($\beta \approx 0.42$) демонструє помірний рівень випромінювання, тоді як синтетичні матеріали ($\beta \approx 0.05$) характеризуються низькою електромагнітною активністю.

Таким чином, спостерігається чітка градація матеріалів за коефіцієнтом випромінювальної здатності:

біотканини $\rightarrow$ проміжні біоматеріали $\rightarrow$ синтетичні діелектрики,
що підтверджує чутливість міліметрового діапазону до структурних та фізико-хімічних властивостей матеріалів.

3.4 Експериментальні результати

У даному пункті наведено результати експериментальних радіометричних вимірювань інтегральної потужності теплового електромагнітного випромінювання у міліметровому діапазоні, а також розраховані значення коефіцієнта випромінювальної здатності β для досліджуваних матеріалів.

Отримані дані дозволяють провести порівняльний аналіз електромагнітних властивостей біологічних тканин, природних біоматеріалів та синтетичних імплантаційних матеріалів, а також оцінити вплив їх структурних та фізико-хімічних характеристик на рівень теплового випромінювання.

Розрахунок коефіцієнта випромінювальної здатності виконувався за співвідношенням:

$$\beta_{\text{імп}} = \frac{P_{\text{імп}}}{P_{\text{АЧТ}}} \quad (3.15)$$

де $P_{\text{імп}}$ – експериментально виміряна інтегральна потужність випромінювання зразка; $P_{\text{АЧТ}}$ – теоретична потужність випромінювання абсолютно чорного тіла, визначена за формулою Найквіста.

Отримані значення β (табл. 3.2) демонструють суттєві відмінності між різними групами матеріалів, що визначається їх внутрішньою структурою, вмістом води, щільністю та характером електромагнітної взаємодії у міліметровому діапазоні.

Таблиця 3.2 – Результати експериментальних вимірювань

Об'єкти дослідження	$P_{\text{експ}}, 10^{-13}, \text{Вт}$	$\beta_{\text{експ}} = P_{\text{експ}}/P_{\text{АЧТ}}$
1	2.3	0.54
2	1.8	0.42
3	1.1	0.26
4	0.6	0.14
5	0.2	0.05
6	0.2	0.05
7	0.6	0.14
8	0.4	0.09
9	0.2	0.05
10	0.1	0.02
11	0.1	0.02
12	0.1	0.02
13	4.28	1

Аналіз отриманих результатів показує, що досліджувані матеріали характеризуються різною інтенсивністю теплового електромагнітного випромінювання. Найбільші значення потужності спостерігаються для зразків із високим вмістом води та вираженими поляризаційними властивостями, тоді як більш щільні та структурно однорідні матеріали демонструють нижчі значення випромінювання. Це свідчить про суттєвий вплив внутрішньої структури

середовища на процеси генерації електромагнітних коливань у міліметровому діапазоні.

Для наочного порівняння експериментально отриманих значень було побудовано графік залежності потужності теплового електромагнітного випромінювання для досліджуваних об'єктів (рис. 3.1).

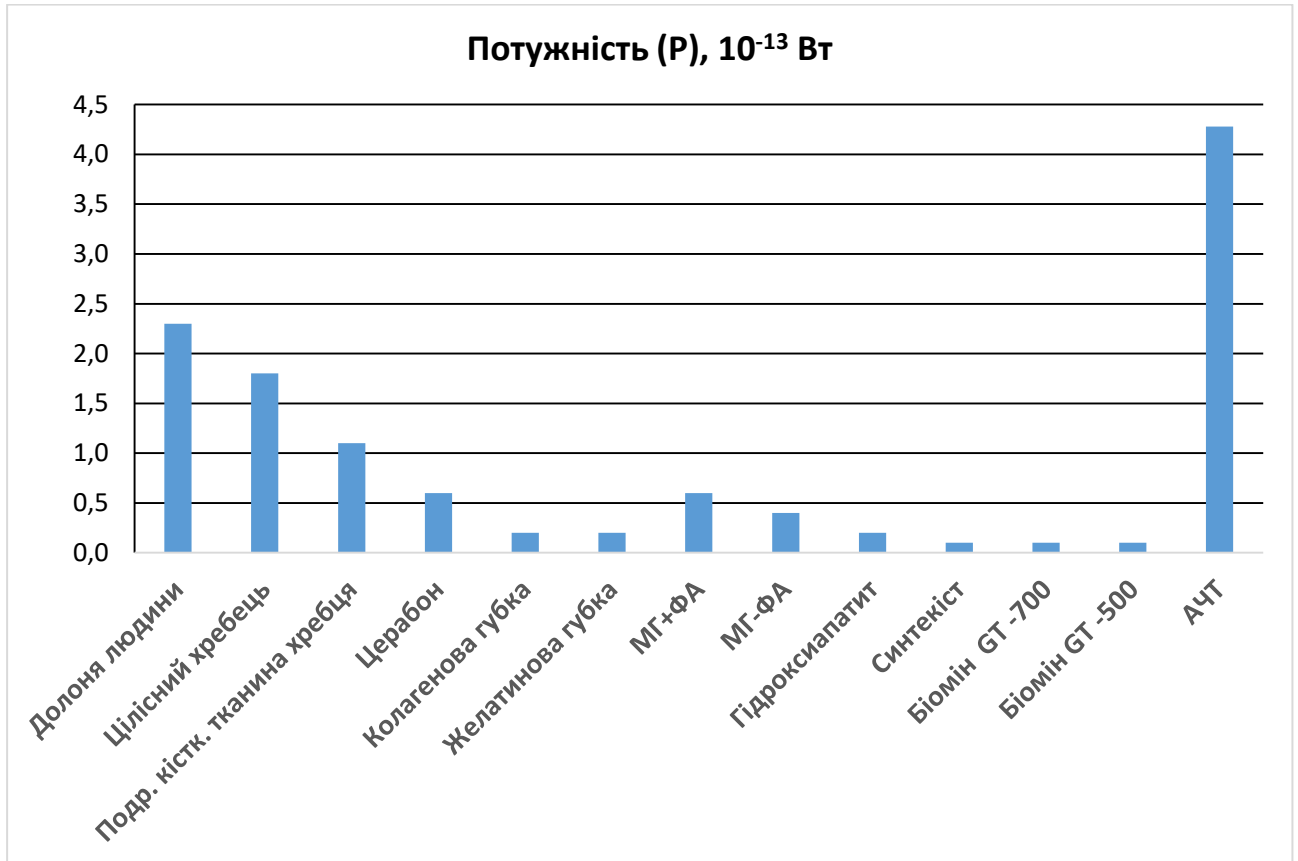


Рис. 3.1 – Порівняння потужностей теплового електромагнітного випромінювання досліджуваних матеріалів

Представлений графік підтверджує наявність помітної різниці між електромагнітними характеристиками біологічних тканин та імплантаційних матеріалів. Зі збільшенням коефіцієнта випромінювальної здатності β зростає і потужність теплового електромагнітного випромінювання, що узгоджується з розробленою енергетичною моделлю системи «імплантат – біотканина».

Отримані результати свідчать про те, що електрофізичні параметри матеріалу можуть суттєво впливати на характер енергетичної взаємодії в зоні контакту з біотканиною. Це підтверджує доцільність використання коефіцієнта

β як інтегрального параметра для оцінки електромагнітної сумісності імплантаційних матеріалів із біологічним середовищем.

3.4.1 Біологічні тканини (м'які структури)

Для біологічної тканини людини спостерігаються найбільші значення інтегральної потужності випромінювання та коефіцієнта β серед усіх досліджуваних зразків ($\beta \approx 0.54$).

Високий рівень випромінювання пояснюється наступними факторами:

- значним вмістом води, яка є основним носієм дипольної релаксації;
- наявністю іонізованих середовищ, що підсилюють електромагнітну відповідь;
- високою рухливістю молекулярних структур;
- інтенсивною тепловою флуктуацією диполів у міліметровому діапазоні.

У сукупності ці фактори забезпечують ефективне поглинання та перевипромінювання електромагнітної енергії, що наближає біотканину до моделі ідеального випромінювача.

3.4.2 Кісткові структури

Для кісткової тканини зафіксовано середні значення коефіцієнта β (≈ 0.26), які є нижчими порівняно з м'якими біотканинами.

Основними причинами зниження випромінювальної здатності є:

- висока мінералізація структури;
- низький вміст вільної та зв'язаної води;
- щільна кристалічна організація гідроксиапатиту;
- обмежена дипольна рухливість.

Зменшення кількості активних дипольних механізмів призводить до слабшої взаємодії з електромагнітним полем у мм-діапазоні, що зумовлює зниження інтегральної потужності випромінювання.

3.4.3 Колагенові та желатинові матеріали

Колагенові конуси та желатинові губки демонструють проміжні значення коефіцієнта β ($\approx 0.05\text{--}0.14$).

Їхня випромінювальна здатність визначається:

- пористою структурою матеріалу;
- частковим вмістом води;
- органічною природою білкових волокон;
- меншою структурною щільністю порівняно з кісткою.

Попри органічне походження, такі матеріали не мають повноцінної клітинної організації, що обмежує ефективність колективних дипольних процесів. Внаслідок цього їх електромагнітна активність є значно нижчою, ніж у живих біотканинах.

3.4.4 Керамічні біоматеріали

Керамічні матеріали (гідроксиапатит, Біомін GT-700, Біомін GT-500, Синтекіст) характеризуються низькими значеннями β (≈ 0.02 – 0.05).

Такі результати зумовлені:

- кристалічною неорганічною структурою;
- практично повною відсутністю води;
- низькою діелектричною релаксацією;
- обмеженою поляризаційною здатністю.

Двохфазні кераміки (GT-700, GT-500) демонструють незначні відмінності між собою, що пов'язано з різним співвідношенням фаз гідроксиапатиту та трикальційфосфату, однак загальний рівень випромінювання залишається низьким.

3.4.5 Синтетичні полімерні матеріали

Полімерні композити та медичні клеї (МГ+ФА, МГ-ФА) демонструють низькі значення β (≈ 0.09 – 0.14), що пов'язано з їх діелектричною природою та відсутністю активних біологічних структур.

Основними факторами є:

- слабка електронна та орієнтаційна поляризація;
- відсутність водного середовища;
- обмежена рухливість молекулярних ланцюгів;
- відносно однорідна полімерна матриця.

Включення фолієвої кислоти не призводить до суттєвого збільшення випромінювальної здатності, що свідчить про домінуючу роль поліуретанової основи у формуванні електромагнітних властивостей.

Порівняльний аналіз отриманих значень коефіцієнта випромінювальної здатності β дозволяє виявити чітку градацію досліджуваних матеріалів за рівнем їх електромагнітної активності у міліметровому діапазоні.

Значення β для кісткових матеріалів займають проміжне положення між показниками м'яких біологічних тканин та синтетичних діелектричних середовищ. Це зумовлено їх структурною особливістю, яка поєднує мінералізовану жорстку матрицю з обмеженою кількістю води та органічних компонентів. У результаті кісткова тканина має знижену, але все ще помітну здатність до дипольної релаксації порівняно з м'якими біотканинами.

Колагенові та желатинові матеріали, незважаючи на органічне походження, демонструють значно нижчі значення β , що пояснюється їх пористою структурою та відсутністю повноцінної клітинної організації. Це наближає їх за електромагнітними характеристиками до слабкополярних діелектриків.

Натомість керамічні та синтетичні полімерні матеріали характеризуються найнижчими значеннями коефіцієнта β , що свідчить про мінімальну інтенсивність теплового електромагнітного випромінювання. Такі результати пов'язані з відсутністю водного середовища та низькою здатністю до орієнтаційної поляризації молекул.

Отже, отримані результати демонструють безперервний перехід електромагнітних властивостей від біологічно активних середовищ до інертних діелектричних матеріалів, що підтверджує визначальну роль структурної організації та вмісту води у формуванні випромінювальної здатності.

Порівняльний аналіз показує чітку градацію досліджуваних матеріалів за коефіцієнтом випромінювальної здатності:

м'які біотканини > кісткова тканина > колагенові матеріали > кераміки $\approx$ синтетичні полімери.

Ця закономірність підтверджує, що основними факторами, які визначають інтенсивність теплового електромагнітного випромінювання у міліметровому діапазоні, є вміст води, структурна організація матеріалу та ступінь дипольної релаксації.

У результаті, експериментально встановлено, що біологічні тканини характеризуються суттєво вищою випромінювальною здатністю порівняно із синтетичними матеріалами, що дозволяє використовувати параметр β як інформативний критерій електромагнітної подібності матеріалів.

3.5 Аналіз результатів

Аналіз отриманих експериментальних даних дозволив встановити закономірності у випромінювальних властивостях досліджуваних матеріалів у міліметровому діапазоні частот та оцінити вплив їх фізико-хімічної структури на величину коефіцієнта випромінювальної здатності β . Отримані результати загалом узгоджуються з положеннями електродинаміки діелектричних середовищ, відповідно до яких інтенсивність теплового електромагнітного випромінювання визначається сукупністю процесів дипольної поляризації, електронної поляризації та релаксаційних механізмів у матеріалі.

Ключовим фактором, що визначає відмінності між біологічними та синтетичними середовищами, є вміст води. Молекули води мають виражений дипольний момент і активно взаємодіють зі змінним електромагнітним полем у міліметровому діапазоні, що зумовлює інтенсивну орієнтаційну поляризацію. У м'яких біологічних тканинах це призводить до підвищеного рівня теплового випромінювання та відповідно до більших значень коефіцієнта β . Натомість у кістковій тканині, де вміст води знижений через високу мінералізацію, інтенсивність дипольної релаксації є меншою, що проявляється у зменшенні випромінювальної здатності. У синтетичних матеріалах, які практично не містять водної фази, цей механізм майже відсутній, тому їх електромагнітна активність є мінімальною.

Важливу роль у формуванні випромінювальних властивостей відіграє також структурна організація матеріалів. Пористі біоматеріали, зокрема колагенові та желатинові зразки, характеризуються неоднорідною внутрішньою будовою, що призводить до розсіювання електромагнітного випромінювання та зменшення ефективності взаємодії поля з дипольними структурами. У гранульованих і порошкоподібних кераміках додатково зростає роль меж поділу фаз, що підсилює втрати енергії через багаторазове розсіювання. Натомість щільні кристалічні структури гідроксиапатиту та двофазних керамік обмежують рухливість заряджених частинок і знижують імовірність дипольної релаксації, що додатково зменшує рівень теплового електромагнітного випромінювання.

Таким чином, випромінювальна здатність матеріалів визначається поєднанням двох основних чинників: вмістом води та ступенем структурної організації. Саме їх взаємодія формує спостережувану градацію значень β у досліджуваних зразках.

Отримані експериментальні результати загалом узгоджуються з теоретичною моделлю теплового шумового випромінювання, яка базується на наближенні Релея–Джинса для міліметрового діапазону частот. Відхилення між теоретичними та експериментальними значеннями можуть бути зумовлені реальними фізичними особливостями матеріалів, зокрема їх неоднорідністю, локальними змінами вологості, багатофазною структурою, а також обмеженнями вимірювальної системи, включаючи власні шуми приймального тракту та похибки калібрування.

Особливо це проявляється для синтетичних і пористих матеріалів, для яких припущення про однорідність є лише наближенням. Водночас загальна тенденція зміни коефіцієнта β повністю відповідає теоретичним очікуванням: матеріали з більшою здатністю до поляризації та вищим вмістом води демонструють більші значення випромінювальної здатності, тоді як діелектрично інертні середовища характеризуються мінімальними значеннями цього параметра.

З практичної точки зору коефіцієнт β може розглядатися як інформативний критерій електромагнітної подібності матеріалів до біологічних тканин. Матеріали з вищими значеннями β є більш наближеними до м'яких біотканин за своїми електромагнітними характеристиками, тоді як матеріали з низькими значеннями β демонструють більшу електромагнітну інертність. Це дозволяє використовувати даний параметр як додатковий інструмент порівняльної оцінки імплантаційних матеріалів.

Таким чином, сукупність отриманих результатів підтверджує, що електромагнітні властивості матеріалів у міліметровому діапазоні визначаються комплексною взаємодією їх структурних, молекулярних та діелектричних характеристик, а коефіцієнт β може бути використаний як узагальнений кількісний показник цих процесів.

3.6 Модель взаємодії біотканина-імплантат

На основі отриманих експериментальних значень коефіцієнта випромінювальної здатності β розглядається енергетична взаємодія системи «біотканина – імплантат» у міліметровому діапазоні. Основна ідея моделі полягає у порівнянні потужності теплового електромагнітного випромінювання біологічної тканини та імплантаційного матеріалу з подальшою оцінкою їх енергетичної узгодженості.

Важливим аспектом є те, що межа поділу двох середовищ не є пасивною, оскільки в цій області відбувається перерозподіл електромагнітного поля. При різних значеннях діелектричної проникності, електропровідності та поляризаційних властивостей у біотканині та імплантаті виникає просторово-енергетична неоднорідність, яка проявляється у зміні щільності енергетичного потоку в зоні контакту. Саме тому аналіз узгодженості електромагнітних характеристик матеріалів є важливим з точки зору їх потенційної біосумісності.

У рамках моделі кожен матеріал характеризується власною випромінювальною здатністю, що визначається коефіцієнтом β . Інтегральна

потужність теплового електромагнітного випромінювання може бути записана як:

$$P_{\text{імп}} = \beta_{\text{імп}} P_{\text{АЧТ}} \quad (3.16)$$

де $P_{\text{імп}}$ – інтегральна потужність випромінювання матеріалу; $\beta_{\text{імп}}$ – коефіцієнт випромінювальної здатності; $P_{\text{АЧТ}}$ – потужність випромінювання абсолютно чорного тіла при відповідній температурі.

Отже, коефіцієнт β фактично є узагальненим параметром, що інтегрує внесок внутрішньої структури, діелектричних властивостей та релаксаційних процесів матеріалу. Його використання дозволяє порівнювати різні середовища незалежно від абсолютної температури чи геометричних розмірів зразка, що є важливою перевагою при аналізі біологічних систем.

Енергетична невідповідність між біотканиною та імплантатом визначається як різниця їхніх інтегральних потужностей:

$$\Delta P = | P_{\text{бт}} - P_{\text{імп}} | \quad (3.17)$$

або, з урахуванням коефіцієнтів випромінювальної здатності:

$$\Delta P = | (\beta_{\text{бт}} - \beta_{\text{імп}}) P_{\text{АЧТ}} | \quad (3.18)$$

Отримані значення енергетичної різниці для досліджуваних матеріалів наведено в таблиці 3.3. Об'єкти 1 та 13 не включалися до розрахунку ΔP та δP як еталонні (біотканина та абсолютно чорне тіло відповідно).

Таблиця 3.3 – Результати розрахованих значень ΔP для кожного об'єкта

Об'єкти дослідження	$\Delta P, 10^{-13}, \text{Вт}$
2	0,5
3	1,2
4	1,7
5	2,1
6	2,1
7	1,7
8	1,9
9	2,1
10	2,2
11	2,2
12	2,2

Фізичний зміст параметра ΔP полягає в тому, що він характеризує ступінь енергетичного розузгодження між двома середовищами. При малих значеннях ΔP електромагнітні властивості біотканини та імплантату є близькими, що відповідає більш рівномірному переходу енергетичного потоку через межу поділу без різких змін його щільності. Навпаки, збільшення ΔP свідчить про суттєву різницю у випромінювальних характеристиках, що може призводити до формування локальних неоднорідностей електромагнітного поля в зоні контакту матеріалів.

У розвиток цієї ідеї систему «біотканина – імплантат» можна розглядати як таку, що прагне до стану електромагнітної рівноваги. У такому випадку виконується умова:

$$\beta_{\text{бт}} \approx \beta_{\text{імп}} \quad (3.19)$$

що відповідає зменшенню енергетичного градієнта між середовищами та вирівнюванню інтенсивності теплового електромагнітного випромінювання на межі поділу. З фізичної точки зору це призводить до більш стабільного розподілу електромагнітного поля та зменшення ефектів локальної енергетичної концентрації.

Ступінь наближення системи до узгодженого стану може бути оцінений через параметри ΔP або δP , які відображають відхилення електромагнітних характеристик матеріалів від біотканини.

Відносна різниця енергетичних характеристик визначається як:

$$\delta P = \frac{|P_{\text{бт}} - P_{\text{імп}}|}{P_{\text{бт}}} \cdot 100\% \quad (3.20)$$

або у вигляді через коефіцієнти випромінювальної здатності:

$$\delta P = \frac{|\beta_{\text{бт}} - \beta_{\text{імп}}|}{\beta_{\text{бт}}} \cdot 100\% \quad (3.21)$$

Також вона може бути записана через ΔP :

$$\delta P = \frac{|\Delta P|}{P_{\text{бт}}} \cdot 100\% \quad (3.22)$$

Отримані значення δP наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахованих значень δP для кожного об'єкта дослідження

Об'єкти дослідження	δP , %
2	22
3	52
4	74
5	91
6	91
7	74
8	83
9	91
10	96
11	96
12	96

Отримані результати показують, що зі збільшенням різниці між коефіцієнтами $\beta_{\text{бт}}$ та $\beta_{\text{імп}}$ зростає і відносна енергетична невідповідність системи. Матеріали з меншими значеннями δP є більш узгодженими з біотканиною за своїми електромагнітними властивостями.

Аналіз експериментальних даних показує, що мінімальні значення енергетичної невідповідності характерні для матеріалів із проміжними значеннями коефіцієнта β , тобто таких, що за своєю структурою частково наближені до біологічних тканин. Найбільш узгодженими з біотканиною є матеріали, що містять органічні компоненти або мають підвищену здатність до поляризації. Натомість керамічні та полімерні матеріали демонструють більші відхилення, що пояснюється їх діелектрично інертною природою.

Таким чином, серед досліджених матеріалів можна виділити умовну градацію за ступенем електромагнітної узгодженості з біологічною тканиною: найбільш близькими є органічні та біоактивні матеріали, тоді як керамічні та синтетичні середовища характеризуються найвищим рівнем енергетичної невідповідності. Це дозволяє розглядати коефіцієнт β та похідні від нього параметри як інструмент кількісної оцінки електромагнітної сумісності матеріалів.

Отримані значення ΔP підтверджують зазначену закономірність: для частини матеріалів спостерігається відносно низька енергетична різниця з біотканиною, тоді як інші характеризуються суттєвим відхиленням випромінювальних параметрів. Найменші значення ΔP відповідають матеріалам, електромагнітні характеристики яких найбільш наближені до характеристик біологічної тканини.

3.7 Критерії електромагнітної сумісності

На основі проведених експериментальних досліджень та побудованої моделі енергетичної взаємодії системи «біотканина – імплантат» у міліметровому діапазоні сформульовано критерії електромагнітної сумісності матеріалів. Вони базуються на порівнянні випромінювальних характеристик біологічної тканини та імплантаційного матеріалу, які описуються через коефіцієнт випромінювальної здатності β та відносну енергетичну різницю δP .

Електромагнітна сумісність у даному підході розглядається як здатність двох середовищ перебувати в стані мінімальної енергетичної невідповідності при тепловому електромагнітному випромінюванні. Чим ближчими є значення коефіцієнта β для біотканини та імплантату, тим більш рівномірним є розподіл енергетичного потоку на межі їх контакту та тим менше виникають локальні неоднорідності електромагнітного поля.

Інтегральним критерієм електромагнітної узгодженості є відносна різниця потужностей випромінювання (формула 3.20).

Оскільки потужність випромінювання визначається через коефіцієнт випромінювальної здатності β , отримуємо формулу 3.21.

Таким чином, параметр δP відображає ступінь відхилення електромагнітних характеристик імплантату від біологічної тканини. Чим менше значення δP , тим вищий рівень електромагнітної сумісності між середовищами.

Для коректності подальших розрахунків об'єкти 1 та 13 не включалися до визначення параметрів ΔP та δP як еталонні зразки (біологічна тканина та абсолютно чорне тіло відповідно).

З практичної точки зору запропонований критерій дозволяє розглядати систему «біотканина – імплантат» як таку, що наближається до квазістаціонарного енергетичного балансу. У випадку виконання умови $\beta_{\text{бт}} \approx \beta_{\text{імп}}$ система характеризується мінімальним енергетичним градієнтом на межі поділу, що відповідає більш рівномірному розподілу теплового електромагнітного випромінювання.

Практичне значення підходу полягає у можливості використання параметрів β , ΔP та δP як критеріїв попереднього відбору імплантаційних матеріалів. Вони можуть застосовуватися для раннього скринінгу матеріалів та оцінки їх електромагнітної наближеності до біологічних тканин як доповнення до класичних механічних, хімічних і біологічних критеріїв біосумісності.

Водночас модель має обмеження, оскільки описує лише електромагнітну складову взаємодії та не враховує біохімічні процеси, клітинні реакції, імунну відповідь та динаміку загоєння тканин. Крім того, розрахунки базуються на усереднених параметрах і не враховують просторову неоднорідність реальних біологічних структур, тому результати слід розглядати як модель першого наближення.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням частотного діапазону вимірювань, аналізом багатопарових біологічних систем та розвитком комплексних моделей, що поєднують електромагнітні, теплові та біохімічні процеси.

ВИСНОВОК ДО 3 РОЗДІЛУ

У третьому розділі проведено комплексні експериментальні дослідження теплового електромагнітного випромінювання біологічних тканин, природних біоматеріалів та синтетичних імплантаційних матеріалів у міліметровому діапазоні частот. На основі використання високочутливої радіометричної системи виконано реєстрацію слабоінтенсивного власного випромінювання досліджуваних зразків та отримано інтегральні значення потужності випромінювання для кожного типу матеріалів.

У результаті експериментальних вимірювань встановлено суттєві відмінності між групами матеріалів, що пов'язані з їх фізико-хімічною структурою та електродинамічними властивостями. Найвищі значення інтегральної потужності випромінювання та коефіцієнта випромінювальної здатності β характерні для м'яких біологічних тканин. Це пояснюється високим вмістом води, наявністю іонних компонентів та активними процесами дипольної поляризації, які інтенсифікують теплове електромагнітне випромінювання у міліметровому діапазоні.

Кісткові структури демонструють знижені, але все ще відносно високі значення β порівняно з іншими групами матеріалів. Це зумовлено їх частковою мінералізацією, зменшеним вмістом вільної води та більш щільною кристалічною організацією, що обмежує рухливість дипольних структур і знижує ефективність релаксаційних процесів. Таким чином, кісткова тканина займає проміжне положення між м'якими біологічними тканинами та діелектрично інертними матеріалами.

Колагенові та желатинові матеріали характеризуються ще нижчими значеннями коефіцієнта β , незважаючи на органічне походження. Їх випромінювальна здатність визначається переважно пористою структурою, частковим вмістом води та відсутністю повноцінної клітинної організації. Це призводить до ослаблення колективних дипольних ефектів і зниження інтенсивності теплового випромінювання.

Найменші значення β зафіксовано для керамічних та синтетичних полімерних матеріалів. Їх низька випромінювальна здатність зумовлена практично повною відсутністю водної фази, слабкою орієнтаційною поляризацією та високою структурною стабільністю. У випадку керамік додаткову роль відіграє кристалічна будова та обмежена рухливість заряджених частинок, що ще більше знижує рівень теплового електромагнітного випромінювання.

Отримані результати підтверджують наявність чіткої градації матеріалів за коефіцієнтом випромінювальної здатності β , яка відповідає зменшенню біологічної активності середовища у електромагнітному сенсі: м'які біотканини $\rightarrow$ кісткова тканина $\rightarrow$ органічні біоматеріали $\rightarrow$ керамічні та синтетичні діелектрики. Така послідовність узгоджується з фізичними уявленнями про роль води та дипольної релаксації у формуванні теплового випромінювання.

Окремо слід зазначити, що отримані експериментальні значення загалом добре узгоджуються з теоретичною моделлю теплового шумового випромінювання, яка базується на наближенні Релея–Джинса для міліметрового діапазону частот. Виявлені відхилення між теоретичними та експериментальними даними можуть бути пояснені реальними фізичними факторами, такими як неоднорідність структури матеріалів, локальні зміни вологості, багатозфазність зразків, а також обмеження вимірювальної системи, включаючи власні шуми та похибки калібрування.

Проведений аналіз дозволив обґрунтувати використання коефіцієнта β як узагальненого кількісного параметра для порівняння електромагнітних властивостей різних матеріалів. Його застосування забезпечує можливість нормованого порівняння біологічних тканин та імплантаційних матеріалів незалежно від їх геометрії та абсолютних енергетичних характеристик.

На основі експериментальних даних також побудовано модель енергетичної взаємодії системи «біотканина – імплантат», що дозволяє оцінювати ступінь їх електромагнітної узгодженості. Встановлено, що зменшення різниці між коефіцієнтами β біотканини та імплантаційного матеріалу призводить до

зниження енергетичної невідповідності системи та більш рівномірного розподілу теплового електромагнітного поля на межі їх контакту.

Додатково визначено, що параметри ΔP та δP можуть бути використані як кількісні критерії оцінки ступеня електромагнітної сумісності матеріалів. Вони дозволяють не лише порівнювати різні групи матеріалів між собою, але й виконувати їх ранжування за ступенем наближення до характеристик біологічної тканини.

Таким чином, результати третього розділу підтверджують, що електромагнітні властивості біологічних та синтетичних матеріалів у міліметровому діапазоні визначаються сукупністю їх структурних, діелектричних та молекулярних характеристик. Отримані закономірності мають як фундаментальне значення для розуміння процесів теплового випромінювання у складних біосистемах, так і практичне значення для оцінки та попереднього відбору імплантаційних матеріалів за критеріями електромагнітної сумісності.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто процеси електромагнітної взаємодії системи «біотканина – діелектричний імплантат» на основі уявлення про теплове електромагнітне випромінювання біологічних середовищ. Проведений аналіз показав, що біотканини можуть бути представлені як складні дисипативні електромагнітні системи, у яких постійно відбуваються процеси генерації слабких електромагнітних коливань статистичної природи. Джерелом цих коливань є тепловий рух іонів, полярних молекул води, заряджених компонентів клітинних структур та релаксаційні процеси в неоднорідному середовищі тканини.

У першому розділі було проаналізовано фізичні та електрофізичні особливості біотканин і діелектричних імплантатів як об'єктів електромагнітної взаємодії. Показано, що біологічні тканини мають складну багатокomпонентну структуру, яка поєднує провідні та діелектричні властивості. Встановлено, що основний внесок у формування електромагнітних характеристик тканин здійснюють вода, іонні компоненти та поляризаційні процеси на клітинному рівні. Також було розглянуто особливості діелектричних імплантатів та показано, що їхні електромагнітні параметри визначаються структурою матеріалу, рівнем внутрішніх втрат та здатністю до поляризації.

У другому розділі розроблено фізичну модель біотканини як джерела теплового електромагнітного випромінювання. Біотканину описано як активне шумогенеруюче середовище, в якому тепловий рух заряджених частинок призводить до виникнення випадкових мікрострумів та слабких електромагнітних полів. На основі статистичного підходу та моделі Найквіста–Больцмана встановлено зв'язок між температурою системи, її електрофізичними параметрами та інтенсивністю випромінювання.

У роботі показано, що реальні біотканини та імплантовані матеріали відрізняються від моделі абсолютно чорного тіла, тому для їх опису введено коефіцієнт випромінювальної здатності β . Цей параметр характеризує

ефективність перетворення внутрішньої теплової енергії у електромагнітне випромінювання та узагальнює вплив провідності, діелектричної проникності, вмісту води, поляризаційних і релаксаційних процесів у середовищі.

На основі закону Кірхгофа встановлено, що випромінювальні властивості біотканини та імплантату безпосередньо пов'язані з їх дисипативними характеристиками. Показано, що будь-яке середовище, здатне поглинати електромагнітну енергію, одночасно є джерелом власного теплового випромінювання. Це дозволило розглядати біотканину та імплантат у межах єдиної енергетичної моделі.

У межах енергетичного підходу запропоновано параметр енергетичної взаємодії ΔP , який визначає напрямок та інтенсивність переносу теплового електромагнітного випромінювання між компонентами системи. Встановлено, що характер взаємодії визначається співвідношенням коефіцієнтів випромінювальної здатності та температур біотканини й імплантату.

На основі запропонованої моделі виділено три основні режими взаємодії системи «імплантат – біотканина»:

- рівноважний режим, при якому енергетичний обмін між компонентами є симетричним;
- режим переважання біотканини, коли основний внесок у формування електромагнітного поля здійснює природне середовище;
- режим переважання імплантату, за якого домінуючим джерелом випромінювання стає імплантований матеріал.

Показано, що перехід між цими режимами відображає зміну енергетичної узгодженості системи та може впливати на умови функціонування імплантату в біологічному середовищі. Таким чином, електромагнітна сумісність імплантату з біотканиною визначається не лише механічними чи біохімічними характеристиками, а й особливостями їх теплової електромагнітної взаємодії.

У третьому розділі проведено експериментальне дослідження коефіцієнтів випромінювальної здатності різних матеріалів біологічного та імплантаційного походження. На основі отриманих результатів встановлено, що значення β

суттєво залежать від структури матеріалу, вмісту води, пористості та електрофізичних характеристик середовища. Виявлено, що біологічні тканини та матеріали з високим вмістом води демонструють вищі значення β завдяки інтенсивнішим дипольним і релаксаційним процесам.

Проведений порівняльний аналіз показав, що різні імплантаційні матеріали мають різний рівень електромагнітної активності, а отже можуть формувати різні режими взаємодії з навколишніми тканинами. Це підтверджує доцільність використання коефіцієнта β як узагальненого параметра оцінки електромагнітної сумісності системи «імплантат – біотканина».

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованого підходу для оцінювання енергетичної узгодженості імплантатів із біологічними тканинами. Отримані результати можуть бути застосовані при виборі та розробці імплантаційних матеріалів із заданими електромагнітними властивостями, а також для подальшого моделювання процесів взаємодії в біомедичних системах.

Отже, у роботі сформовано цілісну фізичну модель теплової електромагнітної взаємодії системи «біотканина – імплантат», яка поєднує статистичний, електродинамічний та енергетичний підходи і дозволяє описувати особливості енергетичного обміну між біологічним середовищем та імплантованими матеріалами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhu, G., Zhang, T., Chen, M., Yao, K., Huang, X., Zhang, B., Li, Y., Liu, J., Wang, Y., & Zhao, Z. (2021). Bone physiological microenvironment and healing mechanism: Basis for future bone-tissue engineering scaffolds. *Bioactive materials*, 6(11), 4110–4140. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.03.043>.
2. Zhu, T., Cui, Y., Zhang, M., Zhao, D., Liu, G., & Ding, J. (2020). Engineered three-dimensional scaffolds for enhanced bone regeneration in osteonecrosis. *Bioactive materials*, 5(3), 584–601. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.04.008>.
3. Oryan, A., Alidadi, S., Moshiri, A. *et al.* Bone regenerative medicine: classic options, novel strategies, and future directions. *J Orthop Surg Res* 9, 18 (2014). <https://doi.org/10.1186/1749-799X-9-18>.
4. Yoshikawa, H., & Myoui, A. (2005). Bone tissue engineering with porous hydroxyapatite ceramics. *Journal of artificial organs : the official journal of the Japanese Society for Artificial Organs*, 8(3), 131–136. <https://doi.org/10.1007/s10047-005-0292-1>.
5. Oleksiy Yanenko, Kostiantyn Shevchenko, Vladyslav Malanchuk, Oleksandra Golovchanska. (2019). Microwave Evaluation of Electromagnetic Compatibility of Dielectric Remedial and Therapeutic Materials with Human Body. *International Journal of Biomedical Materials Research*, 7(1), 37-43. <https://doi.org/10.11648/j.ijbmr.20190701.15>.
6. Yanenko O. Assessment of dielectric implantable biomaterials compatibility based on the level of low-intensity mm-range signals // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2020). [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.proceedings.com/content/054/054324webtoc.pdf> Останній вхід 28.03.2026.
7. Гоженко А., Горбачевський О. Електромагнітний гомеостаз і адаптація людини до стрес-факторів // Вісник Національної академії наук України.

2009. № 10. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/visnyk/article/view/4321/3703> Останній вхід 28.03.2026.
8. Huzum, B., Puha, B., Necoara, R. M., Gheorghevici, S., Puha, G., Filip, A., Sirbu, P. D., & Alexa, O. (2021). Biocompatibility assessment of biomaterials used in orthopedic devices: An overview (Review). *Experimental and therapeutic medicine*, 22(5), 1315. <https://doi.org/10.3892/etm.2021.10750>.
 9. Y. Peng *et al.*, "Bioelectromagnetic Identification and Analysis of Tissues by Dual-Port Electromagnetic Methodology," in *Electromagnetic Science*, vol. 3, no. 3, pp. 0110432-1-0110432-12, September 2025, Art no. 0110432, doi: 10.23919/emsci.2025.0043.
 10. C. Gabriel *et al* 1996 *Phys. Med. Biol.* 41 2231 DOI 10.1088/0031-9155/41/11/001.
 11. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) // *Health Physics*. 2020. Vol. 118, № 5. P. 483–524. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf> Останній вхід 07.04.2026.
 12. Pall M. L. (2021). Millimeter (MM) wave and microwave frequency radiation produce deeply penetrating effects: the biology and the physics. *Reviews on environmental health*, 37(2), 247–258. <https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0165>.
 13. Mehrotra, P., Chatterjee, B., & Sen, S. (2019). EM-Wave Biosensors: A Review of RF, Microwave, mm-Wave and Optical Sensing. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(5), 1013. <https://doi.org/10.3390/s19051013>.
 14. Jing, R., Jiang, Z., & Tang, X. (2024). Advances in Millimeter-Wave Treatment and Its Biological Effects Development. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(16), 8638. <https://doi.org/10.3390/ijms25168638>.
 15. Sienkiewicz Z. (1998). Biological effects of electromagnetic fields and radiation. *Journal of radiological protection : official journal of the Society for*

- Radiological Protection*, 18(3), 185–193. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/18/3/005>.
16. Sherrard RM, Morellini N, Jourdan N, El-Esawi M, Arthaut L-D, Niessner C, et al. (2018) Low-intensity electromagnetic fields induce human cryptochrome to modulate intracellular reactive oxygen species. *PLoS Biol* 16(10): e2006229. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2006229>.
 17. Busljeta, I., Gomzi, M., & Trosić, I. (2000). Biološki učinci neionizirajućeg zračenja: elektromagnetska polja izrazito niskih frekvencija [Biological effects of nonionizing radiation: low frequency electromagnetic fields]. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 51(1), 35–51..
 18. Voloshyn, Y., Kulish, S., Oliinyk, V., & Frolov, A. (2021). Study of the effects of ultra-low intensity electromagnetic fields on biological objects. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1(62)), 19–26. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.244643>.
 19. Gerardi, G., De Ninno, A., Prosdocimi, M. *et al.* Effects of electromagnetic fields of low frequency and low intensity on rat metabolism. *BioMag Res Tech* 6, 3 (2008). <https://doi.org/10.1186/1477-044X-6-3>.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У даній роботі досліджуються процеси теплового електромагнітного випромінювання біотканин та імплантованих матеріалів, а також їх взаємодія в рамках моделі «імплантат – біотканина». Оскільки дослідження базується на аналізі електромагнітних процесів та математичному моделюванні, питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях є важливою складовою при виконанні роботи. Дотримання відповідних норм забезпечує безпечні умови роботи з обчислювальною технікою та мінімізує потенційні ризики для здоров'я.

Охорона праці під час виконання досліджень

Основна частина досліджень виконується із застосуванням персонального комп'ютера для математичного моделювання, обробки експериментальних даних та побудови графіків. У зв'язку з цим робоче місце повинно відповідати санітарно-гігієнічним вимогам, які регламентують тривалість безперервної роботи за комп'ютером, рівень освітлення, відстань до монітора та ергономіку робочого місця.

Під час роботи з комп'ютерною технікою основними шкідливими факторами є тривале статичне навантаження на опорно-руховий апарат, зорове навантаження, а також вплив електромагнітного випромінювання низької інтенсивності від електронних пристроїв. Для зменшення цих впливів рекомендується дотримуватися режиму праці та відпочинку, робити регулярні перерви, а також використовувати правильно організоване робоче місце.

Особливу увагу слід приділяти гігієні зору, оскільки тривала робота з графічними матеріалами та текстовою інформацією може призводити до втоми очей. Рекомендовано періодично виконувати вправи для зменшення напруження зорового апарату та контролювати відстань до екрана.

Електромагнітна безпека

Оскільки тематика роботи пов'язана з аналізом електромагнітного випромінювання у міліметровому діапазоні, необхідно враховувати загальні вимоги електромагнітної безпеки. У реальних умовах електромагнітні поля

можуть впливати на біологічні системи залежно від їх інтенсивності, частоти та тривалості впливу.

У роботі розглядаються низькоінтенсивні теплові електромагнітні процеси, однак навіть для таких рівнів випромінювання у практичних застосуваннях необхідно дотримуватися міжнародних рекомендацій щодо гранично допустимого впливу електромагнітних полів. Зокрема, рекомендації міжнародних організацій передбачають контроль інтенсивності випромінювання з метою запобігання можливим біологічним ефектам при тривалому впливі.

У контексті даного дослідження важливим є також те, що біологічні тканини та імпланти самі є джерелами слабого теплового електромагнітного випромінювання. Це підкреслює необхідність врахування енергетичної взаємодії між середовищами при розробці медичних імплантаційних матеріалів та оцінці їх сумісності з організмом людини.

Безпека в надзвичайних ситуаціях

Під час виконання роботи використовується електронне обладнання, тому потенційними надзвичайними ситуаціями можуть бути коротке замикання, перегрів обладнання або відмова електричних компонентів. Для запобігання таким ситуаціям необхідно дотримуватися правил експлуатації електронної техніки, не перевантажувати електромережу та використовувати справні кабелі й роз'єми.

У разі виникнення аварійної ситуації (задимлення, запах гару, іскріння обладнання) необхідно негайно припинити роботу, знеструмити обладнання та повідомити відповідальних осіб. Робоче приміщення повинно бути обладнане засобами первинного пожежогасіння, такими як вогнегасник, а також забезпечене вільним доступом до евакуаційних виходів.

Додатково слід дотримуватися правил електробезпеки, не допускати використання пошкодженого обладнання та уникати контакту з відкритими струмопровідними частинами.