

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна Факультет радіофізики, біомедичної
електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра ФБМЕ та КІТ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

підпис ініціали, прізвище
“ _____ ” _____ 20__ року

Кваліфікаційна робота магістра
на тему: ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ БІОЛОГІЧНИХ
РІДИН НА ЇХ ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ

. Виконав: студент II курсу магістратури, групи РЕ-61
спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка освітньо-
професійна програма «Фізична та біомедична електроніка»
Давид Велієв.

Керівник Валентин Кожешкурт. Кандидат
фізико-математичних наук

Консультант Валентин Кожешкурт Кандидат
фізико-математичних наук

2023 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Факультет Радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

Кафедра ФБМЕ та КІТ

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка

Освітньо-професійна програма Фізична та біомедична електроніка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

_____Велієв Давид Ілдіримович_____

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1.Тема роботи : Дослідження впливу складу біологічних рідин на їх електропровідність.

Керівник роботи _____Кожешкурт Валентин Олександрович _____Кандидат фізико
– математичних наук,старший викладач кафедри ФБМЕ та КІТ

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “ ____ ” _____20__року№____

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

3.1 Розробити аналіз сировотки крові на векторному аналізаторі ланцюгів.

3.3 Розробити алгоритм розрахунку діелектричну проникливість.

3.4 Розробити алгоритм розрахунку питомій провідності.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Аналіз технічного завдання
2	Огляд теоретичної літератури
3	Виконання лабораторного дослідження
4	Розробка розрахунку питомої провідності
5	Розробка розрахунку діелектричної проникливості
6	Графічне представлення
7	Оформлення висновку
8	Підготовка до захисту

5. Дата видачі завдання _____

Студент _____ підпис ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ підпис ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Дослідження впливу складу біологічних рідин на їх електропровідність.
Кваліфікаційна робота магістра.

Дипломна робота містить 43 сторінок, 16 ілюстрацій, 13 бібліографічних джерел.

Об'єкт дослідження – сироватка крові щурів старих і молодих , поранених і не поранених.

Предмет дослідження – діелектрична проникливість , питома провідність.

Мета роботи – побудова залежності діелектричної проникливості ,питомої провідності від віку та умов організму до поранень.

Методи дослідження: векторний аналіз ланцюгів ,кондуктометрія ,резонатор електропровідності.

Результати дослідження: У ході проведеного експерименту виявлено, що група сироватки крові щурів проявляє підвищену електропровідність при збільшенні частоти стимулюючого впливу. Зазначено, що цей ефект виявляє значний вплив на питому провідність, але в старших особин статистично зафіксовано значення нижче, ніж у молодших. Дослідження показує, що поранення має мінімальний ефект на зазначені параметри. Було встановлено, що фізичні властивості сироватки крові, включаючи діелектричну проникність, залежать як від віку, так і від наявності поранення.

ABSTRACT

Veliev D.I.. Investigation of the influence of the composition of biological fluids on their electrical conductivity. Master's thesis. V. N. Karazin Kharkiv National University, 2023, 78 p., 29 figs. x tables, 43 sources.

Object of study - blood serum of old and young rats, injured and uninjured.

Subject of the study - dielectric constant, specific conductivity.

Purpose of the study - to determine the dependence of dielectric constant and specific conductivity on the age and conditions of the organism before the injury

Research methods: vector analysis of circuits, conductometry , conductivity resonator

Results of the study: In the course of the experiment it was found that the blood serum group of rats shows increased electrical conductivity with increasing frequency of stimulating influence. It is noted that this effect has a significant impact on the specific conductivity, but in older animals, the value is statistically lower than in younger ones. The study shows that wounding has a minimal effect on these parameters. It was found that the physical properties of blood serum, including dielectric constant, depend on both age and the presence of a wound.

Зміст

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	8
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ БІОЛОГІЧНИХ РІДИН	10
1.1. Поняття про електропровідність	10
1.2. Біологічні рідини з електропровідністю	12
1.3. Теорія електропровідності біологічних рідин	13
1.4. Фактори, що впливають на електропровідність біологічних рідин	15
2. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ БІОЛОГІЧНИХ РІДИН	17
2.1. Теоретичні моделі.....	17
2.2. Вимірювання провідності.....	18
2.3. Взаємозв'язок між провідністю крові та показниками крові.....	21
2.4. Закон Ома.....	23
2.5. Висновок	23
3. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ.....	23
3.1. Мета експерименту.....	23
3.2. Методичні етапи з організації з експериментальної роботи.	24
3.2.1. Обладнання	24
3.3. Зразки сироватки крові щурів	27
3.4. Хід проведення експерименту.....	28
4. Порівняльний аналіз електропровідності та діелектричної проникності сироватки крові щурів.....	31
4.1. Хід розрахунків на прикладі перших 10 точок.	31
4.2. Графічне представлення виміряних показників сироватки крові щурів.....	34
Висновки	40
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	42

ВСТУП

Тема "Дослідження впливу складу біологічних рідин на їх електропровідність" видається дуже цікавою та актуальною у контексті сучасних досліджень в галузі біології, медицини та фізики. Ця тема може відкрити нові можливості для розуміння особливостей біологічних рідин та їх впливу на фізичні властивості.

Основні аспекти обґрунтування дослідження:

Важливість для медицини: Знання про електропровідність біологічних рідин може мати прямий вплив на розуміння фізіологічних процесів в організмі. Розуміння електропровідності може допомогти в розробці нових методів діагностики та моніторингу захворювань, особливо тих, що пов'язані зі змінами в складі біологічних рідин.

Зв'язок з фізико-хімічними властивостями рідин: Дослідження електропровідності пов'язане з хімічним складом рідин, а отже, може допомогти в розкритті фізико-хімічних процесів, які відбуваються в організмі. Вивчення впливу окремих компонентів на електропровідність може розкрити нові закономірності в системі.

Можливість розробки нових технологій: Отримані результати можуть стати основою для розробки нових технологій в галузі медицини та біотехнологій. Наприклад, можливість використання електропровідності для контролю за станом організму чи розробка нових методів лікування.

Актуальність для сучасних наукових досліджень: Враховуючи сучасний рівень розвитку наукових технологій, дослідження в області електропровідності біологічних рідин може використовувати сучасні методи аналізу та моделювання.

Загальною метою дослідження є розуміння взаємозв'язків між складом біологічних рідин та їх електропровідністю для подальшого використання цих знань у практиці, а також для розвитку більш глибокого розуміння процесів, що відбуваються в живому організмі.

Дисперсія імпедансу біологічних середовищ: Дослідження дисперсії імпедансу у біологічних рідинах може розкрити інформацію про їхню діелектричну поведінку в широкому діапазоні частот. Аналіз дисперсії може

допомогти визначити внутрішню структуру та характеристики біологічних систем, що є важливим для розуміння їхньої функціональної активності. Розгляд дисперсії імпедансу в залежності від фізіологічних параметрів може мати потенційне значення для визначення здоров'я тканин та виявлення патологій.

Дипломна робота присвячена питанню проведення дослідження впливу складу біологічних рідин сироватки крові щурів на їх діелектричну проникливість та питому провідність.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ БІОЛОГІЧНИХ РІДИН

1.1. Поняття про електропровідність

Електропровідність - це властивість матеріалів передавати електричний струм. Вона визначає, наскільки легко електрони можуть рухатися через матеріал. Електропровідність є однією з основних фізичних властивостей матеріалів і важливою характеристикою для багатьох практичних застосувань.

Матеріали можуть бути поділені на три основні класи на основі їхньої електропровідності:

Провідники: Це матеріали з високою електропровідністю, де електрони легко рухаються. Метали, такі як мідь, алюміній і золото, є хорошими прикладами провідників.

Напівпровідники: мають середню електропровідність, яка може контролюватися за допомогою різноманітних методів, таких як додавання домішок. Напівпровідники використовуються у виробництві напівпровідникових приладів, таких як транзистори і діоди.

Діелектрики: Діелектрики мають дуже низьку електропровідність. Електрони в діелектриках майже не рухаються, і вони служать як добрі ізолятори. Діелектрики використовуються для ізоляції електричних проводів і збереження електричної енергії у конденсаторах.

Залежно від будови діелектрики можна поділити на:

Полярні діелектрики - діелектрики, молекули яких мають асиметричну будову. У таких молекулах центри розподілу позитивних і негативних зарядів зсунуті один відносно одного на деяку відстань. Тому кожна молекулу полярного діелектрика можна розглядати як електричний диполь.

У діелектрику, що складається з полярних молекул, диполі орієнтовані хаотично. У зовнішньому електричному полі полярні діелектрики орієнтуються так, щоб напрямок їхнього вектору дипольного моменту був паралельний силовим лініям електричного поля. Це явище отримало назву дипольно-орієнтованої (орієнтаційної) поляризації (Рис.1.1).

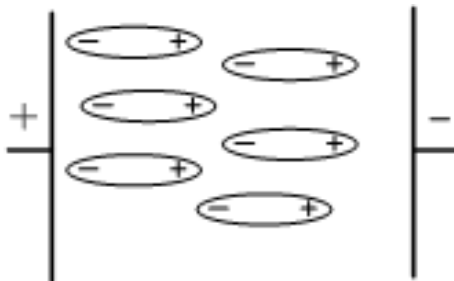


Рис. 1.1 Дипольно-орієнтована (орієнтаційна) поляризація полярних молекул діелектрика

Неполярні діелектрики - це діелектрики, молекули яких симетричні. У таких молекулах центри розподілу позитивних і негативних зарядів збігаються, тобто молекули не мають дипольного моменту. Якщо помістити такий діелектрик у зовнішнє поле, то електронні оболонки атомів його молекул зміщуються відносно ядра і молекули перетворюються на диполі, які потім орієнтуються вздовж силових ліній електричного поля. Цей вид поляризації називається електронною поляризацією.

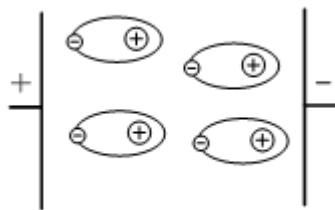


Рис. 1.2 Електронна поляризація неполярних молекул діелектрика

Під час накладення зовнішнього електричного поля полярні та неполярні діелектрики не тільки орієнтуються вздовж поля, а й зміщуються в межах провідного та непровідного середовища. Це призводить до виникнення внутрішнього поля зв'язаних зарядів, яке зменшує зовнішнє поле.

Кількісно явище поляризації характеризується величиною діелектричної проникності ϵ :

$$\epsilon = \frac{E_0}{E} \quad (1.1)$$

де E_0 - напруженість зовнішнього електричного поля у вакуумі, E - напруженість електричного поля в середовищі, що дорівнює різниці E_0 . Діелектрична проникність відображає ступінь зменшення напруженості електричного поля в різних середовищах щодо вакууму.

1.2. Біологічні рідини з електропровідністю

Приклади біологічні рідин з їхніми електропровідними властивостями:

- Кров — Електропровідність крові зумовлена наявністю електролітів, тобто частинок з електричним зарядом, у її складі. Присутність позитивно і негативно заряджених іонів, таких як натрій (Na^+), калій

(K⁺), кальцій (Ca²⁺), хлор (Cl⁻) та інші, забезпечує електричну провідність крові.

- Електроліти в клітинних мембранах: Мембранні фосфоліпіди містять заряджені головки, що робить клітинні мембрани такими, що частково проводять електрику.
- Білки: Іоноселективні канали та насоси, деякі білки в клітинних мембранах специфічно передають іони, забезпечуючи електропровідність.
- Нуклеїнові кислоти: ДНК і РНК :Ці макромолекули мають заряджені групи, що надає їм електропровідності.
- Електрична активність у нервових клітинах: Іонні канали в нейронах, відкриття і закриття забезпечує перенесення заряду і створення електричних імпульсів.

Електропровідність біологічних речовин залежить від їхнього складу та структури. Іони металів є найбільш електропровідними, оскільки вони мають високу рухливість. Білки та нуклеїнові кислоти також можуть бути електропровідними, але їхня електропровідність нижча, ніж в іонів металів. Полісахариди, як правило, менш електропровідні, ніж білки та нуклеїнові кислоти. Також присутня залежність електропровідності від температури

1.3. Теорія електропровідності біологічних рідин

Теорія електропровідності біологічних рідин пояснює, як електричний струм тече через ці рідини. Електропровідність біологічних рідин має важливе значення для відображення біологічних процесів і тому в діагностиці це можна використовувати.

Електропровідність біологічних рідин також використовується в медичних дослідженнях. Наприклад, електропровідність клітинних мембран використовується для вивчення функції клітин. Електропровідність тканин

використовується для діагностики захворювань. Наприклад дослідження яке було опубліковане у роботі [1] Юкен Оміне і Тадаокі Морімото. Основними цілями цього дослідження були дві: по-перше, визначити електропровідність тканин за допомогою неінвазивного вимірювання електричного біоімпедансу, а по-друге, започаткувати новий метод діагностики, який отримав назву електроімпедансної томографії.

Для цього були ретельно розроблені моделі тканин, які враховували розподіл жирової тканини, м'язів і кісток у передпліччі людини. Згодом внутрішньо тканинний розподіл електричного потенціалу і поля, а також електричний імпеданс були проаналізовані теоретично за допомогою тривимірному методу скінченних елементів. Було проведено вимірювання електричного імпедансу в передпліччях здорових людей, що дозволило оцінити електропровідність окремих локальних тканин.

Результати показали, що на розподіл електричного потенціалу і поля впливає наявність жирової тканини, але не наявність або відсутність кістки. Більше того, розрахунок електричного опору позаклітинної рідини в кожній моделі показав, що на значення біоімпедансу впливає наявність жирової тканини, що призводить до збільшення значення біоімпедансу при втручанні жирового шару.

Шляхом підбору спостережуваних значень до значень, отриманих за допомогою скінченного-елементного аналізу, оцінена електропровідність для м'язової та жирової тканини чоловіків становила 0,40 См/м і 0,15 См/м, відповідно, а для м'язової та жирової тканини жінок - 0,35 См/м і 0,11 См/м, відповідно. Розбіжність у нахилі лінійної апроксимації між чоловіками і жінками при оцінці електропровідності пояснюється статевими відмінностями у властивостях і структурі жирової тканини.

Ці результати свідчать про те, що через шкірне вимірювання локального біоімпедансу з подальшою оцінкою електропровідності для

кожної тканини дозволяє проводити диференціальну та електричну діагностику локальних тканин.

1.4. Фактори, що впливають на електропровідність біологічних рідин

Електропровідність біологічних рідин залежить від різних факторів, які можуть впливати на її значення. Ось деякі з найважливіших факторів, що впливають на електропровідність біологічних рідин:

1. Концентрація іонів: Електропровідність біологічних рідин зазвичай залежить від концентрації іонів, таких як натрій (Na^+), калій (K^+), хлор (Cl^-), кальцій (Ca^{2+}), магній (Mg^{2+}), гідрокарбонат (HCO_3^-), фосфати і інші. Збільшення концентрації іонів зазвичай призводить до збільшення електропровідності.

2. Температура: Температура також впливає на електропровідність біологічних рідин. Електропровідність біологічних рідин також залежить від температури. Чим вища температура, тим вища електропровідність. Це пов'язано з процесом електролітичної дисоціації. У спрощеному процесі електролітичної дисоціації молекула електроліту розпадається на заряджені частинки - іони. Цей процес протікає з певною швидкістю, яка залежить від кількох чинників, у тому числі від температури.

При підвищенні температури енергія теплового руху молекул збільшується. Це призводить до того, що молекули електроліту набувають більшої швидкості і частіше стикаються одна з одною. Унаслідок таких зіткнень молекули електроліту з більшою ймовірністю можуть подолати сили тяжіння між собою і розпастися на іони.

Таким чином, підвищення температури призводить до збільшення швидкості електролітичної дисоціації. Це пов'язано з тим, що при підвищенні температури збільшується енергія теплового руху молекул електроліту, що призводить до частішого зіткнення молекул і збільшення ймовірності їхнього розпаду на іони.

Вплив температури на швидкість електролітичної дисоціації можна простежити на прикладі розчину соляної кислоти. За 0 °C ступінь дисоціації соляної кислоти становить близько 36 %, а за 100 °C - близько 90 %. Це означає, що при підвищенні температури від 0 °C до 100 °C ступінь дисоціації соляної кислоти збільшується у 2,5 рази.

3. рН-середовище: Кислотність (рН) біологічної рідини може впливати на електропровідність. Зміна рН може вплинути на заряд іонів та їхню роздільну здатність у рідині, що впливає на її електропровідність.

4. В'язкість: В'язкість рідини також може впливати на її електропровідність. Більш в'язкі рідини можуть затримувати рух іонів і менше допускати їх рух, що може призвести до зниження електропровідності.

5. Тиск: Зміни в тиску можуть впливати на розчинені гази у біологічних рідинах, що в свою чергу може вплинути на електропровідність.

6. Вміст білків: Білки також можуть впливати на електропровідність біологічних рідин. Білки зазвичай не є електролітами, і їх присутність може обмежити рух іонів у розчині, що призводить до зниження електропровідності.

7. Наявність лікарських речовин або інших хімічних сполук: Наявність різних хімічних речовин, таких як ліки або інші сполуки, може впливати на електропровідність біологічних рідин шляхом зміни концентрації іонів або в'язкості рідини.

2. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ БІОЛОГІЧНИХ РІДИН

Розрахунок електропровідності біологічних рідин може бути важким завданням через їхню складну природу та залежність від різних факторів. Проте існують різні теоретичні та експериментальні методи для оцінки електропровідності біологічних рідин. Ось деякі з найпоширеніших методів:

2.1. Теоретичні моделі

Існують різні математичні моделі, які дозволяють розраховувати електропровідність біологічних рідин на основі їхнього складу та фізичних властивостей. Один із новітніх підходів - машинного навчання: У дослідженні [2] Теодороса Е. Каракасідіса, Філіппоса Софоса та Крістоса Цоноса під назвою «Електропровідність іонних рідин: Чисельний та аналітичний підходи машинного навчання» запропоновано модель машинного навчання, яка може відтворювати та прогнозувати властивості іонних рідин, такі як електропровідність. Ця модель враховує умови навколишнього середовища, такі як температура і тиск, і підтримує узагальнення, додатково враховуючи атомну вагу рідини в процедурі прогнозування. Параметр електропровідності витягується як за допомогою чисельних методів машинного навчання, так і за допомогою символічної регресії, яка дає аналітичне рівняння за допомогою методів генетичного програмування.

2.2. Вимірювання провідності

Існує кілька експериментальних методів вимірювання електропровідності біологічних рідин.

Електролітичне вимірювання провідності:

Цей метод передбачає використання кондуктометра з коміркою провідності. Комірка містить зразок розчину і пропускає через себе електричний струм за допомогою електродів¹. Кондуктометр зазвичай оснащений датчиком температури і може виконувати температурну компенсацію значень провідності.

У практичному застосуванні переважаючим методом вимірювання електролітичної провідності є електродна техніка, що зазвичай використовує два електроди. Ці електроди відіграють вирішальну роль у полегшенні переходу від іонної провідності в розчинах електролітів до електронної провідності в металевих провідниках. Однак вони також можуть створювати значні проблеми. На межі розділу фаз завжди утворюється електродний шар з ємнісними властивостями електричного імпедансу, який називають "поляризаційним імпедансом".

Імпеданси електродів у поєднанні з зовнішніми по відношенню до комірки струмами (за відсутності закритої посудини) та електричними залишковими характеристиками комірки і її з'єднань є основними факторами, що впливають на зміну значення константи комірки. Ці зміни можна вважати "уявними змінами", оскільки геометрія комірки залишається незмінною. Еквівалентна схема практичного двохелектродного елемента наведена для довідки у роботі [3] Збігнєв Морон, Томаша Грисінського, кафедра біомедичної інженерії.

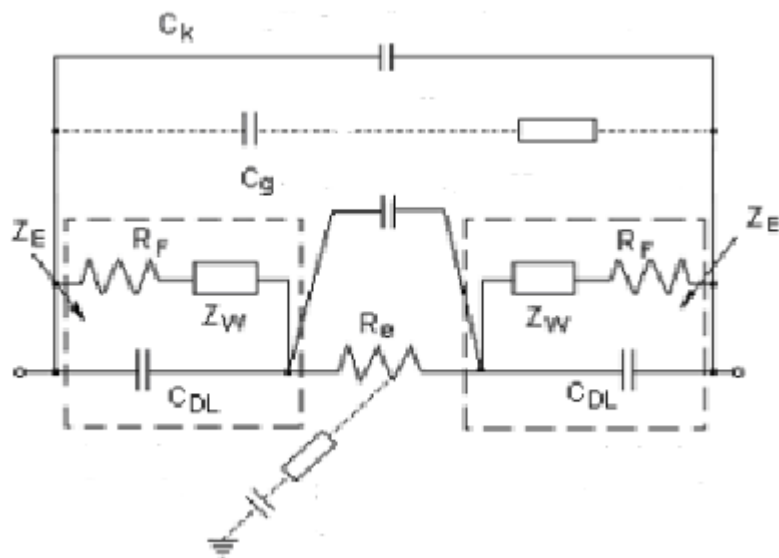


Рис.2.1 Еквівалентна схема двохелектродної комірки провідності [3]
(штрихові лінії оточують імпеданс електроди).

На рис. 2.1 R_E являє собою опір об'ємного розчину електроліту (вимірюваної величини), з'єднаного послідовно з двома електродними опорами Z_E , що складаються з подвійного шару ємності C_{DL} , дифузійних імпедансів, Z_W і фарадеївських опорів (опорів хімічних реакцій) R_F , де опорів) R_F , де Z_W і R_F залежать від частоти, можна показати, що вимірний опір датчика є сумою розв'язку опору і двох частотно-залежних поляризаційних опорів.

Результати дослідження:

Точність вимірювання електролітичної провідності здебільшого залежить від провідникової комірки та її властивостей. Зазвичай легше виготовити хороший кондуктометр, ніж хорошу комірку провідності. комірку провідності. Вибір відповідної комірки дво- або чотириелектродної та її параметрів значення константи комірки, матеріал і поверхня електродів та її параметрів. Застосування чотириелектродного методу рекомендується для вимірювань, що виконуються в діапазоні високих провідності, а

двохелектродний метод - у діапазоні низької провідності. провідності, а двоелектродний метод - у діапазоні низької провідності.

Крім того, коміркова константа чотириелектродних комірок може змінюватися в залежності від вимірюваної провідності, частоти вимірювання та електродів тобто стан поверхні, забруднення.

Вимірювання за допомогою діелектричного аналізу та спектроскопії електричного імпедансу:

Ці методи використовуються для вимірювання електропровідності біологічних рідин. У діелектричному аналізі використовується високочастотна область (100 МГц - 10 ГГц), яка має застосування у визначенні вологості та вимірюванні насипної щільності.

Кондуктометрія: це метод аналізу, який використовує вимірювання електричної провідності розчину для визначення концентрації. Принцип дії кондуктометрії полягає в тому, що в розчин вводяться два електроди, між якими пропускається електричний струм. Іони в розчині рухаються до електродів, створюючи електричний струм. Величина електричного струму залежить від концентрації іонів у розчині

Апарат теплопровідності: Цей метод передбачає використання модифікованого приладу теплопровідності для вимірювання провідності біологічних рідин.

При виконанні цих вимірювань важливо враховувати специфічні властивості рідини та умови, в яких проводяться вимірювання. Різні біологічні рідини можуть вимагати різних методів або коригування цих методів.

Молекулярні динамічні моделі біологічних рідин.

Молекулярні динамічні моделі біологічних рідин часто використовують для вивчення руху іонів та молекул у розчинах, що містять білки, нуклеїнові кислоти та інші біологічні макромолекули. Для цього дослідник створює модель системи, яка включає в себе всі необхідні

компоненти. Після того, як модель створена, вона запускається для проведення молекулярної динамічної симуляції. Симуляція дозволяє досліднику вивчати рух іонів та молекул у системі.

Діелектрометрія: використання діелектрометрії у дослідженнях електропровідності біологічних рідин може надати додаткову інформацію про діелектричні властивості рідини в залежності від прикладеної напруги та частоти. Діелектрометрія дозволяє вивчати зміни діелектричної проникності та інших параметрів, пов'язаних із зарядом, що може виявитися корисним у вивченні електрофізіологічних процесів біологічних рідин.

2.3. Взаємозв'язок між провідністю крові та показниками крові.

У рамках дослідження [4] було проведено вимірювання комплексного імпедансу 10 зразків крові від онкологічних пацієнтів при кімнатній 22.6 ± 0.8 °C та тілесній температурі $= 36.6 \pm 0.4$ °C за допомогою чотирьох-електродного зонда та гальваностата. Отримані дані комплексного імпедансу були використані для розрахунку провідності крові в діапазоні частот від 631 Гц до 100 кГц.

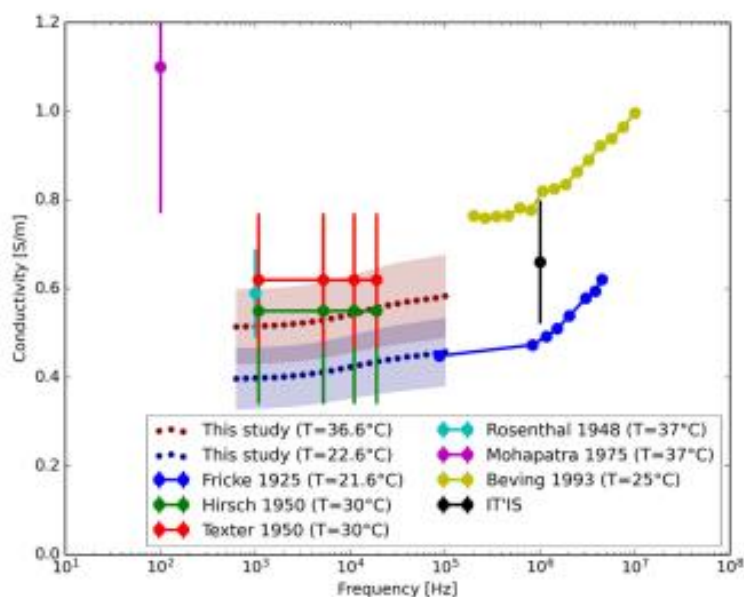


Рис.2.2 Середня провідність у См/м: зразків крові людини при кімнатній температурі (темно-синій колір - точки, заштриховані - середнє $\pm$ SD); зразків крові людини при температурі тіла (червоний колір - точки, заштриховані - середнє $\pm$ SD) при температурі тіла (темно-червоні точки, заштриховані - середнє значення $\pm$ SD); та значення провідності крові з літератури для провідності крові людини (середнє значення $\pm$ SD) Дані цього дослідження при температурі тіла температури тіла дуже близько збігаються з даними Hirsch та ін. [5] (зелена лінія) та Texter та ін. [6] при 30 °C (червона лінія), при температурі тіла (блакитна лінія). Середня різниця між даними та даними Hirsch et al. [7] становить 2,55%. Середня різниця між даними та даними Texter та ін. [6] становить 13,56%. Дані цього дослідження при $T = 23$ °C і при $f = 79$ кГц добре узгоджуються з даними Фріке і Морзе [8] (синя лінія) при $T = 21,6$ °C і $f = 87$ кГц, з різницею в 1,35% між цими двома значеннями. Інші літературні дані стосуються або вищих, або нижчих частот і наведені для ілюстрації показані для того, щоб проілюструвати розкид даних про провідність крові людини, наявних у літературі

Проведено повний аналіз крові для 8 зразків, і розраховано коефіцієнт кореляції Пірсона між електропровідністю та показниками крові на різних частотах. Три параметри аналізу крові - гематокрит (Hct), гемоглобін (Hgb), та кількість еритроцитів (RBC) - виявили найвищий коефіцієнт кореляції. Важливо відзначити, що коефіцієнт кореляції зменшується зі збільшенням частоти і досягає пікового значення при 631 Гц, яке є найнижчою реєстрованою частотою. Це перше дослідження, яке визначає низькочастотну провідність крові людини при температурі тіла за допомогою чотирьох-електродної техніки. Отримані результати є значущим внеском у сучасну літературу в цій галузі і сприятимуть подальшому розвитку медичних пристроїв.

2.4. Закон Ома

Закон Ома стверджує, що сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі на кінцях провідника і обернено пропорційна його опору.

$$I = U / R$$

де:

- I - сила струму, А;
- U - напруга, В;
- R - опірність, Ом.

Закон Ома можна застосувати для розрахунку сили струму в провіднику, якщо відомі напруга на його кінцях і його опірність.

2.5. Висновок

Розрахунок електропровідності біологічних рідин може бути складним завданням через велику кількість факторів, які впливають на цю властивість. Точність розрахунків залежить від якості даних та моделей, які використовуються. В багатьох випадках вимірювання електропровідності є найбільш надійним методом для отримання точних даних.

3. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ

3.1. Мета експерименту

1. Вивчення механізмів електропровідності в біологічних рідин, сироватки крові щурів.

2)Резонатор з вимірювальною коміркой

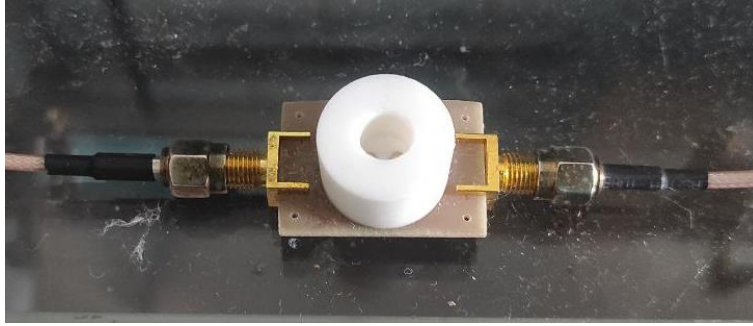


Рис 3.2 Резонатор з вимірювальною коміркою

Друкована комірка із пластику PLA об'ємом 400 мл, с резонатором електропровідності.

3) WALCOM HT-9815 - чотиріканальний цифровий термометр із термопарами К-типу та термопара

Портативний багатоканальний вимірювач температури з широким діапазоном вимірювання. Призначений для роботи з термопарами К-типу. За необхідності до приладу можна під'єднати широку номенклатуру термопар К-типу інших типів і виробників (зі стандартним виходом К-типу).



А)



Б_

Рис 3.3 –А) Термопара К-типу, Б)Портативний багатоканальний вимірювач температури з широким діапазоном вимірювання WALCOM HT-9815

Термопара - це термоелектричний перетворювач, який генерує електричний струм при різниці температур між двома спаями, виготовленими з різних металів або сплавів. Термопари широко використовуються в промисловості, науці та техніці для вимірювання температури.

Основним елементом термопари [8] є спай, який складається з двох металів або сплавів, які мають різні термоелектричні коефіцієнти. Термоелектричний коефіцієнт - це величина, яка характеризує здатність металу або сплаву генерувати електричний струм при різниці температур. Коли два спаї термопари знаходяться при різних температурах, між ними виникає термоелектричний струм. Напрямок струму залежить від того, який метал або сплав використовується для виготовлення спаїв.

Величина термоелектричного струму пропорційна різниці температур між спаями. Тому термопари можна використовувати для вимірювання температури. Термопара складається з двох проводів, які спаяні між собою. Один кінець проводів виведений за межі нагрівальної зони та з'єднаний з приладом, що показує перетворений сигнал одержаний від спаю термопари.

Для розрахунку температури за допомогою термопари використовується наступна формула:

$$T = T_0 + \Delta T/S$$

де:

T - температура, яку необхідно виміряти, в градусах Цельсія;

T₀ - температура холодного спаю термопари, в градусах Цельсія;

ΔT - різниця температур між холодним і гарячим спаями термопари, в градусах Цельсія;

S - коефіцієнт термоелектричної сили термопари, в мікрівольтах на градус Цельсія. Коефіцієнт термоелектричної сили термопари залежить від того, з яких металів або сплавів виготовлені спаї термопари

4) Мікропіпетка змінного об'єму



Рис 3.4 Мікропіпетка змінного об'єму

TOPSCIEN це ручні піпетки для складних лабораторних застосувань, велика центральна кнопка подачі піпетки має функції роздільного виштовхування та налаштування кількості збору зразка.

3.3. Зразки сироватки крові щурів

Експерименти проводили на щурах-самцях лінії Вістар у віці 3 і 20 місяців. У кожній віковій групі було по 4 тварин. [9] Усі процедури з тваринами проводили з дотриманням правил біоетики. У рамках експерименту чотирьом щурам, а саме 2 старим і 2 молодим, було завдано поранень середньої тяжкості, для порівняння різниці електропровідності.

Тварини завжди годувалися в один і той же час і утримувалися в стандартних умовах. Всі маніпуляції з тваринами проводилися до прийому їжі. Перед виділенням сироватки крові тварини не отримували їжі протягом 24

годин. Тварин завжди виводили з експерименту з 8:00 до 10:00 ранку за місцевим часом.

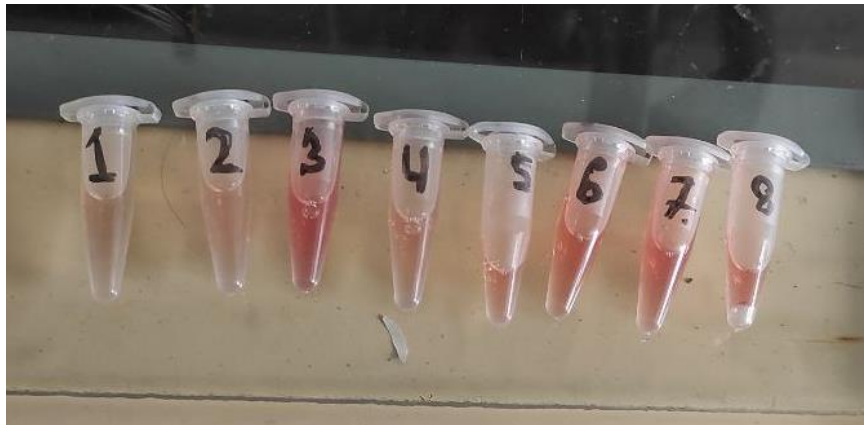


Рис.3.5 Сироватка крові щурів

1-2 сироватка крові старих щурів без поранень.

3-4 сироватка крові старих щурів з пошкодженням.

5-6 сироватка крові молодих щурів без поранень.

7-8 сироватка крові молодих щурів з пошкодженням.

3.4. Хід проведення експерименту

Вимірювання електропровідності сироватки крові

Сироватки крові щурів поміщали в комірку, виготовлену з матеріалу PLA, яка була підключена до двох портів векторного аналізатора Rohde & Schwarz ZNB 40. Електропровідність сироватки крові вимірювали в діапазоні частот від 100 кГц до 100 МГц .

Аналізатор автоматично вимірював S-параметри комірки, що включають в себе дійсну та уявну частини імпедансу, Z_{re} і Z_{im} . Ці параметри використовувалися для розрахунку електропровідності сироватки крові. Температура в кімнаті була 17 ± 0.6 С°, температура зразків була 17 ± 0.9 С°.

Для розрахунку електропровідності сироватки крові, імпеданс комірки перетворювався в еквівалентні параметри електричного кола, що складається з конденсатора і резистора, з'єднаних паралельно. Ємність C і опір R еквівалентного електричного кола можна було виразити через дійсну та уявну частини імпедансу за такими формулами:

$$C = \frac{1}{\omega(Z_{re}^2 + Z_{im}^2)} \quad (4.1)$$

$$R = Z_{re} \frac{Z_{im}^2}{Z_{re}} \quad (4.2)$$

Електропровідність вмісту вимірювальної комірки залежить від властивостей речовини, що міститься в ній, і від геометричних параметрів комірки. [10] Тому для уточнення результатів вимірювань було введено поправочний коефіцієнт k , який розраховується для конкретної конструкції комірки. Для циліндричної комірки об'ємом 1 мл цей коефіцієнт дорівнює 400 m^{-1} . Питома провідність σ обчислюється за такою формулою:

$$\sigma = k \frac{1}{R} \quad (4.3)$$

де:

k - поправочний коефіцієнт= 400

R - опір вимірювальної комірки

Біологічні рідини складаються з клітин і позаклітинної рідини, які містять іони та полярні молекули. Під впливом електромагнітних полів у тканинах виникають два процеси: коливання вільних зарядів і обертання

дипольних молекул. Коливання вільних зарядів призводять до виникнення струмів провідності, які супроводжуються втратами енергії. Обертання дипольних молекул впливає на струми зміщення.

$$\varepsilon(c) = k * \frac{C}{\varepsilon_0} \quad (4.4)$$

Діелектрична проникність, позначена як $\varepsilon(c)$, визначається де C відображає реальну частину діелектричної проникності, проникність у вакууму позначається як $\varepsilon_0 = 8,85 * 10^{-12}$.

Діелектрична проникність біологічних рідин є важливим параметром у багатьох біологічних і медичних застосуваннях. Це міра того, наскільки легко матеріал може бути поляризований електричним полем. Біологічні рідини, такі як кров, плазма і сироватка, в основному складаються з води, яка має діелектричну проникність близько 80. Однак присутність розчинених іонів та інших розчинених речовин може значно збільшити діелектричну проникність цих рідин.

Діелектрична проникність біологічних рідин є частотно-залежною, тобто змінюється залежно від частоти прикладеного електричного поля. Це відбувається тому, що молекули в цих рідинах можуть обертатися і вирівнюватися під дією електричного поля, але швидкість, з якою вони можуть це робити, залежить від частоти поля. [11,12] На низьких частотах молекули мають достатньо часу, щоб вирівнятися з полем, і діелектрична проникність висока. На високих частотах молекули не встигають вирівнятися з полем, і діелектрична проникність нижча.

Діелектрична проникність біологічних рідин також залежить від температури, тобто змінюється залежно від температури рідини. Це пов'язано з тим, що молекули в цих рідинах мають більше шансів обертатися і

вирівнюватися з електричним полем, коли вони перебувають при вищих температурах.

4. Порівняльний аналіз електропровідності та діелектричної проникності сироватки крові щурів

Здійснимо аналіз першого зразка сироватки крові від старого щура, який є інтактним(без поранень). Проведемо розрахунки діелектричної проникності та питомої провідності для обох проб цієї сироватки, після чого усереднимо отриманий кінцевий результат.

4.1. Хід розрахунків на прикладі перших 10 точок.

За допомогою векторного аналізатора ланцюгів, через резонатор із вимірювальною коміркою були отримані величини дійсної (Z_{re}) та уявної (Z_{im}) частин імпедансу з двох проб.

Табл.4.1 Значення дійсної Z_{re} та уявної Z_{im} частини імпедансу двох проб.

	1 Проба		2 Проба	
freq[Hz]	Z_{re}	Z_{im}	Z_{re}	Z_{im}
1,000000E+05	5,52E+02	- 1,55E+02	5,20E+02	- 1,13E+02
1,000206E+05	5,49E+02	- 1,62E+02	5,20E+02	- 1,17E+02
1,000412E+05	5,47E+02	- 1,55E+02	5,13E+02	- 1,12E+02
1,000619E+05	5,46E+02	- 1,56E+02	5,15E+02	- 1,16E+02

1,000825E+05	5,47E+02	- 1,53E+02	5,17E+02	- 1,11E+02
1,001031E+05	5,46E+02	- 1,55E+02	5,16E+02	- 1,13E+02
1,001238E+05	5,48E+02	- 1,57E+02	5,16E+02	- 1,16E+02
1,001444E+05	5,47E+02	- 1,60E+02	5,15E+02	- 1,14E+02
1,001651E+05	5,50E+02	- 1,51E+02	5,17E+02	- 1,12E+02
1,001857E+05	5,51E+02	- 1,53E+02	5,18E+02	- 1,11E+02

Розраховуємо:

- За допомогою формул (4.1), (4.2) ємність C і опір еквівалентного електричного кола R .
- За допомогою формули (4.3) питому провідність $\sigma(r)$.
- За допомогою формули (4.4) діелектричну проникність $\epsilon(c)$.

Табл.4.2 Результати розрахунку ємності C , опір еквівалентного електричного кола R .

	1 проба		2 проба	
freq[Hz]	C	R	C	R

1,000000E+05	7,51E-10	595,4957	- 7,73E+01	6,30E+06
1,000206E+05	7,86E-10	597,2036	- 7,94E+01	5,89E+06
1,000412E+05	7,62E-10	590,5173	- 7,57E+01	6,08E+06
1,000619E+05	7,72E-10	590,8097	- 7,54E+01	5,75E+06
1,000825E+05	7,55E-10	589,822	- 7,87E+01	6,35E+06
1,001031E+05	7,67E-10	589,612	- 7,82E+01	6,09E+06
1,001238E+05	7,68E-10	592,6863	- 7,64E+01	5,84E+06
1,001444E+05	7,84E-10	593,7638	- 7,78E+01	6,01E+06
1,001651E+05	7,39E-10	591,9328	- 7,79E+01	6,27E+06
1,001857E+05	7,44E-10	593,3903	- 7,64E+01	6,40E+06

Після чого усереднюємо пробу 1.1 та 1.2 та розраховуємо питому провідність $\sigma(r)$ та діелектричну проникність $\varepsilon(c)$.

Табл.4.3 Результати розрахунку питомої провідності $\sigma(r)$ та діелектричної проникності $\epsilon(c)$.

freq[Hz]	Середнє значення $\sigma(r)$	Середнє значення $\epsilon(c)$
1,000000E+05	0,70311	31308,79
1,000206E+05	0,701083	32596,09
1,000412E+05	0,71078	31814,39
1,000619E+05	0,708169	32459,58
1,000825E+05	0,708946	31330,17
1,001031E+05	0,708945	31896,18
1,001238E+05	0,706386	32235,64
1,001444E+05	0,707013	32379,82
1,001651E+05	0,707138	31048,4
1,001857E+05	0,706469	31012,56

За таким принципом розраховуємо усі дані з 8 зразків з двома пробами.

4.2. Графічне представлення вимірних показників сироватки крові щурів.

Результати з зразків щурів двох груп по віку, з інтактних та з пораненнями по питомій провідності $\sigma(r)$ проаналізуємо чи є відмінність між ними.

Будуємо графіки для порівняння сироватки крові щурів з пораненнями і інтакт для питомої електропровідності.

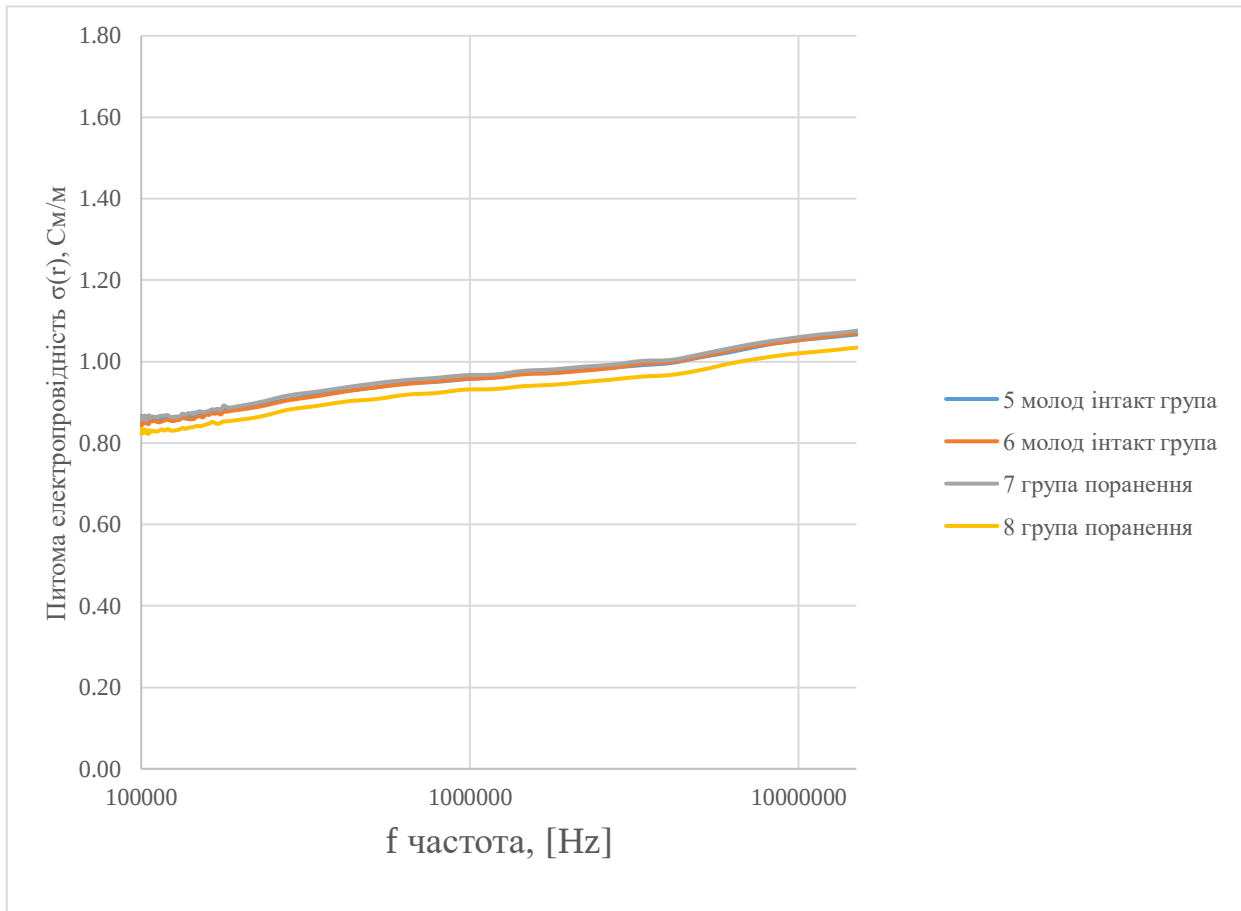
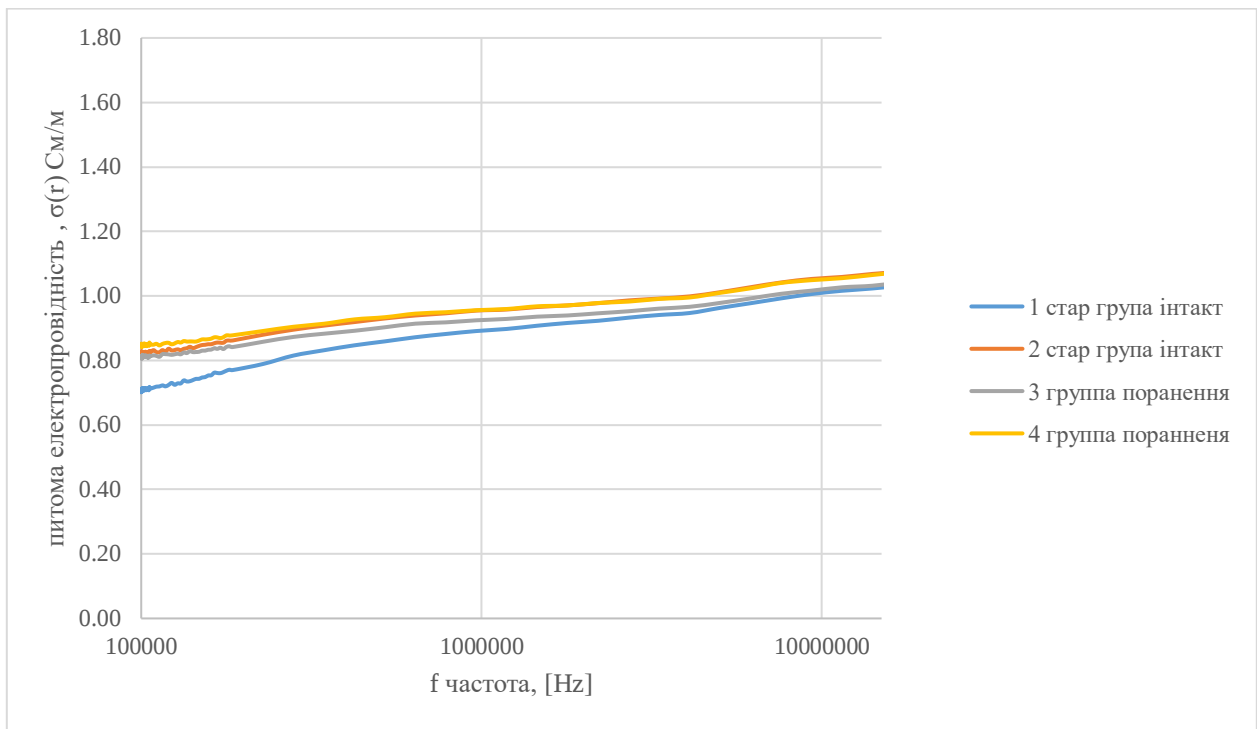
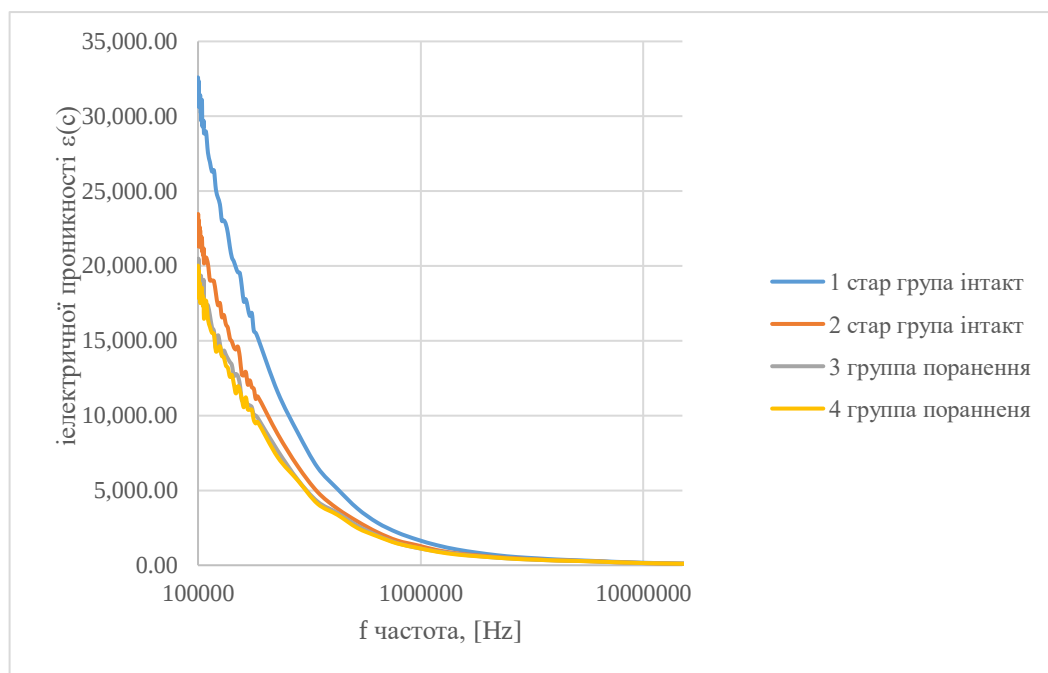


Рис.4.1 Залежність частоти f (Hz), від питомої електропровідності, $\sigma(f)$ для сироватки старих і молодих щурів.

Візуальний аналіз питомої електропровідності, $\sigma(r)$ надає інформацію о мінімальних відмінностях від залежності в обох групах зразків вікової категорії, поранених і інтактних, а також з підвищенням частоти підвищується питома електропровідність.

Аналогічно будуюмо графіки для порівняння сироватки крові старих і молодих щурів з пораненнями і інтакт для діелектричної проникності.



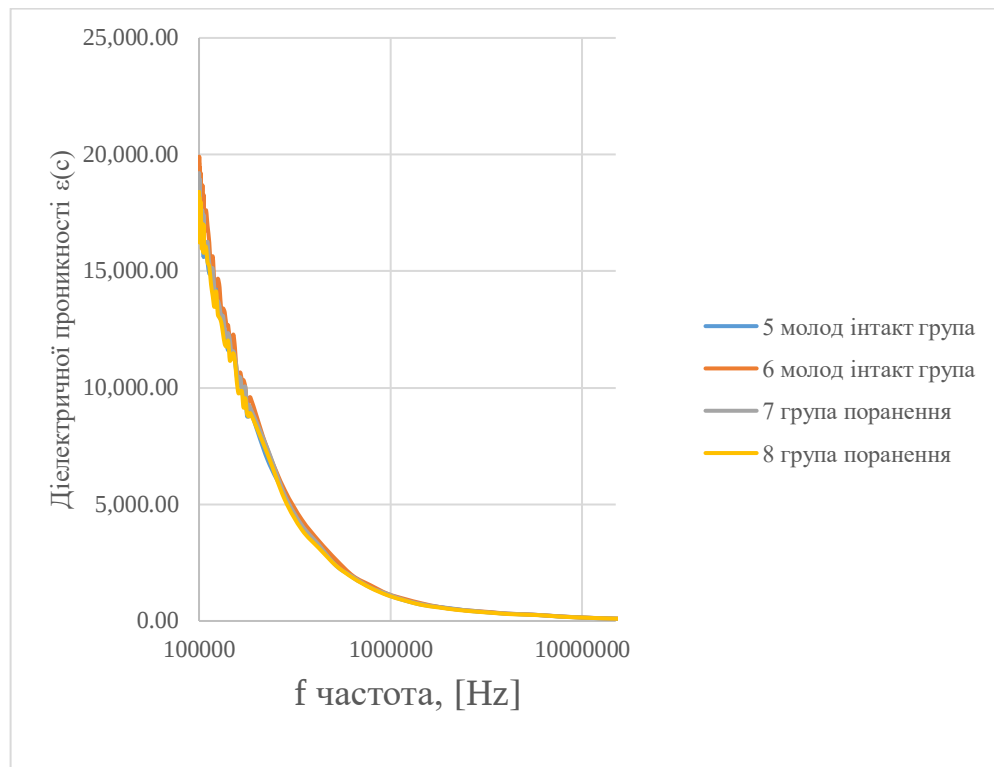


Рис.4.2 Графіки залежності частоти f частоти Hz ,від діелектричної проникності $\epsilon(c)$ для сироватки крові старих і молодих щурів.

Візуальний аналіз надає інформацію о мінімальних відмінностях від залежності в обох групах зразків, вікової категорії, поранених і інтактних, однак діелектричну проникність $\epsilon(c)$. з підвищенням частоти знижується діелектричну проникність $\epsilon(c)$.

Для аналізу впливу віку між групами на питому провідність зразків крові необхідно побудувати сімейство кривих для старих і молодих. Це дасть змогу отримати загальний огляд кривих і оцінити наявність або відсутність значущих відмінностей між групами. У НЧ області електропровідність сиворотки крові більш схильна до змін, ніж в інших частотних діапазонах. Для зменшення впливу цих змін електропровідність сиворотка крові була усереднена за першими 10 точками.

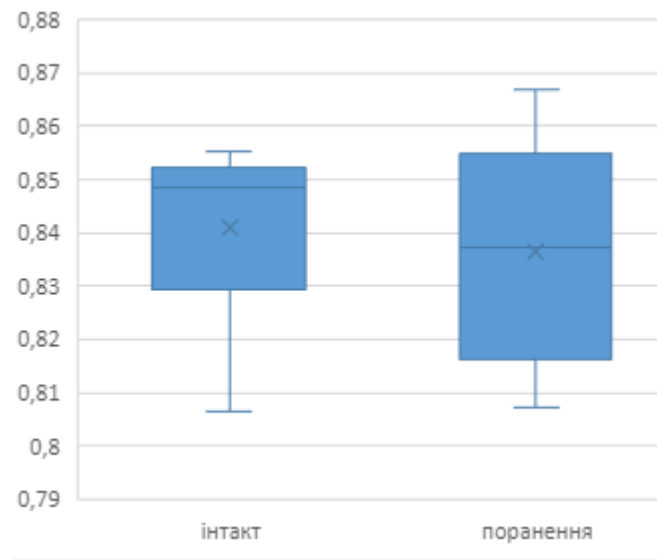


Рис.4.3 Відношення сімейства на питому провідність інтактні та поранених щурів

Аналогічно аналізуємо групу сыворотки крові старих і молодих щурів.

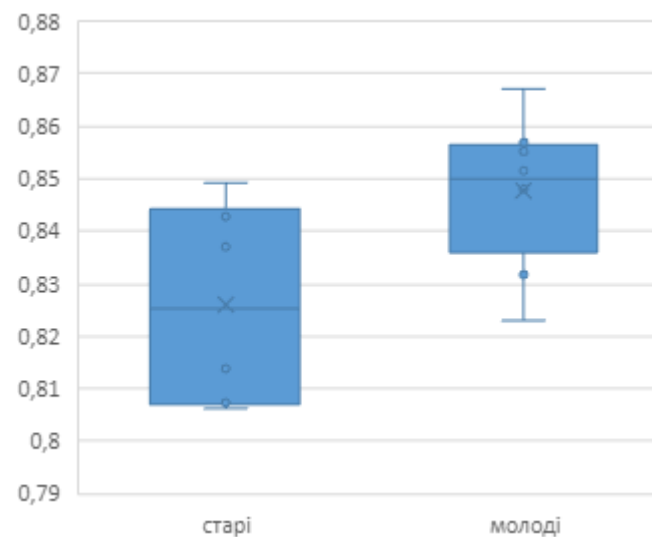


Рис.4.4 Відношення сімейства на питому провідність старих та молодих щурів

Під час порівняння за групами інтактних і поранених молодих та старих щурів було виявлено, що відмінність в питомій провідності сыворотки крові $\sigma(r)$

статистично незначуща. Під час порівняння за групами старих та молодих щурів було виявлено, що питома провідність сировотки крові $\sigma(r)$ у старих статистично нижче ніж у молодих.

Аналогічно будуюмо графіки для діелектричної проникності

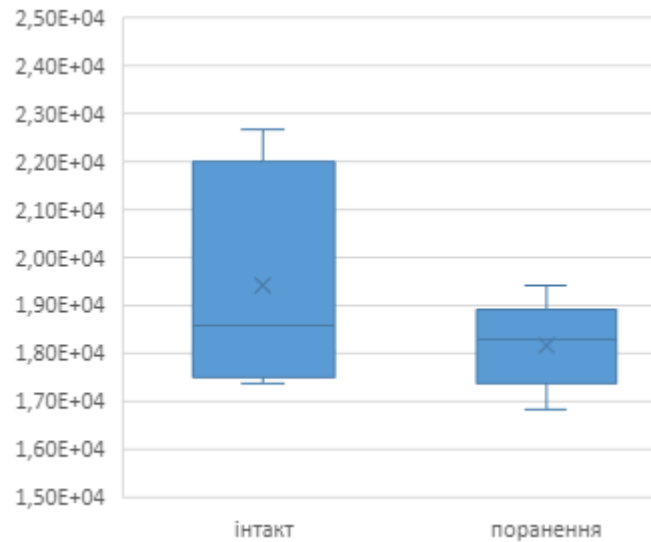


Рис.4.5 Відношення сімейства на діелектричну проникність інтактних та поранених щурів.

Аналогічно аналізуємо групу сировотки крові старих і молодих щурів.

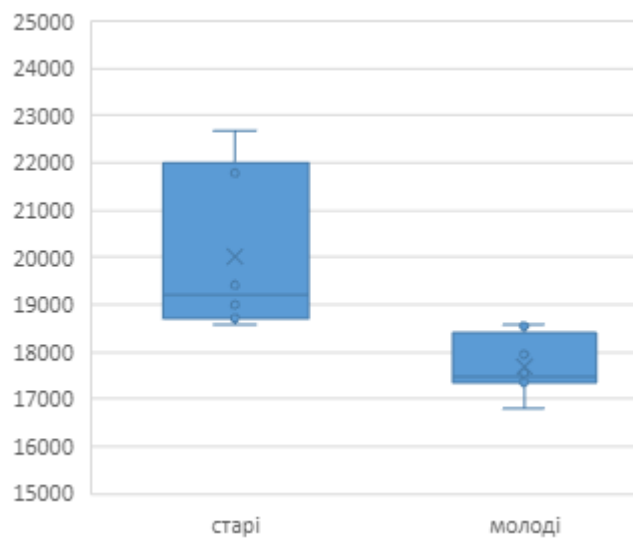


Рис.4.6 Відношення сімейства на діелектричній проникності старих та молодих щурів

За візуальним аналізом для діелектричній проникності за графіком є схожість але в більшості випадків інтактні щури мають більшу діелектричну проникливість $\epsilon(c)$. Для діелектричній проникності за графіком є різниця випадках де старі щури мають більшу діелектричну проникливість $\epsilon(c)$.

Висновки

Група сироватки крові щурів, які досліджувались в експерименті, значно впливає на питому провідність, у старих статистично нижче ніж у молодих, поранення має мінімальний ефект. У дослідженні на діелектричній проникності фізичні властивості сироватки крові залежить від його віку та також від поранення.

Питома провідність в залежності від віку та поранення: Виявлення значної залежності питомої провідності від віку та мінімального ефекту поранення вказує на складний взаємозв'язок між структурою сироватки крові та її фізичними властивостями. Це може бути важливим для розуміння механізмів, які регулюють провідність крові в організмі.

Залежність фізичних властивостей від віку та поранення: Дослідження залежності фізичних властивостей сироватки крові від віку та поранення може вказувати на різні механізми взаємодії між компонентами крові та їх вплив на діелектричну проникність.

Хімічний склад крові та його вплив на електропровідність: Розгляд змін хімічного складу крові, зокрема рівня електролітів, вказує на можливі механізми взаємодії між хімічною природою сироватки крові та її електрофізичними властивостями.

[13]Фактори впливу на електропровідність: Зазначення факторів, таких як регуляція температури та стрес, що можуть впливати на електропровідність

організму, робить цю інформацію важливою для розуміння впливу різних фізіологічних та патологічних умов на фізичні властивості крові.

Ці висновки можуть мати практичне застосування в медичних дослідженнях та можуть сприяти розробці нових методів діагностики чи терапії, зокрема у контексті старіння та впливу стресу на здоров'я.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. The Journal of Medical Investigation Basic study of new diagnostic modality according to noninvasive measurement of the electrical conductivity of tissues Yuken Ohmine, Tadaoki Morimoto, Yohsuke Kinouchi, Tadamitsu Iritani, Mieko Takeuchi, Mari Haku, Hiromu Nishitani https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmi/51/3,4/51_3,4_218/_article/-char/ja/
2. The Electrical Conductivity of Ionic Liquids: Numerical and Analytical Machine Learning Approaches <https://www.mdpi.com/2311-5521/7/10/321>
3. XXI Всесвітній конгрес ІМЕКО "Вимірювання в науці та промисловості", 30 серпня - 4 вересня 2015 р., Збігнєв Морон, Томаша Грисінського, кафедра біомедичної інженерії, Вроцлавський політехнічний університет. <https://www.imeko.org/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC13-267.pdf>
4. V. Kotovskyi, Y. Dzhezheriya, A. Snarskii. ["Characteristic time parameters of the organism's reaction to oxygen supply dynamics of tissues and their experimental determination"](#)¹.
5. Терещенко М. Ф., Цапенко В. В., Чухраєв М. В. ["Вимірювання електропровідності \(кондуктометрія\) широко використовується при вивченні процесів, які відбуваються в живих клітинах і тканинах під час зміни фізіологічного стану"](#)².
6. В. М. Голубнича, М. В. Погорелов, В. Корнієнко. ["Дослідження електропровідності біологічних тканин"](#)³.

7. Basic study of new diagnostic modality according to noninvasive measurement of the electrical conductivity of tissues
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmi/51/3,4/51_3,4_218/_article/-char/ja/

8. The Electrical Conductivity of Ionic Liquids: Numerical and Analytical Machine Learning Approaches <https://www.mdpi.com/2311-5521/7/10/321>

9. How to measure electrolytic conductivity successfully Zbigniew Moroń,
, Tomasz Grysiński <https://www.imeko.org/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC13-267.pdf>

10. H. Fricke and S. Morse, “The electric resistance and capacity of blood for frequencies between 800 and 4(1/2) million cycles,” J. General Physiol., vol. 9, no. 2, pp. 153–167, Nov. 1925.

11. H. Fricke, “The electric capacity of suspensions with special reference to blood,” J. General Physiol., vol. 9, no. 2, pp. 137–152, Nov. 1925

12. F. G. Hirsch et al., “The electrical conductivity of blood: I. Relationship to erythrocyte concentration,” Blood, vol. 5, no. 11, pp. 1017–1035, Nov. 1950.

13. E. C. Texter, F. G. Hirsch, F. E. Horan, L. A. Wood, W. C. Ballard, and I. S. Wright, “The electrical conductivity of blood: II. Relation to red cell count,” Blood, vol. 5, no. 11, pp. 1036–1048, Nov. 1950.