
Частотні залежності імпедансу еквівалентних електричних схем заміщення живих біологічних тканин, які моделюють норму та патологічний стан

Віктор Нікітін

кафедра біомедичної кібернетики, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID 0000-0003-1640-8986

Андрій Дубко

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України; кафедра біомедичної інженерії; Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID 0000-0001-6070-3945

Для цитування цієї статті:

Нікітін Віктор, Дубко Андрій. Частотні залежності імпедансу еквівалентних електричних схем заміщення живих біологічних тканин, які моделюють норму та патологічний стан. International Science Journal of Engineering & Agriculture Vol. 2, No. 2, 2023, pp. 10-20. doi:10.46299/j.isjea.20230202.02

Надійшла до редакції: 09 лютого 2023 р.; **Схвалено:** 15 лютого 2023 р.;

Опубліковано: 01 квітня 2023 р.

Анотація: Визначення частотних залежностей імпедансу живих біологічних тканин є інформативним способом отримання уявлень про стан цих тканин і є непрямим методом оцінки життєздатності органів та тканин. Оскільки вимірювання електрофізичних властивостей біологічних матеріалів є важливою практичною задачею для медицини, у представленій роботі ми досліджували еквівалентні електричні схеми неушкодженої тканини та різні варіанти схем при її ураженні. Метою роботи є дослідження дисперсії імпедансу та коефіцієнта поляризації еквівалентних електричних схем живих біологічних тканин в нормі та при патологіях. Для вирішення наукових завдань, поставлених у статті, використано метод вимірювання імпедансу за допомогою оціночної плати Eval AD5933EBZ; методи цифрової та статистичної обробки сигналів вимірювань. Вимірювання імпедансу за допомогою оціночної плати демонструє хорошу точність, стабільність і повторюваність.

Ключові слова: імпедансна спектроскопія, оціночна плата EVAL-AD5933EBZ, еквівалентна електрична схема заміщення, коефіцієнт поляризації, біологічна тканина, програмне забезпечення, електрична схема 2R1C, вимірювання імпедансу, амплітудно-частотна характеристика, фазо-частотна характеристика.

1. Вступ

Визначення частотних залежностей імпедансу живих біологічних тканин є інформативним способом отримання уявлень про стан цих тканин і є непрямим методом оцінки життєздатності органів та тканин. Оскільки вимірювання електрофізичних властивостей біологічних матеріалів є важливою практичною задачею для медицини, у представленій роботі ми досліджували еквівалентні електричні схеми неушкодженої тканини та різні варіанти схем при її ураженні.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є мікроелектронний перетворювач імпедансу EVAL-AD5933EBZ. Предметом досліджень є методи вимірювання імпедансу еквівалентних електричних схем заміщення живих біологічних тканин; електрофізичні параметри перетворювача імпедансу; методи цифрової обробки сигналів вимірювань.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження дисперсії імпедансу та коефіцієнта поляризації еквівалентних електричних схем живих біологічних тканин в нормі та при патологіях.

Для досягнення поставленої мети необхідно: провести аналіз науково-технічної літератури з теоретичних основ створення еквівалентних електричних схем живих біологічних тканин в нормі та при патологіях; провести вимірювання імпедансу еквівалентних схем заміщення; зберегти дані вимірювань; провести цифрову та статистичну обробку сигналів вимірювань.

4. Аналіз літератури

Жива біологічна тканина є неоднорідним провідником із резистивноємнісним характером імпедансу, яка добре моделюється еквівалентною електричною схемою заміщення 2R1C (рис. 1).

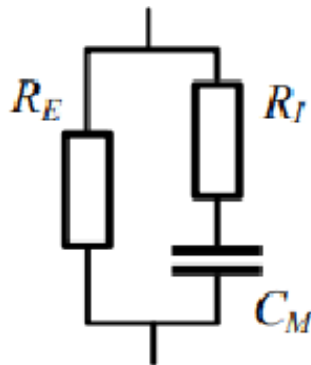


Рис. 1. Еквівалентна електрична схема заміщення живої біологічної тканини.

Елементи на цій схемі мають фізичний зміст: R_E – зовнішній опір клітин, R_I - внутрішній опір клітин, C_M - ємність мембрани [1].

Перспективною методикою оцінки стану тканин вважаються імпедансні дослідження, зокрема імпедансна спектроскопія [2. 3].

Опір біологічного об'єкта зменшується під час збільшення частоти змінного струму до деякого значення, після чого залишається практично сталим. Це явище називають дисперсією імпедансу [4].

За певної частоти опір біологічного об'єкта залишається сталим, якщо не змінюється його фізіологічний стан. Внаслідок ушкодження тканини опір її зменшується до певного мінімального значення, яке буде відповідати її відмиранню. Дисперсія імпедансу спостерігається лише в живих тканинах. Після відмирання тканини опір від частоти не залежить (рис. 2) [5].

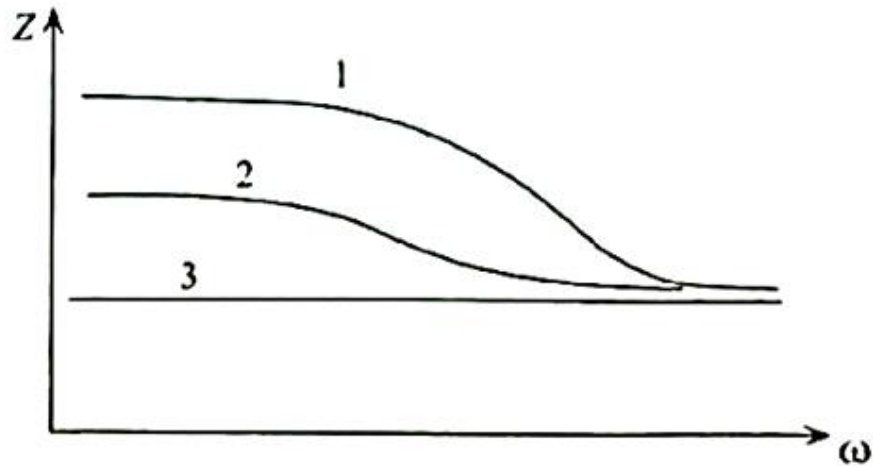


Рис. 2. Залежність повного опору рослинної тканини Z від частоти струму: 1 – жива тканина; 2 – нагріта до 50°C протягом 2 хв; 3 – кип'ячена протягом 20 хв [5].

В роботі [6] було проведено аналіз процесів, що відбуваються в м'яких тканинах при термічних ураженнях різного ступеня тяжкості, та виявлено зміни, що мають найбільший вплив на провідність.

За сучасними уявленнями пониження значення ємнісного опору зв'язують із порушенням діелектричних властивостей мембран клітин та збільшенням долі пошкоджених клітин в організмі. І, навпаки, підвищені значення ємнісного опору відображають кращий стан мембран клітин. Питомий опір біологічних тканин на заданій частоті зондування може істотно змінюватися під впливом різних фізіологічних факторів [7].

Також у медико-біологічних експериментах та клінічній практиці застосовується метод вивчення дисперсії Z для оцінки життєздатності органів та тканин. Б.М. Тарусов запропонував спрощений варіант такого дослідження. При цьому, вимірюють лише два значення Z на низькій (зазвичай близько 10^2Гц) і високій (більше 10^6Гц) частотах, відповідних тим частотним діапазонам, де крива дисперсії імпедансу йде більш полого, ніж на середньочастотній ділянці крутого спаду. Відношення цих величин називають коефіцієнтом поляризації (K_n):

$$K_n = \frac{Z_{нч}}{Z_{вч}} \quad (1)$$

Де $Z_{нч}$ – імпеданс на низькій частоті, $Z_{вч}$ – імпеданс на високій частоті. Життєздатна тканина має $K_n > 1$, причому значення коефіцієнта поляризації тим більше, чим вищий рівень обміну речовин у даній тканині і чим краще збереження її структурної цілісності. При відмиранні тканини її K_n прагне до 1 [8].

Застосування біоімпедансометрії дає можливість кількісно оцінити стан органів і систем організму при різних захворюваннях, а також виявити зміни у тканинах, які спричинені термічними ураженнями, лікарськими препаратами, фізичними та іншими навантаженнями.

5. Методи досліджень

Для вирішення наукових завдань, поставлених у статті використано метод вимірювання імпедансу за допомогою оціночної плати Eval AD5933EBZ [9, 10, 11] на базі інтегральної мікросхеми AD5933 [12, 13]; використані методи цифрової та статистичної обробки сигналів вимірювань.

6. Результати досліджень

В таблиці 1 показано параметри еквівалентних схем 2R1C: складу легень LC (Lungs Composition); загального складу тіла TBC (Total Body Composition) [14].

Таблиця 1. Параметри еквівалентних схем 2R1C

Застосування імпедансометрії	Параметри еквівалентних схем 2R1C		
	R_E (Ω)	R_I (Ω)	C_M (nF)
LC	81.5	22.15	47.7
TBC	917.5	665.4	3.42

Для розробки алгоритмів діагностики стану живих біологічних тканин методами цифрової та статистичної обробки сигналів вимірювань використано еквівалентну електричну схему TBC для неушкодженої тканини. Змінюючи номінали елементів C_M , R_E , R_I можна моделювати різні варіанти ураження тканини та відстежувати зміни провідності об'єкта.

На рисунку 3 показана основна частина лабораторної установки для дослідження провідності еквівалентних схем 2R1C. Вона складається з оціночної плати Eval-5933EBZ [15] та макетної плати на якій розташовані елементи еквівалентної електричної схеми.

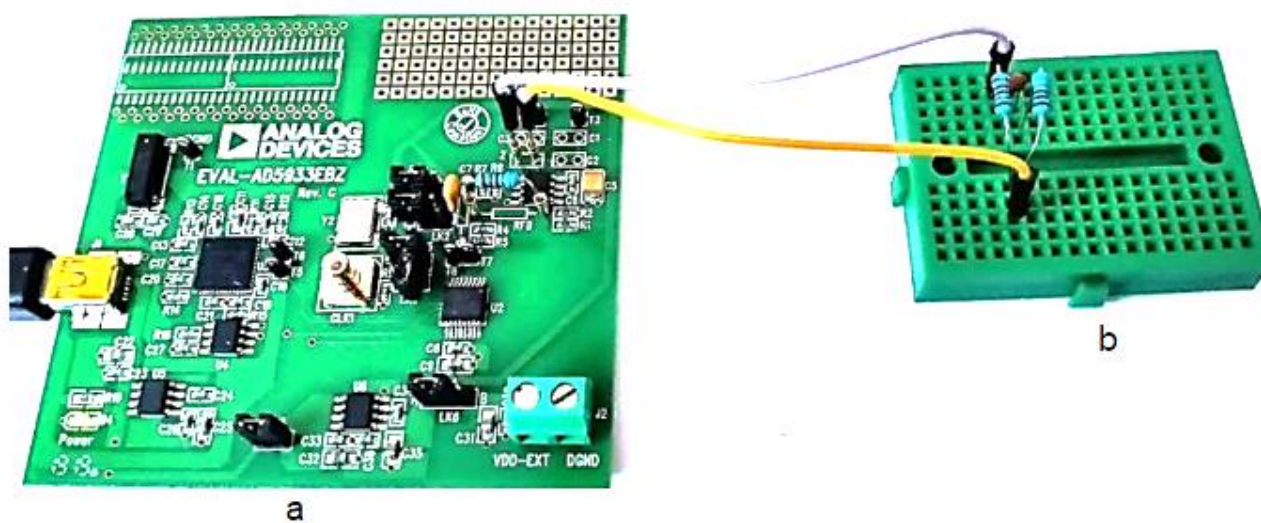


Рис. 3. Основна частина лабораторної установки для дослідження провідності еквівалентних електричних схем: а) оціночна плата Eval-5933EBZ; б) макетна плата з елементами еквівалентної електричної схеми

Графічний інтерфейс користувача оціночної плати EVAL-AD5933EBZ розроблено в середовищі Visual Basic. На ньому відображені основні параметри вимірювань і він дозволяє спостерігати амплітудно-частотні, фазочастотні характеристики (АЧХ, ФЧХ) імпедансу та зберігати отримані дані в форматі CSV (рис. 4). Цей формат відображається в різному програмному забезпеченні, наприклад Excel, Matlab, MathCad, Python та інші. В нашому випадку використовуємо програму Excel (рис. 5).

14 Нікітін Віктор та ін.: Частотні залежності імпедансу еквівалентних електричних схем заміщення живих біологічних тканин, які моделюють норму та патологічний стан

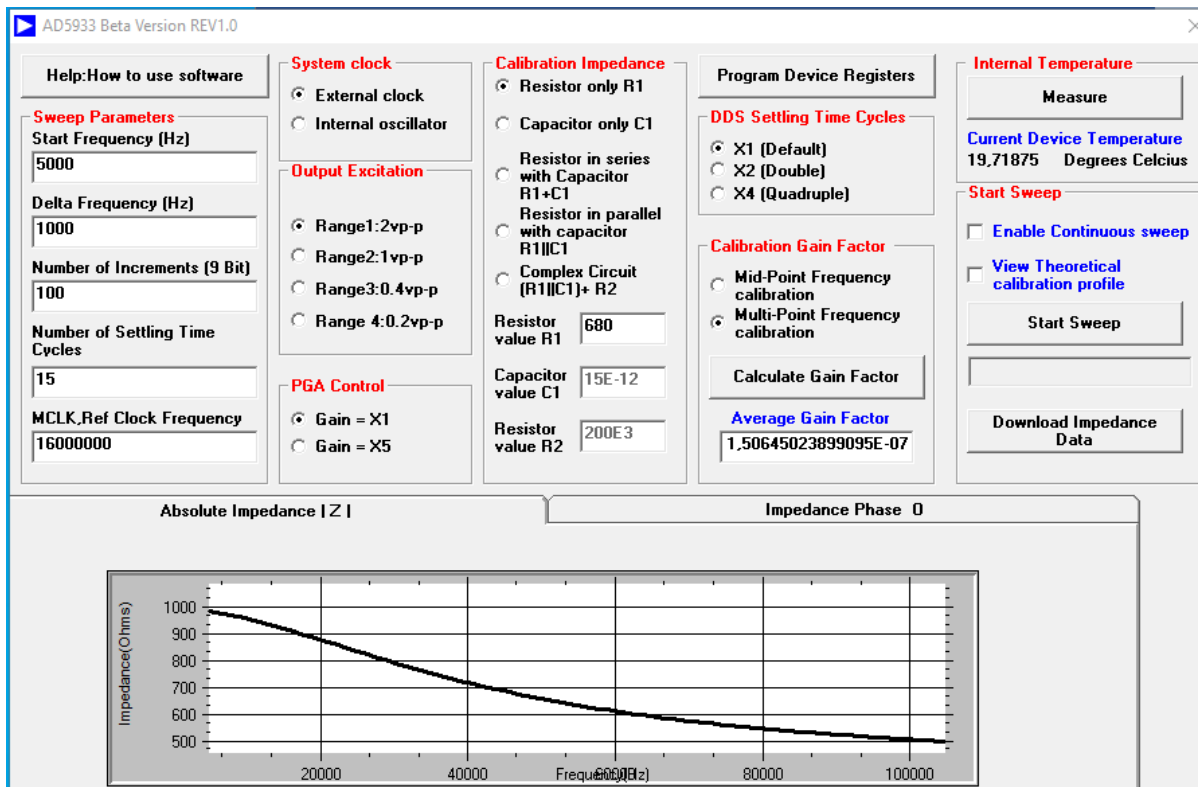


Рис. 4. Графічний інтерфейс користувача оціночної плати AD-5933EBZ від розробника Analog Device.

Frequency	Impedance	Phase	Real	Imaginary	Magnitude
50000	795,451278866582	-50,6702960628951	-343	-1172	1221,1605136099
50002	795,434743060161	-50,6565153262928	-342	-1172	1220,88001048424
50004	796,012776168591	-50,7080815225155	-343	-1171	1220,20080314676
50006	795,433436023607	-50,6997605178823	-343	-1172	1221,1605136099
50008	795,890166550623	-50,6626575805868	-342	-1172	1220,88001048424
50010	795,193712634281	-50,6315923120359	-342	-1173	1221,84000589275
50012	795,639778195646	-50,711029418985	-343	-1172	1221,1605136099
50014	794,718439186752	-50,7413141607278	-344	-1173	1222,40132526106
50016	795,501015838857	-50,6964294126782	-343	-1172	1221,1605136099
50018	796,051261029186	-50,6257930025383	-341	-1172	1220,60026216612
50020	795,425705346364	-50,5694385330758	-340	-1173	1221,281703785
50022	795,336702731131	-50,6242194073913	-341	-1173	1221,56047742222
50024	795,801276912318	-50,6741862997361	-342	-1172	1220,88001048424
50026	795,039890774511	-50,7109238200273	-343	-1173	1222,12028867866

Рис. 5. Дані вимірювань імпедансу еквівалентної електричної схеми в програмі Excel.

В таблиці 2 показані варіанти параметрів еквівалентних електричних схем для моделювання уражень біологічних тканин.

Таблиця 2. Варіанти параметрів еквівалентних електричних схем 2R1C

№ експерименту	Параметри еквівалентних схем 2R1C			Кількість повторів
	$R_E (\Omega)$	$R_I (\Omega)$	$C_M (nF)$	
1	987.1	669.4	3.539	10
2	669.4	503.7	1.260	
3	502.7	469.5	0.419	
4	467.0	-	-	

На рисунках 6 ... 13 показані амплітудно частотні, фазочастотні характеристики та їх стандартні відхилення для еквівалентних електричних схем 2R1C, які моделюють стан живих біологічних тканин в нормі та при патологічних станах. Цифрова та статистична обробка сигналів вимірювань проводилась в програмі Excel.

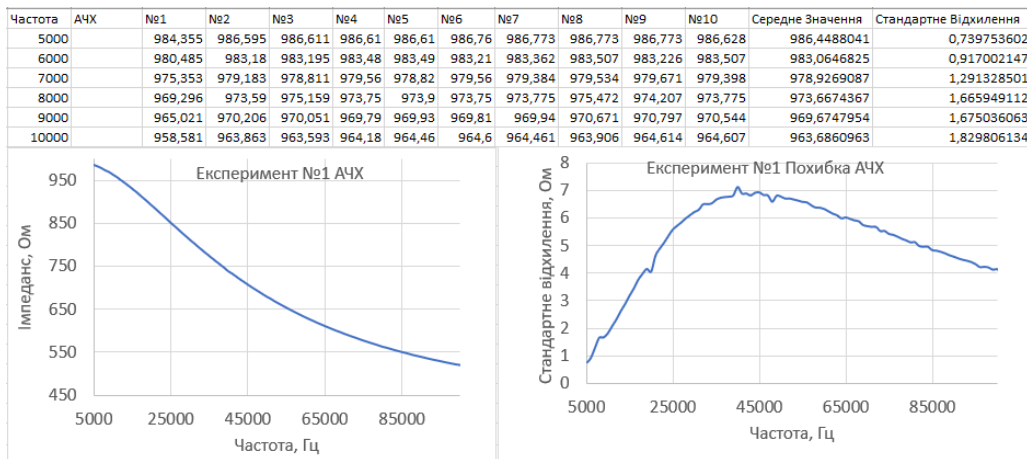


Рис. 6. Амплітудно-частотна характеристика та її стандартне відхилення експерименту №1.

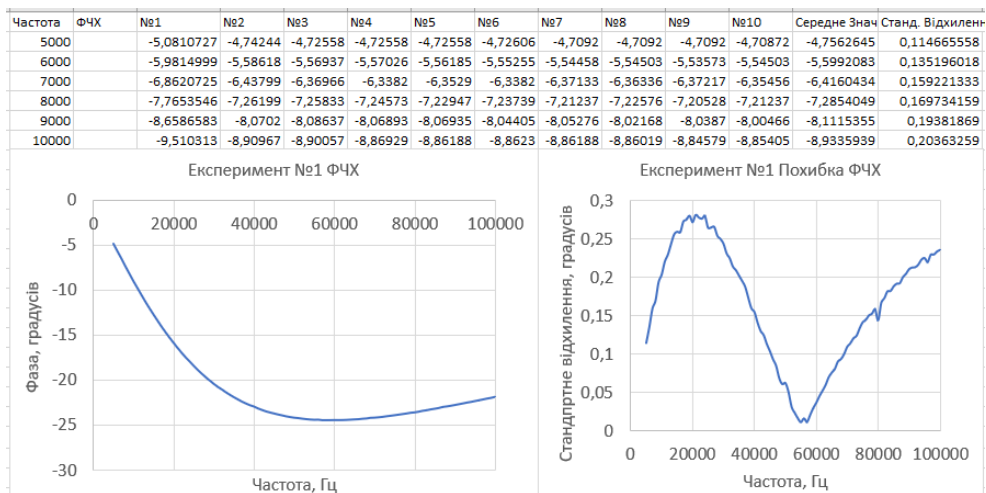


Рис. 7. Фазо-частотна характеристика та її стандартне відхилення експерименту №1.

16 Нікітін Віктор та ін.: Частотні залежності імпедансу еквівалентних електричних схем заміщення живих біологічних тканин, які моделюють норму та патологічний стан

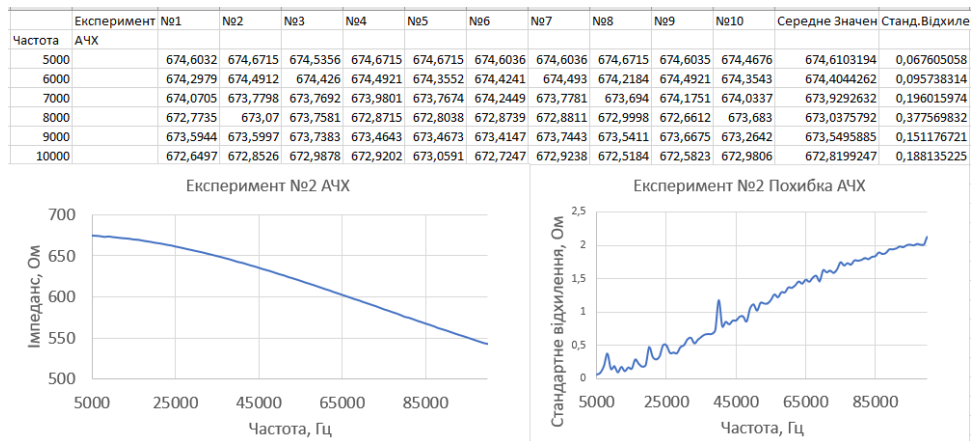


Рис. 8. Амплітудно-частотна характеристика та її стандартне відхилення експерименту №2.

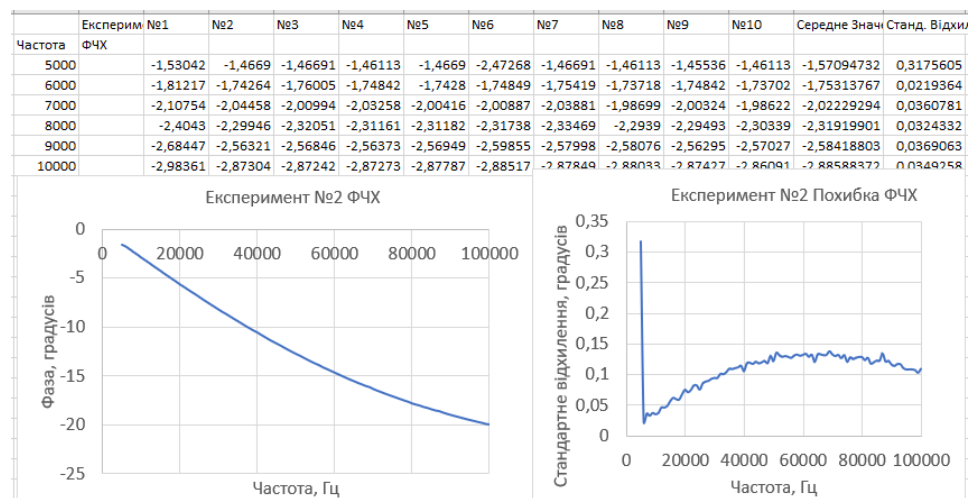


Рис. 9. Фазо-частотна характеристика та її стандартне відхилення експерименту №2.

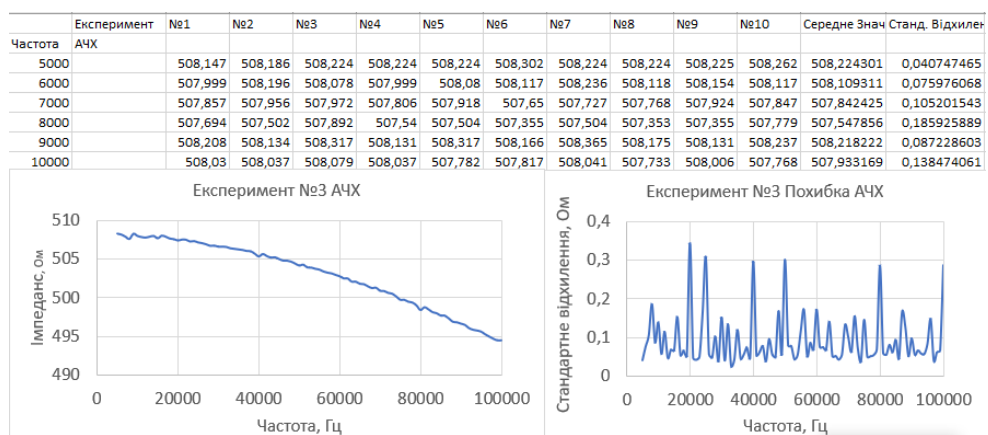


Рис. 10. Амплітудно-частотна характеристика та її стандартне відхилення експерименту №3.

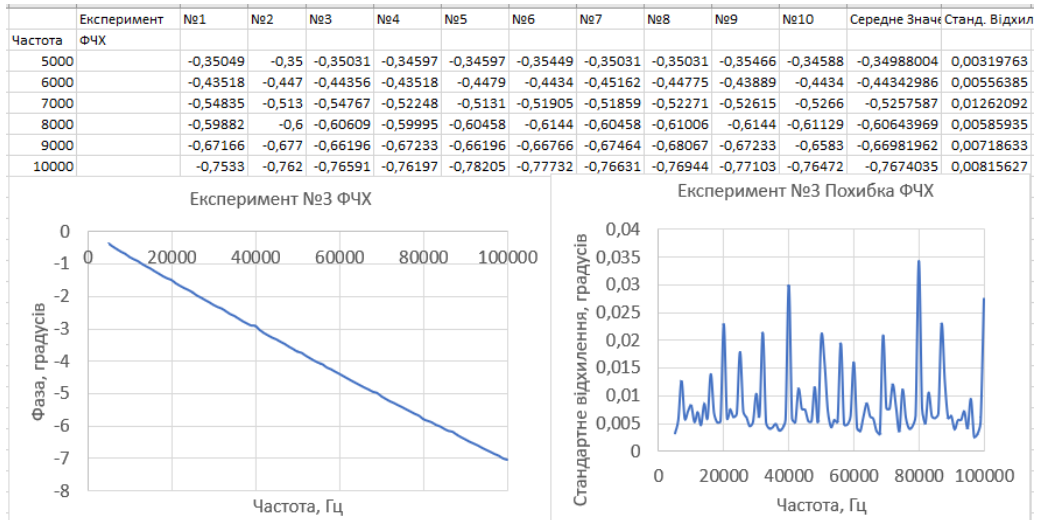


Рис. 11. Фазо-частотна характеристика та її стандартне відхилення експерименту №3.

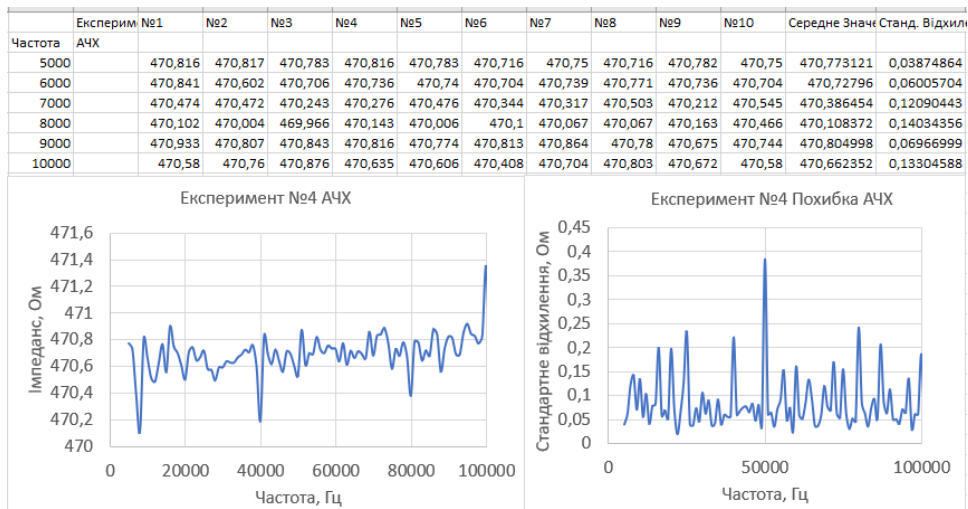


Рис. 12. Амплітудно-частотна характеристика та її стандартне відхилення експерименту №4.

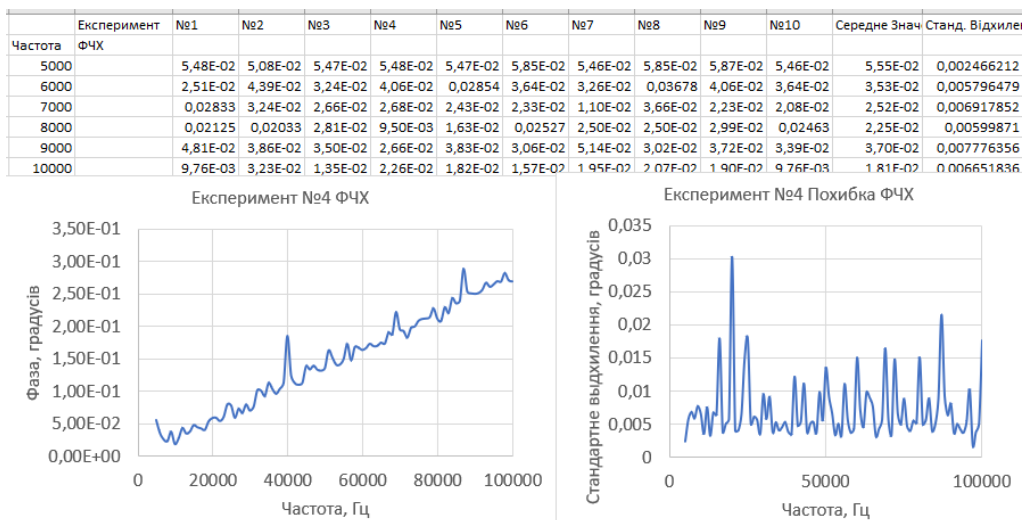


Рис. 13. Фазо-частотна характеристика та її стандартне відхилення експерименту №4.

Середні значення АЧХ чотирьох експериментів представлені на рисунку 14.

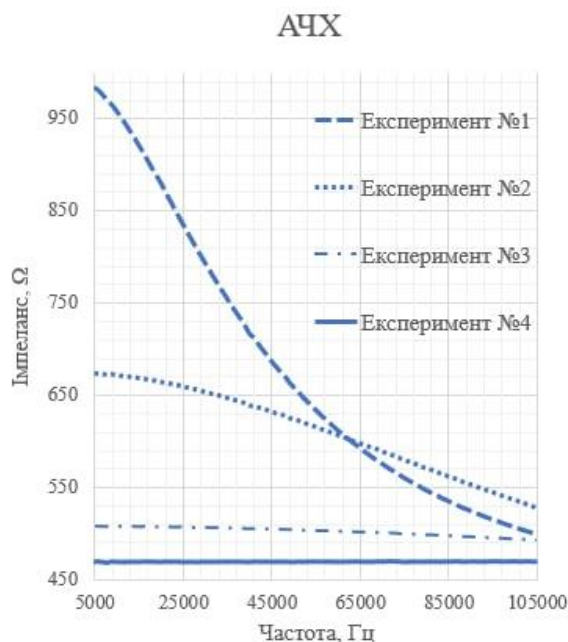


Рис. 14. Залежність повного опору еквівалентних електричних схем 2R1C від частоти.

На рисунку 15 приведено середні значення коефіцієнта поляризації еквівалентних електричних схем 2R1C для чотирьох експериментів.

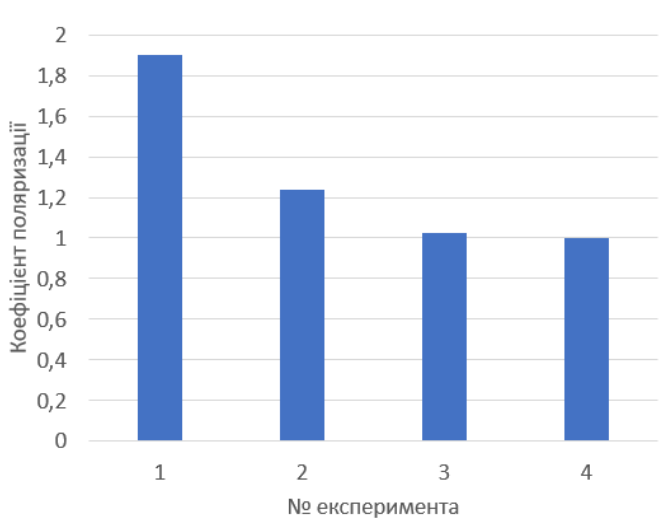


Рис. 15. Середні значення коефіцієнта поляризації еквівалентних електричних схем 2R1C.

В роботі представлено дослідження імпедансу еквівалентних електричних схем неушкодженої тканини та різні варіанти схем при її ураженні за допомогою оціночної плати Eval AD5933EBZ в широкому діапазоні частот (5-100кГц). Коефіцієнт поляризації, АЧХ та ФЧХ досліджуваних кіл в повній мірі характеризують їх електрофізичний стан.

Максимальне значення стандартного відхилення імпедансу в діапазоні від 520 Ом до 837 Ом складає 7,14 Ом. Для імпедансу в діапазоні від 542 Ом до 675 Ом значення максимального стандартного відхилення складає 2,13 Ом. Максимальне значення стандартного відхилення імпедансу в діапазоні від 495 Ом до 508 Ом складає 0,34 Ом, а для імпедансу в діапазоні від 470,1 Ом до 471,4 Ом максимальне значення стандартного відхилення складає 0,38 Ом.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

У подальших роботах будуть проведені експериментальні дослідження оціночної плати EVAL-AD5933EBZ на зразках різних матеріалів, в тому числі на живих біологічних тканинах.

8. Висновки

Оціночна плата Eval AD5933EBZ представлена у цій статті, демонструє доказ концепції простого, недорогого та портативного датчика для вимірювання імпедансу різних матеріалів, в тому числі живих біологічних тканин.

Вимірювання імпедансу за допомогою оціночної плати на базі інтегральної мікросхеми AD5933 демонструє хорошу точність, стабільність і повторюваність. Просту конструкцію датчика можна легко реалізувати в портативному пристрої діагностики типу та стану живих біологічних тканин. Оціночна плата має потенціал для широкомасштабних випробувань на тваринах і на людях.

Список літератури:

- 1) Allen, J. (2007). Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological Measurement*. 28: 1-39.
- 2) Григорчак, І., Понеділок, Г. (2011). Імпедансна спектроскопія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 352.
- 3) Ямпілов, С., Галсанов, Б., Копылова, Е., Батоцыренов, Т. (2016). Разработка аппарата для проведения электроимпедансной спектрометрии. *Автоматика и программная инженерия*, No4 (18), 57-59.
- 4) Сливко, Е., Мельнікова, О., Іванченко, О., Біляк, Н. (2018). Медична і біологічна фізика: Навчальний посібник для студентів спеціальності 222 «Медицина»/ - Запоріжжя.- 291 с
- 5) Ємчик, Л. (2014). Основи біологічної фізики та медична апаратура. Київ. ВСВ «Медицина», 391.
- 6) Батухтин, К. (2011). Моделирование изменений в мягких тканях при термических поражениях. XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Сборник трудов в 3-х томах. Т.2. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета. Секция 5: Системы и приборы медицинского назначения, 4-16.
- 7) Дубко, А.Г., Тертична В.С., Никитін В.О. (2022). Діагностика стану тканин організму на основі біоімпедансного аналізу. *Theoretical and science bases of actual tasks. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference*. Lisbon, Portugal, 253-259.
- 8) Самойлов, В. (2007). Медицинская биофизика: учебник для вузов. -СПб.: СпецЛит, 560.
- 9) Khusnul, Ain, R. Arif Wibowo, Soegianto Soelistiono, Lailatul Muniroh (2017). Measurement of Cholesterol Concentration Based on Bioimpedance with AD5933-EVAL. 5th International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME), Bandung, 251-254. DOI: 10.1109/ICICI-BME.2017.8537752.
- 10) Evaluation Board User Guide. Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/UG-364.pdf>.
- 11) EVAL-AD5933. Available at: <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-ad5933.html#eb-documentation>.
- 12) 1 MSPS, 12-Bit Impedance Converter, Network Analyzer AD5933. Available at: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5933.pdf>.
- 13) Базаев, Н., Пржиялговская А., Руденко П. (2016). Особенности использования микросхемы AD5933 в качестве измерителя импеданса при проектировании малогабаритных систем. *Известия вузов. Электроника*. Том 21 № 3, 279-285.

14) Ferreira, J., Seoane, F., Ansele, A., Bragos, R. (2010). AD5933-based spectrometer for electrical bioimpedance applications. *Journal of Physics: Conference Series* 224. doi:10.1088/1742-6596/224/1/012011.

15) Нікітін, В., Дубко, А. (2022). Вимірювання імпедансу біологічних тканин та інших середовищ за допомогою оціночної плати EVAL AD5933EBZ. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 1(4), 80–91. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220104.04>

Frequency dependences of the impedance of the equivalent electrical shems of substitution of living biological tissues that simulate the normal and pathological state

Viktor Nikitin

Department of Biomedical Cybernetics National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine

Anrii Dubko

Department of Welding and Related Technologies in Medicine and Ecology E.O. Paton Electric Welding Institute; Department of Biomedical Engineering National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine

Abstract: Determination of frequency dependencies of the impedance of living biological tissues is an informative way of detection of the state of these tissues and is an indirect method of assessing the viability of organs and tissues. As the measurement of electrophysical properties of biological materials is an important practical task for medicine, in the presented work we investigated the equivalent electrical circuits of biological tissue and different variants of circuits in case of its damage. The method of work is the study of impedance dispersion and polarization coefficient of equivalent electrical circuits of living biological tissues in normal and pathological conditions. To solve the scientific problems posed in the article, the impedance measurement method using the evaluation board Eval AD5933EBZ was used; methods of digital and statistical processing of measurement signals. Impedance measurements using the evaluation board demonstrate good accuracy, stability, and repeatability.

Keywords: impedance spectroscopy, EVAL-AD5933EBZ evaluation board, equivalent electrical substitution circuit, polarization coefficient, biological tissue, software, 2R1C electrical circuit, impedance measurement, amplitude-frequency response, phase-frequency response.
