

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-06>

УДК 537.868.3

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ СЕНСОР ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Є.О. Антоненко, В.О. Кожешкурт, Д.О. Штода, В.О. Катрич, А.І. Божков

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: antonenko@karazin.ua

Надійшла до редакції 12 жовтня 2020 р.

Актуальність. Проблеми контролю та визначення електрофізичних параметрів матеріалів різної фізичної природи є актуальними з точки зору розвитку експрес-методів аналізу речовин у різних галузях науки і техніки, зокрема, у біотехнологіях та біомедицині. Також актуальність роботи обумовлена пошуком та впровадженням нових медичних неінвазивних методів діагностики.

Мета роботи – експериментальна перевірка методу обчислення діелектричної проникності багатошарових структур на основі конформного перетворення, перевірка методу електромагнітного зондування об'єктів з одностороннім доступом за допомогою мікросмужкового резонатора.

Матеріали та методи. У роботі представлено метод обчислення ефективної діелектричної проникності тришарової структури за допомогою мікросмужкового резонатора нової форми. Експериментальним методом досліджено низку твердих та рідких матеріалів. Показано, що резонансна частота та добротність резонатора, навантаженого досліджуванним матеріалом, дозволяють оцінити концентрацію складових бінарних розчинів. Досліджено можливість застосування мікросмужкового резонатора у якості плетизмографічного сенсора.

Результати. Розроблено електромагнітний сенсор для вимірювання діелектричної проникності об'єктів з одностороннім доступом. Дано опис оригінальної конструкції мікросмужкового резонатора, проведено його моделювання та експериментальне дослідження. Отримано результати вимірювань діелектричної проникності об'єктів різної фізичної природи: тверді діелектрики і біологічні рідини. Проведено дослідження впливу відносної концентрації глюкози на резонансні властивості датчика. Показана можливість використання сенсора у якості плетизмографічного датчика у біомедичних системах.

Висновки. Проведені в роботі теоретичні та експериментальні дослідження мікросмужкового резонатора складної геометричної форми підтвердили можливість його застосування у якості сенсора електрофізичних параметрів матеріалів з різними діелектричною проникністю та провідністю. Запропоновано новий метод реєстрації кровоплину, заснований на фіксації зміни ефективної діелектричної проникності тканин, які містять кровоносні судини.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мікросмужковий резонатор, діелектрична проникність, електрична провідність, глюкоза, плетизмографія

ELECTROMAGNETIC SENSOR FOR MEASURING THE DIELECTRIC PERMEABILITY OF MATERIALS

Ye.A. Antonenko, V.A. Kozheshkurt, D.A. Shtoda, V.A. Katrich, A.I. Bozhkov

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Relevance: Problems of control and determination of electrophysical parameters of materials of different physical nature are relevant in terms of the development of express methods of analysis of substances in various fields of science and technology, in particular, in biotechnology and biomedicine. Also, the relevance of the work is grounded by the search and implementation of new non-invasive medical diagnostic methods.

The purpose of the work is to experimentally test the method of calculating the dielectric constant of multilayer structures based on conformal transformation, to test the method of electromagnetic probing of objects with one-side access using a microstrip resonator.

Materials and methods: The paper presents a method for calculating the effective dielectric constant of a three-layer structure using a microstrip resonator of a new shape. A number of solid and liquid materials were investigated experimentally. It is shown that the resonant frequency and quality factor of the resonator loaded with the investigated material allow to estimate the concentration of the components of binary solutions. The possibility of using a microstrip resonator as a plethysmographic sensor has been investigated.

Results: An electromagnetic sensor for measuring the dielectric constant of objects with one-side access was developed. The description of the original design of the microstrip resonator is presented and its modeling and experimental research are carried out. The results of measurements of the dielectric constant of objects of different physical nature are obtained: solid dielectrics and biological liquids. The influence of relative glucose concentration on the resonant properties of the sensor was studied. The possibility of using the sensor as a plethysmographic sensor in biomedical systems is shown.

Conclusion: Theoretical and experimental studies of a microstrip resonator of complex geometric shape, which are presented in the paper, confirmed the possibility of its use as a sensor of electrophysical parameters of materials with

different dielectric constant and conductivity. A new method of blood flow registration is proposed, based on the fixation of changes in the effective dielectric constant of tissues containing blood vessels.

KEYWORDS: microstrip resonator, dielectric constant, electrical conductivity, glucose, plethysmography.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СЕНСОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Е.А. Антоненко, В.А. Кожешкурт, Д.А. Штода, В.А. Катрич, А.И. Божков

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

Актуальность. Проблемы контроля и определения электрофизических параметров материалов различной физической природы актуальны с точки зрения развития экспресс-методов анализа веществ в различных областях науки и техники, в частности, в биотехнологиях и биомедицине. Также актуальность работы обусловлена поиском и внедрением новых медицинских неинвазивных методов диагностики.

Цель работы – экспериментальная проверка метода вычисления диэлектрической проницаемости многослойных структур на основе конформного преобразования, проверка метода электромагнитного зондирования объектов с односторонним доступом с помощью микрополоскового резонатора.

Материалы и методы. В работе представлен метод вычисления эффективной диэлектрической проницаемости трехслойной структуры с помощью микрополоскового резонатора новой формы. Экспериментальным методом исследован ряд твердых и жидких материалов. Показано, что резонансная частота и добротность резонатора, нагруженного исследуемым материалом, позволяют оценить концентрацию составляющих бинарных растворов. Исследована возможность применения микрополоскового резонатора в качестве плетизмографического сенсора.

Результаты. Разработан электромагнитный сенсор для измерения диэлектрической проницаемости объектов с односторонним доступом. Дано описание оригинальной конструкции микрополоскового резонатора, проведено его моделирование и экспериментальное исследование. Получены результаты измерений диэлектрической проницаемости объектов различной физической природы: твердые диэлектрики и биологические жидкости. Проведено исследование влияния относительной концентрации глюкозы на резонансные свойства датчика. Показана возможность использования сенсора в качестве плетизмографического датчика в биомедицинских системах.

Выводы. Проведенные в работе теоретические и экспериментальные исследования микрополоскового резонатора сложной формы подтвердили возможность его применения в качестве сенсора электрофизических параметров материалов с различными диэлектрической проницаемостью и проводимостью. Предложен новый метод регистрации кровотока, основанный на фиксации изменения эффективной диэлектрической проницаемости тканей, содержащих кровеносные сосуды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микрополосковый резонатор, диэлектрическая проницаемость, электрическая проводимость, глюкоза, плетизмография

ВСТУП

Методи вимірювання діелектричної проникності рідких і твердих матеріалів з одностороннім доступом розвинено в роботах [1-6]. У цих роботах в якості датчиків використовуються мікросмушкові резонатори різних типів. Для вимірювання діелектричної проникності за допомогою мікросмушкового резонатора велике значення має спосіб збудження резонатора. Важливим завданням є виключити вплив досліджуваного об'єкта на живильну лінію, тобто підведення енергії повинно здійснюватися з боку, протилежного від досліджуваного зразка.

Розвиток медичного приладобудування і впровадження досягнень науки в медичну практику дозволили відкрити принципово нові можливості для дослідження біологічних об'єктів. Особлива увага приділяється розвитку неінвазивних (безконтактних і не травмуючих) методів. Основою неінвазивної діагностики є реєстрація власних фізичних полів біологічних об'єктів (БО) або реєстрація ефектів взаємодії зовнішніх фізичних полів з БО. Великі перспективи для вирішення завдань медицини відкриваються при використанні електромагнітних полів (ЕМП). По-перше, закони поширення ЕПМ вивчені досить добре. По-друге, існують технічні можливості генерування, реєстрації і керування параметрами ЕМП практично у всьому діапазоні довжин хвиль.

Основними показниками, що визначають поширення ЕМП в живій матерії, є електропровідність і діелектрична проникність. Характер взаємодії ЕМП з біологічною тканиною залежить від діелектричної проникності. Живі тканини, що складаються з клітин і позаклітинної рідини, містять іони і полярні молекули. Під впливом ЕМП виникають два ефекти, що визначають діелектричні властивості – коливання вільних зарядів і обертання дипольних молекул з частотою прикладеного поля. Перший ефект призводить до збільшення струмів провідності і втрат енергії. Другий ефект впливає на струми зміщення. Таким чином, відносна діелектрична проникність має комплексний вид:

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0} = (\varepsilon' - j\varepsilon''), \quad (1)$$

де ε^* – комплексна діелектрична проникність, ε_0 – проникність вакууму, ε' – реальна частина діелектричної проникності, ε'' – уявна частина діелектричної проникності, яка визначає втрати в середовищі. Величина електропровідності середовища σ пов'язана зі струмами провідності і діелектричними втратами співвідношенням:

$$\sigma = \varepsilon''\omega\varepsilon_0, \quad (2)$$

де ω – частота. Кут втрат при цьому дорівнює:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'\varepsilon_0}. \quad (3)$$

Величина ε'' проявляє дисперсію, пов'язану з різними релаксацийним процесами, які супроводжують ефект поляризації. Діелектричні властивості і електропровідність тканин відіграють основну роль при визначенні ефектів поширення ЕМП і визначенні величини поглиненої енергії. Тому визначення діелектричних властивостей і електропровідності живої матерії в цілому і окремих її складових є важливим завданням, без вирішення якого неможливе створення нових методів і засобів терапевтичного або діагностичного призначення.

Окрім задачі визначення діелектричних властивостей БО для потреб розробки нових методів діагностики, діелектрична проникність може самостійно виступати як носій інформації в основі роботи низки типів приладів діагностики, в яких діелектричні властивості інтерпретуються через їх зв'язок з фізіологічними процесами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У даній статті пропонується оригінальна геометрична форма електромагнітного сенсора для оцінки діелектричної проникності матеріалів. Сенсор, топологію якого зображено на Рис. 1 а, являє собою мікросмужковий резонатор, який складається з елементів мікросмужкової лінії в $\frac{3}{4}$ і $\frac{1}{2}$ частин кола. Таким чином, довжина резонатора l задається радіусом кола r і дорівнює $l = 10\pi r$. Вибір такої форми обумовлений двома причинами. Перша - така форма дозволяє зменшити розміри датчика в 1,6 разів у порівнянні з кільцевим резонатором. Друга - мінімум геометричних параметрів для оптимізації. Таким чином, вдалося знайти оптимальну форму мікросмужкового резонатора, розміри якого становлять $0,2\lambda$ для основної моди коливань, а кількість геометричних параметрів оптимізації дорівнює двом, а саме: товщина мікросмужкової лінії w і радіус елементів кіл r .

Збудження резонатора здійснюється через зосереджену ємність C . Конденсатор може розташовуватися в отворі, що висвердлено в діелектричній підкладці. Матеріал підкладки - тефлон, армований склом, товщиною $h = 1,5$ мм. Над резонатором розташовується досліджуваний зразок товщиною h (Рис. 1 б). Фото експериментально зразка резонатора показано на Рис. 1 в.

За допомогою такої структури можна проводити вимірювання діелектричної проникності матеріалів відомої товщини. Також, метод може бути розвинений для визначення діелектричної проникності одного шару в багатшаровому діелектрику при відомих параметрах інших шарів.

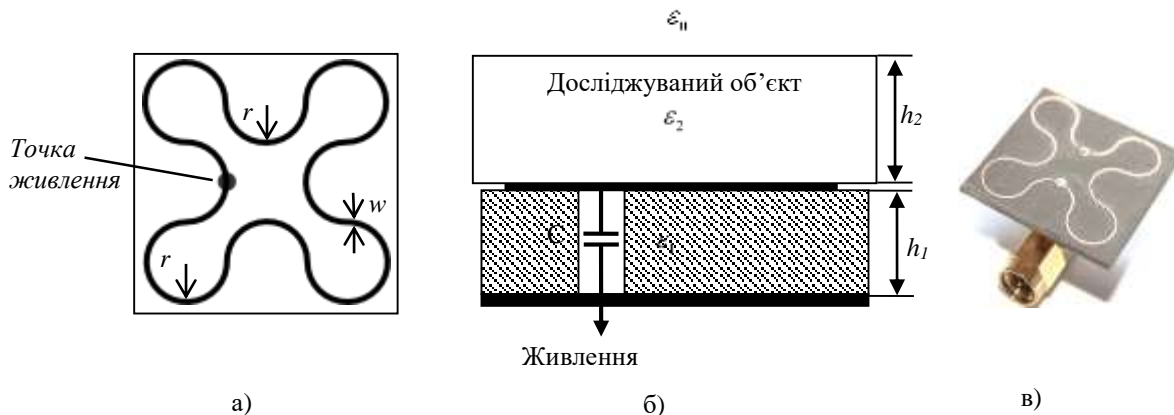


Рис. 1. Топологія мікросмужкового резонатора (а), взаємне розташування резонатора та об'єкта дослідження (б) та експериментальний зразок резонатора (в)

Рішення завдання зводиться до пошуку діелектричної проникності досліджуваного зразка. Одним з

простих аналітичних методів є метод, розвинений Jiri Svacina [7, 8]. Метод заснований на застосуванні конформного перетворення однієї площини в іншу. Знайдемо спочатку ефективну діелектричну проникність мікросмужкової лінії в тришаровому діелектрику. Мікросмужкова лінія розташована між шарами діелектрика ε_1 і ε_2 , над шаром з ε_2 знаходиться вільний простір з діелектричною проникністю ε_0 (Рис. 2 а). Після здійснення конформного перетворення [9] маємо структуру, аналогічну плоскому конденсатору з неоднорідним заповненням (Рис. 2 б).

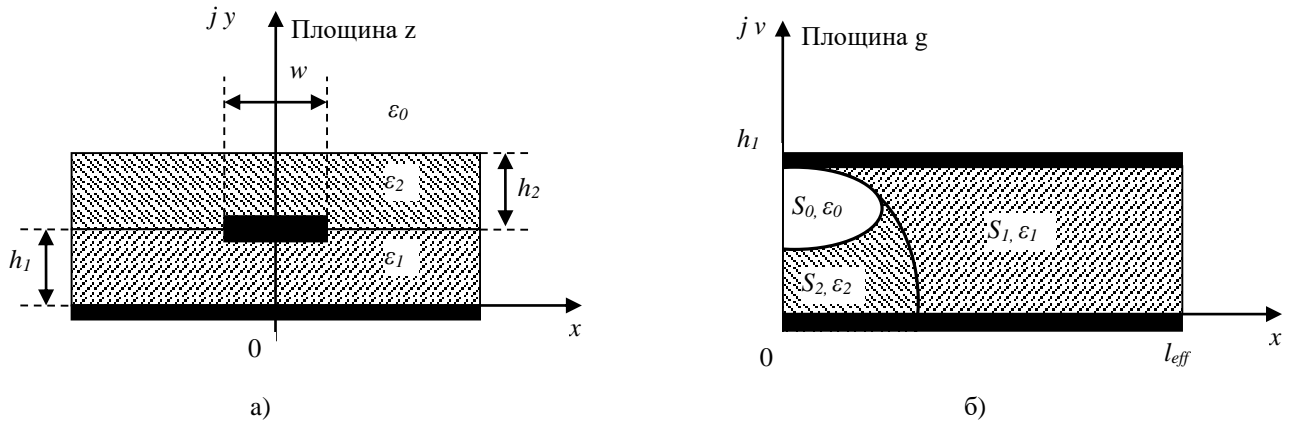


Рис. 2. Перетин мікросмужкової лінії (а) та її конформне перетворення (б)

У загальному випадку, вплив кожного діелектричного шару ε_i на ефективну діелектричну проникність обумовлено коефіцієнтом заповнення q_i :

$$q_1 = \frac{S_1}{S} = 1 - \frac{S_0 + S_2}{S}, \quad q_2 = \frac{S_2}{S} = 1 - q_1 - \frac{S_0}{S}, \quad q_0 = 1 - q_1 - q_2. \quad (4)$$

Експериментально встановлено, що найкраща добротність резонатора досягається при геометричних розмірах $w = 0,2$ мм, $h_1 = 1,5$ мм, $\varepsilon_1 = 2,5$. Коефіцієнти заповнення визначаються як:

$$q_1 = \frac{1}{2} + \frac{0,9}{\pi \ln \frac{h_1}{w}}, \quad (5)$$

$$q_1 = \frac{1}{2} + \frac{0,9 + \frac{\pi}{4} \ln \left(\frac{\frac{h_2}{h_1} + 2}{\frac{h_2}{h_1} + w/4h_1} \right) \arccos \left\{ \left[1 - \frac{h_1}{(h_1 + h_2)} \left(1 - \frac{w}{8h_1} \right) \right] \sqrt{\frac{\frac{h_2}{h_1} + 2}{\frac{h_2}{h_1} + w/4h_1}} \right\}}{\pi \ln \frac{8h_1}{w}}. \quad (6)$$

Далі, знаючи коефіцієнти заповнення, можна обчислити діелектричну проникність досліджуваного зразка з ε_2 за формулою:

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_{eff} - q_0 \varepsilon_0 - q_1 \varepsilon_1}{q_2}, \quad (7)$$

де ε_{eff} - ефективна діелектрична проникність розраховується по виміряній резонансній частоті навантаженого резонатора f_1 і резонансній частоті резонатора у вільному просторі f_0 :

$$\varepsilon_{eff} = \left(\frac{f_0}{f_1} \right)^2. \quad (8)$$

Об'єкт зондування повинен мати плоский зріз або бути еластичним і приймати плоску форму. Геометричні розміри мікросмужкового резонатора вибираються згідно з робочою довжиною хвилі і

розмірами досліджуваного об'єкта. Лінійні розміри резонатора повинні бути менше розмірів досліджуваного об'єкта, що дозволяє при розрахунках розглядати досліджуваний об'єкт як нескінченну напівплощину. Розміри резонатора можуть бути довільними, на їх вибір впливають такі вимоги: номер моди на якій збуджується резонатор, максимальне узгодження імпедансу резонатора з опором генератора на частоті обраної моди, структура електромагнітного поля в ближній зоні випромінювання.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Експериментальні дослідження проведено для трьох матеріалів: тефлон, скло та оксид алюмінію. На Рис. 3 а представлена залежність коефіцієнта відбиття від частоти для ненавантаженого резонатора і трьох діелектриків. Спостерігається зменшення резонансної частоти при збільшенні діелектричної проникності досліджуваного об'єкта. Слід зазначити, що товщина зразка становить 3 мм.

На Рис. 3 б представлені залежності резонансної частоти резонатора для перших трьох мод від діелектричної проникності досліджуваного зразка. З практичної точки зору, для отримання більш точних результатів, доцільно проводити вимірювання на більш високих модах. В такому випадку збільшується кут нахилу залежності. Результати тестування матеріалів з малими діелектричними втратами та повітря наведені в Таблиці 1.

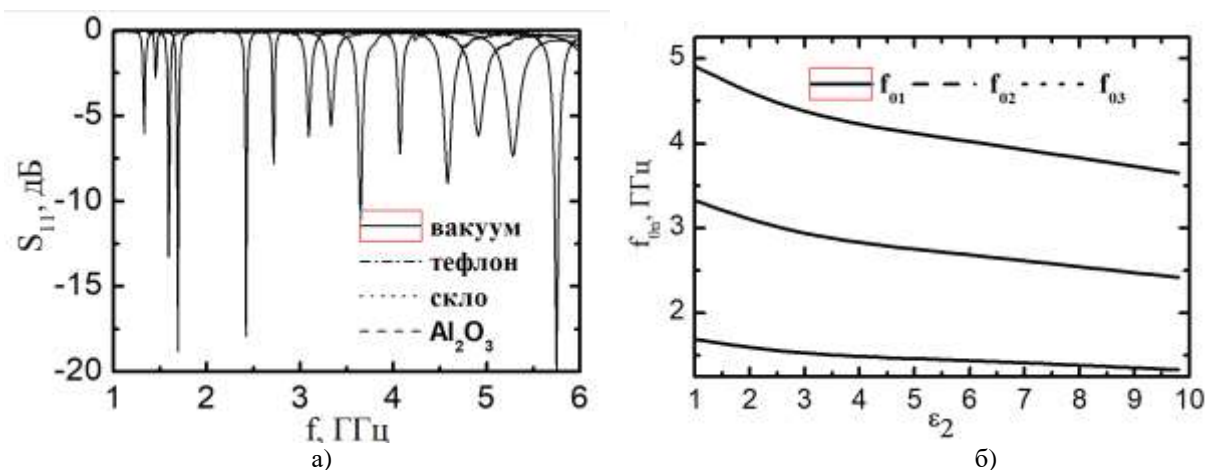


Рис. 3. Залежність коефіцієнта відбиття для твердих діелектриків (а) та теоретична залежність частоти резонансу від діелектричної проникності (б)

Таблиця 1. Результати вимірювань твердих діелектриків

Матеріал	Встановлене значення	Виміряне значення	Відносна похибка, %
Повітря	1,00019	1,0024	0,22
Тефлон	2,1	2,1394	1,88
Скло	5,5	4,9865	9,34
Оксид алюмінію	9,8	9,8425	0,43

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БІОЛОГІЧНИХ РІДИН

Далі, розглянемо приклад навантаження резонатора квіткою з рідким полярним діелектриком – водним розчином глюкози. Вимірювальна комірка (Рис. 4 а) уявляє собою резонатор, над яким розташована ємність або кювета з досліджуваною рідиною. Відомо, що дистильована вода при нормальних умовах має діелектричну проникність $\epsilon = 81$. Перші три резонанси коефіцієнту відбиття, які спостерігаються при взаємодії електромагнітного поля з дистильованою водою, представлені на Рис. 4 б. Внаслідок збільшення діелектричної проникності спостерігається зсув резонансів у низькочастотну область.

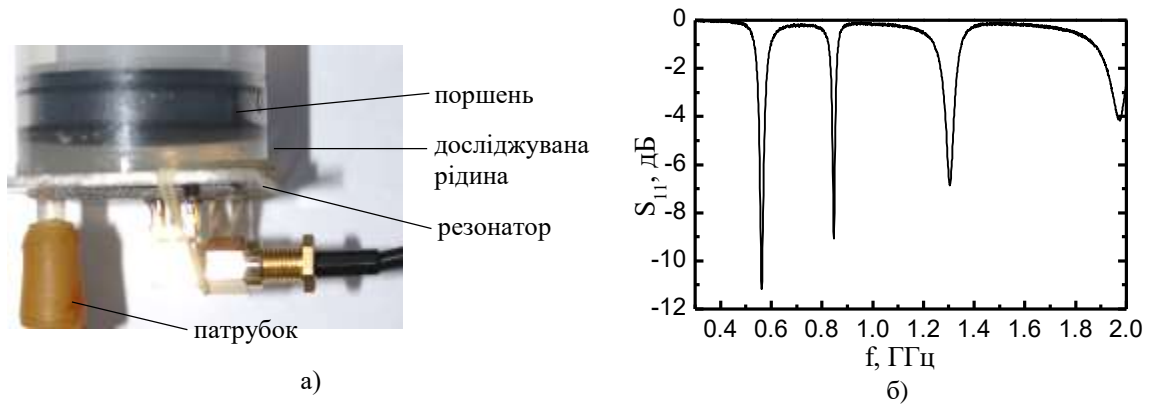


Рис. 4. Вимірвальна комірка (а), частотна залежність коефіцієнта відбиття (б)

Електродинамічні властивості досліджуваного об'єкта обрані зважаючи на властивості біологічних тканин з високим вмістом води [1]. Наприклад, зміна діелектричної проникності крові при зміні концентрації глюкози в діапазоні від 0,7 до 1,5 г/л, при постійній температурі, частоті і провідності приблизно становить $\Delta\varepsilon \approx 0,05$.

На Рис. 5 представлені експериментальні залежності коефіцієнтів відбиття резонатора від частоти при різних концентраціях глюкози у водному розчині. З графіків видно, що зміна діелектричної проникності на 0,06% призводить до помітного зсуву частоти резонансу на 3 МГц. Даний ефект пов'язаний зі зміною ефективного значення діелектричної проникності, яка може бути обчислена за формулою змішування: $\varepsilon_{\text{ef}} = \varepsilon_1\nu + \varepsilon_2(1-\nu)$, де ε_1 - діелектрична проникність води, ε_2 - діелектрична проникність глюкози, ν - об'ємна концентрація води. Таким чином, даний підхід може бути використаний для вимірювання концентрації глюкози в крові людини *in vitro*.

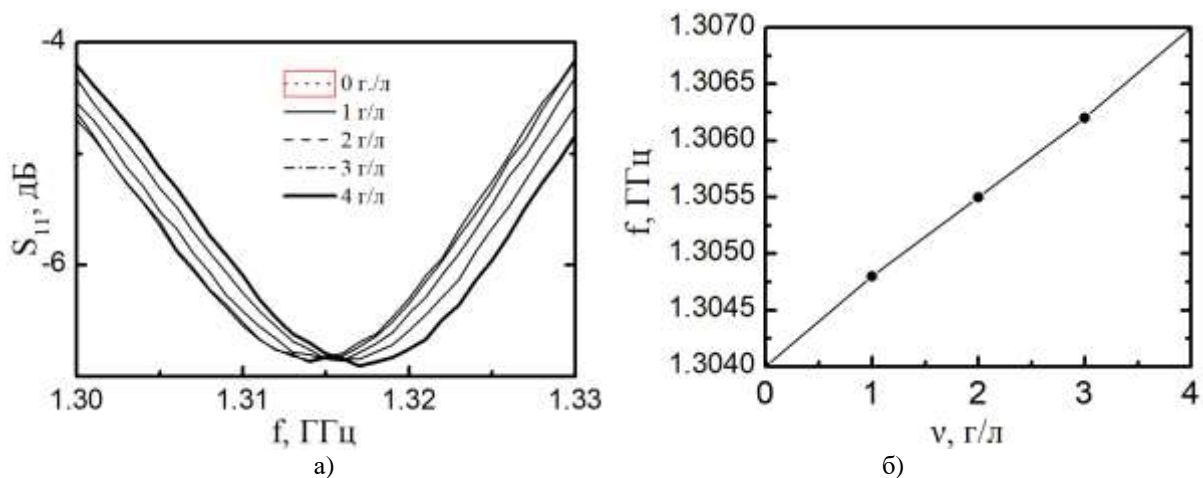


Рис. 5. Залежність коефіцієнта відбиття для різних концентрацій глюкози (а) і залежність частоти резонансу від концентрації глюкози у воді (б)

Слід зазначити, що чутливість до зміни діелектричної проникності та провідності зростає з частотою. Тому для подальших вимірювань та аналізу будемо використовувати третій резонанс, частота якого приблизно складає $f_p \approx 1,3 \text{ ГГц}$.

На Рис. 6 представлена серія експериментальних кривих, які характеризують поведінку коефіцієнта відбиття резонатора в залежності від провідності водно-сольового розчину. При збільшенні концентрації солі у воді резонанс стає гладким, що свідчить про зростання струму провідності, і як наслідок, - про зниження добротності системи.

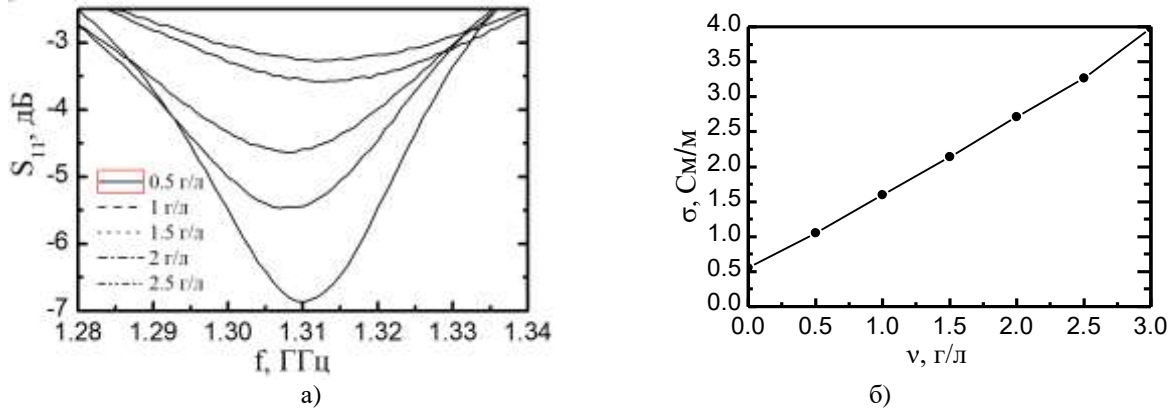


Рис. 6. Частотна залежність коефіцієнта відбиття від концентрації солі у воді (а) та залежність провідності від концентрації (б)

При перенесенні вимірювань на людину, особливу роль відіграє електрична провідність біологічної тканини, яка залежить від вмісту електролітів в плазмі крові. Електрична провідність суцільної крові на 70% визначається присутніми у плазмі солями (головним чином хлоридом натрію), на 25% - білками плазми і лише на 5% клітинами крові. У людському організмі концентрація солей у крові може знаходитись у межах від 0,5 г/л до 1,5 г/л. У цьому діапазоні залежність має характер близький до лінійного.

ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРА У СИСТЕМАХ ПЛЕТИЗМОГРАФІЇ

Одним з варіантів застосування розробленого резонатора можуть бути медичні системи експрес-діагностики. Зокрема, пристрої плетизмографії, які використовуються у медичній практиці для оцінки стану серцево-судинної системи, оцінки кровонаповнення (мікроциркуляції) окремих органів. Наразі відомо декілька основних неінвазивних методів реєстрації пульсової хвилі, які можна поділити на наступні групи: акустичні (доплерографія), оптичні (фотоплетизмографія), електричні (реографія) та механічні (механічна плетизмографія). Всі ці методи засновані на різних фізичних принципах і ефектах.

Запропонований метод реєстрації пульсової хвилі базується на циклічній зміні значення ефективної діелектричної проникності біологічної тканини, що відбувається внаслідок зміни кровотоку у судинах та капілярах. Далі, реєструється амплітуда сигналу, відбитого від мікросмужкового резонатора-аплікатора, який має щільний контакт з ділянкою тіла, наприклад, зап'ястка руки. Вимірювання амплітуди відбитого сигналу здійснюється на фіксованій частоті, яка є близькою до резонансної і вибирається експериментально таким чином, щоб під час реєстрації амплітуда відбитої хвилі не переходила через мінімум.

Під час проведення експериментальних досліджень розробленого мікросмужкового резонатора-аплікатора, розташованого на зап'ясті (Рис. 7 а), було зареєстровано пульсову хвилю, графік якої представлено на Рис. 7 б.

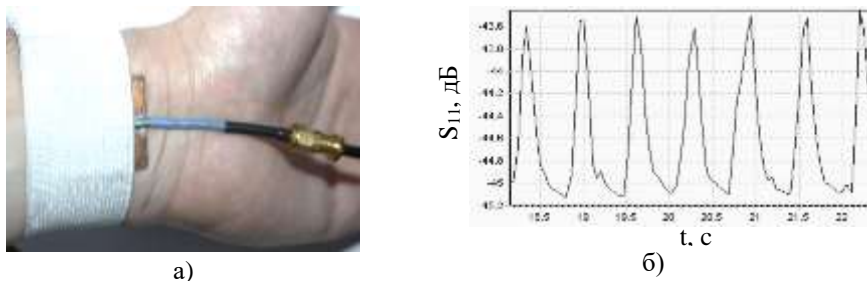


Рис. 7. Розташування сенсора на зап'ястку (а), фрагмент зареєстрованої пульсової хвилі (б)

Як видно з наведеного графіку, зміна кровонаповнення судин, і, як наслідок, зміна ефективної діелектричної проникності досліджуваної ділянки тканини, призводить до зміни коефіцієнта відбиття від мікросмужкового резонатора-аплікатора у діапазоні від -45,2 дБ до -43,7 дБ.

ВИСНОВКИ

Запропоновано оригінальну конструкцію мініатюрного мікросмужкового резонатора, який апробовано у якості сенсора діелектричних властивостей твердих і рідких матеріалів.

Даний електромагнітний сенсор має перспективи застосування у системах діелектрометрії для тестування об'єктів з одностороннім доступом. В основі методу лежить ефект зміни ефективного значення діелектричної проникності шару, що знаходиться у безпосередній близькості до мікросмужкового резонатора. На основі методу конформного перетворення представлено простий алгоритм для обчислення ефективного значення діелектричної проникності тришарової пласкої структури.

Проведено експериментальну перевірку методу та надано оцінку похибки при вимірюваннях діелектричної проникності твердих матеріалів з малими діелектричними втратами.

Представлені результати вимірювань вказують на перспективи застосування сенсора у системах вимірювання концентрації складових бінарних розчинів. Виготовлений резонатор-аплікатор апробовано у якості плетизмографічного датчика для реєстрації пульсової хвилі. В основі методу лежить явище зміни ефективного значення діелектричної проникності об'єкта, розташованого в ближній зоні реактивного поля мікросмужкового резонатора. Даний метод перспективний для дослідження діелектричних властивостей біологічних тканин, зокрема, крові.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

- Ye. Antonenko**  <https://orcid.org/0000-0003-1090-5017>
V. Kozheshkurt  <https://orcid.org/0000-0001-9613-0878>
D. Shtoda  <https://orcid.org/0000-0001-9831-6510>
V. Katrich  <https://orcid.org/0000-0001-5429-6124>
A. Bozhkov  <https://orcid.org/0000-0001-8418-5716>

REFERENCES

1. Ebrahimi A, Scott J, Ghorbani K. Dual-Mode Resonator for Simultaneous Permittivity and Thickness Measurement of Dielectrics. *IEEE Sensors Journal*. 2019;20(1):185-192.
2. Saeed K, Guyette A, Hunter I, Pollard R. Microstrip Resonator Technique for Measuring Dielectric Permittivity of Liquid Solvents and for Solution Sensing. *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium;2007:1185-1188*.
3. Yamashita E, Mittra R. Variational Method for the Analysis of Microstrip Lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1968;16(4):251-256.
4. Bogner A, Steiner C, Walter S, Kita J, Hagen G, Moos R. Planar Microstrip Ring Resonators for Microwave-Based Gas Sensing. Design Aspects and Initial Transducers for Humidity and Ammonia Sensing. *Sensors*. 2017;17(10):2422.
5. Baghelani M, Hosseini N, Daneshmand M. Selective Measurement of Water Content in Multivariable Biofuel Using Microstrip Split Ring Resonators. *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. 2020: 225-228.
6. Sun H, Li R, Tian G, Tang T, Du G, Wang B. Determination of complex permittivity of thin dielectric samples based on high-q microstrip resonance sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019.31-37.
7. Svacina J. Analysis of multilayer microstrip lines by a conformal mapping method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1992;40(4):769-772.
8. Svacina J. A simple quasi-static determination of basic parameters of multilayer microstrip and coplanar waveguide. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*. 1992;2(10):385-387.
9. Wheeler H. Transmission-Line Properties of Parallel Strips Separated by a Dielectric Sheet. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1965;13(2):172-185.