

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА КОАКСИАЛЬНОГО ЗОНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСПЕРСИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ БИОПРОБ

Е. А. АНТОНЕНКО, В. А. КОЖЕШКУРТ, А. И. КАРПОВ, Н. П. МУСТЕЦОВ

Целью работы является исследование возможностей и границ применимости метода открытого конца коаксиального волновода для изучения дисперсии диэлектрической проницаемости биологических тканей и жидкостей. Теоретическая часть содержит описание и алгоритм метода вычисления электрофизических параметров биологических проб. Предлагается аналитический метод вычисления комплексной диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков. В экспериментальной части работы представлены результаты исследований дисперсии диэлектрической проницаемости в диапазоне 0,1–10,5 ГГц для жировой, мышечной и эпителиальной тканей, а также для 50%-го раствора глюкозы, дистиллированной воды и 0,9%-го физиологического раствора. Установлено, что для разных образцов мнимая часть проницаемости меняет свой вид и имеет минимальное значение на определенной частоте. Это может быть использовано для идентификации образцов или для определения объемной концентрации компонент в растворе.

Ключевые слова: дисперсия, проницаемость диэлектрическая, жидкость биологическая, диэлектриметрия, зонд коаксиальный.

ВВЕДЕНИЕ

Биологические ткани, как физические тела, имеют специфические электрофизические свойства. Чаще всего их рассматривают как немагнитные материалы, характеризующиеся проводимостью σ и диэлектрической проницаемостью ϵ . Исследование электрофизических свойств биологических тканей и жидкостей, а также отдельных клеток и биологических суспензий методами диэлектрикометрии ведутся более 70 лет [1–4]. Диэлектрические свойства биологических тканей используются при оценке процентного соотношения целых и поврежденных клеток, при криогенном замораживании, для повышения эффективности метода термотерапии (оптимизация характеристик СВЧ зондов в зависимости от диэлектрических свойств среды) [5, 6], при диагностике онкозаболеваний [7], для диагностики заболевания сахарным диабетом [8, 9].

Целью данной работы является исследование возможностей и границ применимости метода открытого конца коаксиального волновода для изучения дисперсии диэлектрической проницаемости жидкостей. Методу открытого конца коаксиального волновода для исследования свойств диэлектриков посвящены работы [10–13]. Однако, не ясным остается вопрос о границах применимости метода и о выборе простой и адекватной модели открытого конца коаксиального волновода. Также, пока не решена обратная задача вычисления электрофизических параметров среды, взаимодействующей с электромагнитным полем открытого конца коаксиального волновода. Простые, аналитические методы оценки электрофизических параметров тканей необходимы при создании новых образцов диагностических средств.

Электрофизические свойства большинства материалов, в том числе и биологических жид-

костей, обладают частотной дисперсией, что позволяет определять объемные концентрации веществ в двухкомпонентных растворах, степень очистки вещества, проводить косвенных химический анализ. Многие вещества обладают диэлектрической дисперсией с аномальным поглощением в микроволновом диапазоне частот, что позволяет проводить радиоспектроскопию для их идентификации.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При выборе метода исследования было учтено, что контроль среды необходимо производить в широком диапазоне частот. Фото экспериментальной установки показано на рис. 1. Коаксиальный зонд погружается в исследуемое вещество. Для измерения комплексного коэффициента отражения использовался однопортовый анализатор цепей Anritsu S810D. С его помощью получены значения действительной $Re S_{11}$ и мнимой $Im S_{11}$ частей коэффициента отражения S_{11} в диапазоне частот 100 МГц–10,5 ГГц.

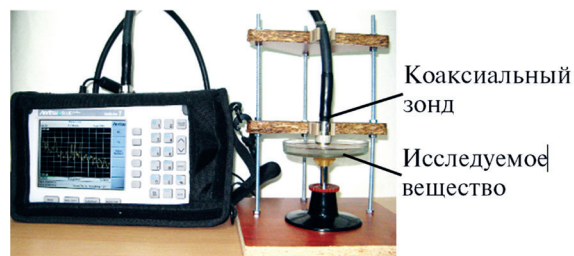


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

Для успешного проведения измерений необходимо осуществить калибровку прибора непосредственно на конкретный образец измерительного зонда. Для этого, при стандартной процедуре калибровки, открытый конец волновода заменяется на зонд, нагруженный на свободное про-

странство; вместо короткозамкнутой нагрузки используется зонд, открытый конец которого замкнут металлической пластиной (алюминевой фольгой); в качестве согласованной нагрузки используется стандартный широкополосный терминатор $Z = 50 + j0$ Ом. Использовать стандартные нагрузки (короткозамыкатель и открытый конец) нельзя из-за несовпадения нагрузочных плоскостей зонда и калибровочных нагрузок, что приводит к фазовым ошибкам измерений. Признаком неправильной калибровки является смена знака фазы коэффициента отражения в используемом диапазоне частот.

Графическое изображение открытого конца коаксиального волновода, погруженного в исследуемую среду, и эквивалентные схемы приведены на рис. 2, а и 2, б, в соответственно, где C_f – емкость, не зависящая от исследуемой среды и обусловленная появлением краевых полей внутри волновода, а C_0 – емкость без потерь, обусловленная геометрией и краевым полем открытого конца волновода, нагруженного на свободное пространство, ϵ^* – комплексная диэлектрическая проницаемость среды, r – эквивалентное сопротивление, обусловленное проводимостью среды, ϵ' – действительная часть диэлектрической проницаемости среды.

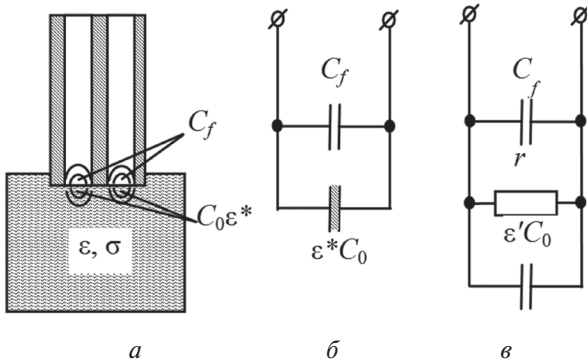


Рис. 2. Коаксиальный зонд, погруженный в среду (а) и эквивалентные схемы открытого конца волновода (б, в)

Следует учитывать, что измерительный прибор, в процессе калибровки, компенсирует емкость открытого конца коаксиального волновода, нагруженного на свободное пространство (открытый конец волновода). Таким образом: $C = C_f + C_0 = 0$, что не соответствует действительности. Это приводит к тому, что расчетная диэлектрическая проницаемость вакуума будет равна 0. Поэтому к вычисленному значению диэлектрической проницаемости прибавляем 1.

По измеренным значениям мнимой $\text{Im } S_{11}$ и действительной $\text{Re } S_{11}$ частей коэффициента отражения от зонда, нагруженного на исследуемую среду, осуществляется расчет ее параметров по следующему алгоритму.

1. В соответствии с параллельной схемой замещения (рис. 2, б), осуществим переход от значений коэффициента отражения к эквивалентному комплексному сопротивлению цепи (1), (2):

$$\text{Im } Z = Z_0 \cdot \frac{1 - \text{Re } S_{11}^2 - \text{Im } S_{11}^2}{(1 - \text{Re } S_{11})^2 + \text{Im } S_{11}^2}, \quad (1)$$

$$\text{Re } Z = Z_0 \cdot \frac{2 \cdot \text{Im } S_{11}}{(1 - \text{Re } S_{11})^2 + \text{Im } S_{11}^2}. \quad (2)$$

2. Вычисляем значение тангенса сдвига фазы между током и напряжением (3):

$$\text{tg } \varphi = \frac{\text{Im } Z}{\text{Re } Z}. \quad (3)$$

3. Вычисление абсолютных значений емкости и сопротивления эквивалентной нагрузки открытого конца волновода можно осуществить решая алгебраическую систему уравнений (4):

$$\begin{cases} |Z|^2 = \frac{1}{\left(\frac{1}{r^2} + \omega^2 \cdot C^2\right)^2} + \frac{\omega^2 \cdot C^2}{\left(\frac{1}{r^2} + \omega^2 \cdot C^2\right)^2}, \\ \text{tg } \varphi = -\omega \cdot r \cdot C \end{cases} \quad (4)$$

где первое уравнение – модуль полного сопротивления эквивалентной цепи $|Z|$, второе – сдвиг фазы между током и напряжением.

Решение системы уравнений относительно параметров C (5) и r (6) дает следующие результаты:

$$C = \frac{1}{|Z| \cdot \omega} \cdot \sqrt{\frac{\text{tg}^2 \varphi}{1 + \text{tg}^2 \varphi}}, \quad (5)$$

$$r = |Z| \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi}. \quad (6)$$

4. Вычисляем действительную часть диэлектрической проницаемости (7) (учитываем компенсацию измерительным прибором емкости открытого конца коаксиального волновода, нагруженного на свободное пространство):

$$\epsilon' = Ck + 1, \quad (7)$$

где k – коэффициент пропорциональности, обусловленный геометрией коаксиального зонда.

5. Вычисляем удельную проводимость.

$$\sigma = \frac{1}{r} \cdot k \quad (8)$$

7. Вычисляем мнимую часть диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (9)$$

8. Вычисляем тангенс угла диэлектрических потерь:

$$\text{tg } \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}. \quad (10)$$

В качестве калибровочного вещества для вычисления коэффициента пропорциональности k можно использовать диэлектрики, не обладающие дисперсией в рассматриваемом диапазоне частот, например, вазелиновое масло ($\epsilon' = 2$).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3–8 представлены экспериментальные зависимости дисперсии действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости

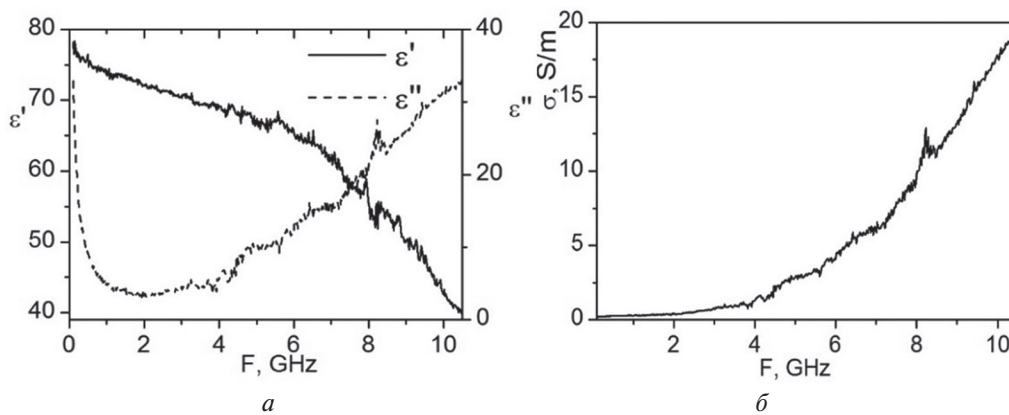


Рис. 3. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости и удельной проводимости дистиллированной воды

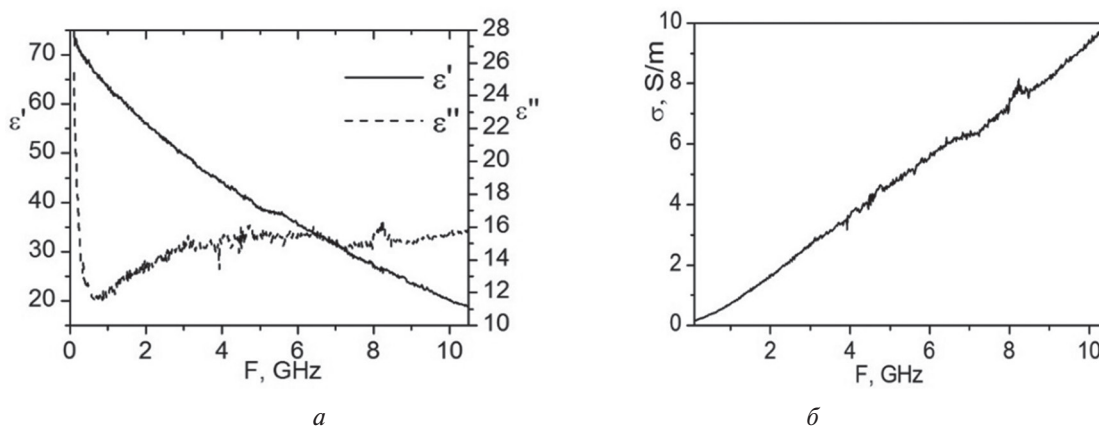


Рис. 4. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости и удельной проводимости 50 %-го раствора глюкозы

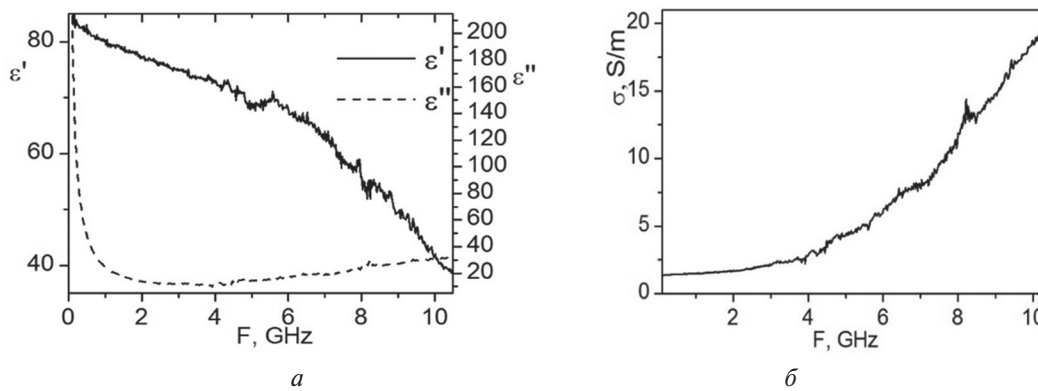


Рис. 5. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости и удельной проводимости физиологического раствора

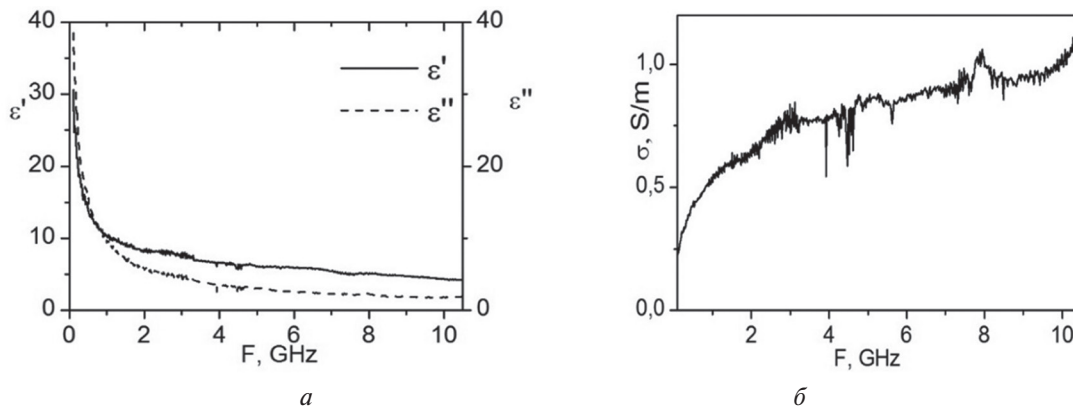


Рис. 6. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости и удельной проводимости жировой ткани

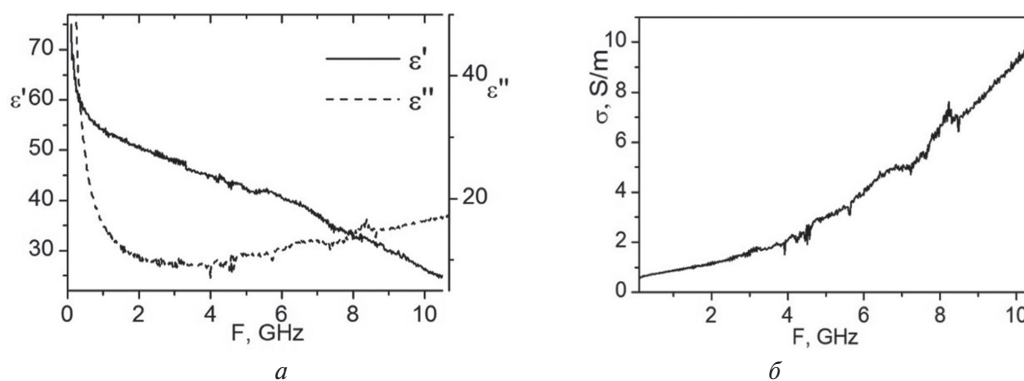


Рис. 7. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости и удельной мышечной ткани

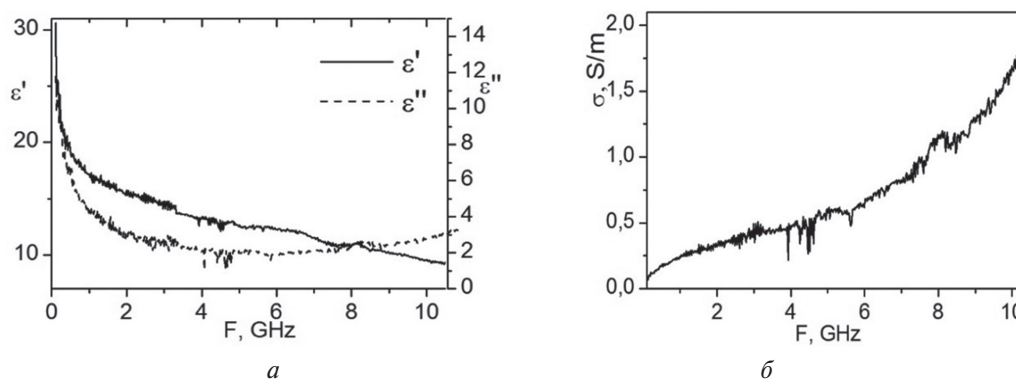


Рис. 8. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости и удельной кожной ткани

в диапазоне частот 0,1–10,5 ГГц для жировой, мышечной и эпителиальной тканей (кожа), а также для 50%-го раствора глюкозы, дистиллированной воды и 0,9%-го физиологического раствора. Наибольший интерес представляет зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости от частоты. Для разных веществ мнимая часть меняет свой вид и характеризуется значением частоты минимума функции, что может служить для идентификации или определения концентрации компонент, т.е. химического анализа веществ.

На рис. 9 представлены частотные зависимости модулей диэлектрической проницаемости для исследуемых веществ. Как видно из графиков наиболее низкую диэлектрическую проницаемость имеют кожа и жировая ткань, что обусловлено незначительным содержанием в них воды.

ВЫВОДЫ

Получены дисперсионные кривые действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 0,1–10,5 ГГц для биологических тканей. Предложен простой метод вычисления комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей по данным коэффициента отражения от открытого конца коаксиального волновода, погруженного в исследуемое вещество.

Метод позволяет экспериментально исследовать жидкие вещества на предмет релаксационных потерь и потерь сквозной проводимости.

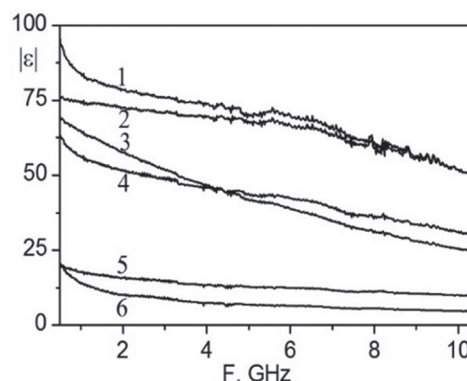


Рис. 9. Частотные зависимости модуля диэлектрической проницаемости:
1 – физиологический раствор, 2 – вода, 3 – раствор глюкозы, 4 – мышечная ткань, 5 – кожа человека, 6 – жировая ткань

Нелинейность частотной зависимости диэлектрической проницаемости веществ, в том числе и биологических тканей, может служить для их идентификации, определения концентрации компонент, химического состава. Метод может быть обобщен при исследовании зависимости диэлектрической проницаемости различных материалов от частоты, температуры, давления и других видов воздействий, что необходимо при расчете электродинамических структур и при создании сверхширокополосных СВЧ излучателей, помещенных в материальную среду с убывающей с частотой диэлектрической проницаемостью.

Литература

- [1] *Osswald. K* High Frequency conductivity and dielectric constant of biological tissues and fluids. Hochfrequenztech. Elektroakustik. 49:40, 1937.
- [2] *Rajewsky, B.; Schwan, H.P.* The dielectric constant and conductivity of blood at ultrahigh frequencies. Naturwissenschaften 1948, 35, 315.
- [3] *H.F. Cook*, "The dielectric behavior of some types of human tissue at microwave frequencies," Br. J. Appl. Phys., Vol 2, pp. 295-296, Oct. 1951.
- [4] *J. E. Roberts, H. F. Cook*. "Microwaves in medical and biological research, Brit. J. Appl. Physiol., vol. 3, pp. 33-39, 1952.
- [5] *Taylor L.* Implantable radiators for cancer therapy by microwave hyperthermia. Proc IEEE68: / L.S. Taylor. // Proceedings of the IEEE. – 1980. – №1. – С. 142–149.
- [6] *Ciobanu R.* Dielectric spectroscopy of biological tissues with targeted Fe₂O₃ drug delivery systems in support of RF/MW-hyperthermal control / R. Ciobanu, C. Schreiner. // Medical Measurements and Applications (MeMeA). – 2014. – С. 1–4.
- [7] *Liewei S.* A review of dielectric properties of normal and malignant breast tissue / Sha Liewei. // SoutheastCon, 2002. Proceedings IEEE. – 2002. – С. 457–462.
- [8] *Адельянов А.* Влияние кварцетина на диэлектрические характеристики компонент крови крыс с сахарным диабетом / А. Адельянов, О. Горобченко, О. Николов. // Физика живого. – 2010. – С. 50–54
- [9] *Topsakal E.* Glucose-Dependent Dielectric Properties of Blood Plasma / E. Topsakal, T. Karacolak, C. M. Elaine. // General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI. – 2011. – С. 1–4.
- [10] *Otto G. P.* Improved Calibration of a Large Open-Ended Coaxial Probe for Dielectric Measurements / G. P. Otto, W. C. Chew. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1991. – №4. – С. 742–746.
- [11] Brief Review of Measuring Techniques for Characterization of Dielectric Materials / [M. T. Jilani, M. Z. Rehman, A. M. Khan та ін.]. // International Journal of Information Technology and Electrical Engineering. – 2012. – №1. – С. 1–5.
- [12] *Arab H.* FEM Analysis of Conical Type Coaxial Open-ended Probe for Dielectric Measurement / H. Arab, C. Akyel. // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Guangzhou, China. – 2014. – С. 2223–2227.
- [13] Using the Coaxial Probe Method for Permittivity Measurements of Liquids at High Temperatures / [J. C. Santos, M. H. Dias, A. P. Aguiar та ін.]. // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. – 2009. – №1. – С. 78S–91S.

Поступила в редколлегию 16.02.2016



Антоненко Евгений Александрович, научный сотрудник кафедры физической и биомедицинской электроники и комплексных информационных технологий Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Научные интересы: биомедицинские приборы и системы, неинвазивные методы диагностики, теория и техника приборов СВЧ.



Кожешкурт Валентин Александрович, младший научный сотрудник, аспирант кафедры физической и биомедицинской электроники и комплексных информационных технологий Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. Научные интересы: биомедицинские приборы и системы, методы термографии, взаимодействие электромагнитного поля с биологическими тканями, неинвазивные методы диагностики.



Карпов Александр Иванович, старший научный сотрудник кафедры физической и биомедицинской электроники и комплексных информационных технологий Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Научные интересы: антенны и антенные системы, прием и передача радиосигналов, теория и техника приборов СВЧ.



Мустецов Николай Петрович, профессор кафедры физической и биомедицинской электроники и комплексных информационных технологий Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. Научные интересы: применение радиофизических методов для решения задач медицины, моделирование биологических звеньев в биотехнических системах, адаптация биологических и технических звеньев при создании сложных человеко-машинных систем.

УДК 537.868.3

Дослідження можливостей методу коаксіального зонда для вимірювання дисперсії діелектричної проникності біопроб / Є. О. Антоненко В. А. Кожешкурт, О. І. Карпов, М. П. Мустецов // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2016. – Том 15. – № 1. – С. 57–62.

Метою роботи є дослідження можливостей і меж застосування методу відкритого кінця коаксіального хвилеводу для вивчення дисперсії діелектричної проникності біологічних тканин і рідин. Теоретична частина містить опис і алгоритм методу обчислення електрофізичних параметрів біологічних проб. Пропонується аналітичний метод обчислення комплексної діелектричної проникності рідких діелектриків. В експериментальній частині роботи наведено результати досліджень дисперсії діелектричної проникності в діапазоні 0,1–10,5 ГГц для жирової, м'язової і епітеліальної тканин, а також для 50%-го розчину глюкози, дистильованої води і 0,9%-го фізіологічного розчину. Встановлено, що для різних зразків уявна частина проникності змінює свій вигляд і має мінімальне значення на певній частоті. Це може бути використано для ідентифікації зразків або для визначення об'ємної концентрації компонент у розчині.

Ключові слова: дисперсія, діелектрична проникність, біологічна рідина, діелектрометрія, коаксіальний зонд.

Рис. 9. Бібліогр. : 13 найм.

UDC 537.868.3

Research of opportunities of the coaxial probe method for measuring dispersion of bioassay permittivity / Ye. A. Antonenko, B. A. Kozheshkurt, A. I. Karpov, N. P. Mustetsov// Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2016. — Vol. 15. — № 1. — P. 57–62.

The aim of the paper is to study the possibilities and limits of applicability of the open end of the coaxial waveguide method to study the dispersion of the dielectric permittivity of biological tissues and fluids. The theoretical part contains a description of the algorithm of the method of calculating the electrical parameters of biological samples. An analytical method for calculating the complex permit-

tivity of liquid dielectrics is suggested. In the experimental part of the paper the results of the dielectric permittivity dispersion studies in the range of 0.1 - 10.5 GHz for fat, muscle and epithelial tissues, and for a 50% glucose solution, distilled water, and 0.9% saline are presented. It has been found that the imaginary part of permittivity changes its shape for different samples and has a minimum value at a certain frequency. It can be used for sample identification or for determining the concentration of specific components in the liquids.

Keywords: dispersion, dielectric constant, biological fluid, dielectrometry, coaxial probe.

Fig.: 9. Ref.: 13 items.