

УДК 621.371+537.87

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ СВЧ ДИАГНОСТИКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДК. П. Гайкович¹, А. Г. Галка², А. К. Мартусевич³, А. И. Смирнов^{2,4}, Д. В. Янин²¹ Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603087 Нижний Новгород, ул. Академическая ул., 7² Институт прикладной физики Российской академии наук,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46³ Университетская клиника ФГБОУ ВО "Приволжский исследовательский медицинский университет", 603155, г. Нижний Новгород, Верхневолжская наб., 18/1⁴ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603022 Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2018 г.

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования метода ближнеполюсной СВЧ диагностики подповерхностных диэлектрических неоднородностей миллиметрового и субмиллиметрового масштаба системой резонансных СВЧ-датчиков (краевая емкость цилиндрического конденсатора) с разными глубинами зондирования применительно к медико-биологической диагностике кожи¹. В анализе используется решение интегрального уравнения, связывающие вариации емкости зондов, определяемые из резонансных характеристик, измеряемых над неоднородной средой с пространственным распределением неоднородностей комплексной диэлектрической проницаемости. Метод тестировался и калибровался в контролируемых условиях по измерениям двухслойной среды (спирт-тефлон), а затем был применен к зондированию подповерхностного профиля комплексной диэлектрической проницаемости здоровой кожи человека, а также вариаций профиля диэлектрических параметров кожи в ожоговых ранах на крысах.

Ключевые слова: томография, голография, диэлектрик, неоднородные среды, ближнеполюсная СВЧ диагностика, обратные задачи рассеяния.

¹ Материалы статьи были частично доложены на XI Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва, 27-29 ноября 2017 г.) – см. Труды конференции, с. 217-221.

Abstract. Experimental study results of the method of near-field microwave diagnostics of subsurface dielectric inhomogeneities with millimeter-centimeter sizes are obtained with the set of resonant microwave probes (using edge capacity of cylinder capacitor) with different depth of sounding. These results are presented for test experiments with the spirit-teflon medium and in the application to the medical-biological diagnostics of skin. In analysis, the solution of integral equation that related probe capacity variations (determined from resonance parameters measured above an inhomogeneous medium) with the spatial distribution of inhomogeneities of complex permittivity. This method has been tested and calibrated in controlled condition by measurements of two-layered medium (spirit-teflon). It appeared possible to to determine experimentally and study the kernel the integral equation of the corresponding inverse problem, as well as to study efficiency of its solution. Then, the developed algorithm has been applied in sounding of the subsurface profile of complex permittivity of the sound human skin as well as of profile variations of dielectric parameters of skin burning wounds of rats. Results demonstrate real possibilities of various possible applications of this method in the medical-biological diagnostics of the inner skin structure as well as of its deceases, including those related to burning wounds. This methods gives the possibility to determine the depth and volume of these wounds that is very important to the proper choose of the treatment strategy.

Key words: tomography, holography, dielectric, inhomogeneous media, tnear-field microwave diagnostics.

1. Введение

Метод ближнепольного подповерхностного СВЧ зондирования сред, содержащих подповерхностные диэлектрические неоднородности, позволяет реализовать их диагностику с субволновой разрешающей способностью, что особенно важно при зондировании сред с сильным поглощением на высоких частотах, таких, как биологические ткани. Глубинную чувствительность ближнепольных методов обеспечивают измерения в зависимости от параметра,

определяющего глубину проникновения ближнего поля в среду: частоты зондирования, высоты зонда над поверхностью, размеров апертуры [1-6]. Такая диагностика представляет интерес для медицинских приложений, позволяя восстановить трехмерное распределение диэлектрических параметров воспалительных и опухолевых процессов в мягких тканях (метод томографии), визуализировать границы локализованных неоднородностей (метод голографии), а также восстанавливать глубинный профиль одномерных неоднородностей. В данной работе исследуется метод резонансного ближнепольного СВЧ профилирования по измерениям вариаций электродинамических параметров резонансных электрически малых датчиков с различными размерами апертуры.

Рассматриваемый метод реализован для системы из пяти резонансных (с резонансными частотами в диапазоне 700-800 МГц) датчиков с зондирующими элементами в виде цилиндрических конденсаторов с металлическим фланцем, у которых ближнее поле проникает на глубину порядка 1-5 мм, с основной целью применения в медицинской диагностике кожных патологий. В предыдущих работах была продемонстрирована чувствительность таких датчиков к структуре кожного покрова и к различным видам ее патологии [6]. Также, были предложены методы решения трехмерных обратных задач томографии распределенных неоднородностей и голографии сплошных образований [7]. Исходными данными для решения этих обратных задач являются результаты измерения резонансных характеристик системы СВЧ зондов при двумерном сканировании над поверхностью среды. Ниже представлены результаты тестовых экспериментов для одномерно неоднородной среды. В этом случае измерения достаточно выполнить в одной точке над поверхностью зондируемой среды.

2. Метод резонансной ближнепольной СВЧ диагностики

Резонансные зонды с различной глубиной проникновения ближнего поля располагаются на поверхности исследуемой однородной среды с $\varepsilon = \varepsilon_0$,

содержащей трехмерную неоднородность $\varepsilon_1(\mathbf{r})$, так что распределение комплексной диэлектрической проницаемости в этом слое представляется в виде суммы $\varepsilon(\mathbf{r}) = \varepsilon_{0l} + \varepsilon_1(\mathbf{r})$. В рамках квазистатического приближения, справедливого при выполненном в данном случае условии малости размера зонда к длине волны, в явном виде получено интегральное уравнение для определения неоднородности комплексной диэлектрической проницаемости из измерений вносимых ей вариаций емкости зонда[7]:

$$c_1(\mathbf{r}, r_1, r_2) = \frac{1}{4\pi\Delta U^2} \int_{r_0} \varepsilon_1(\mathbf{r}') |\mathbf{E}_0(x - x', y - y', z, r_1, r_2)|^2 d\mathbf{r}' = \int_{r_0} \varepsilon_1(\mathbf{r}') K(x - x', y - y', z, r_1, r_2) d\mathbf{r}', \quad (1)$$

где r_1, r_2 - радиусы внутреннего и внешнего проводников цилиндрического конденсатора, \mathbf{E}_0 - вектор зондирующего электрического поля. Поскольку ядро интегрального уравнения (1) зависит от разности поперечных координат, его можно свести к одномерному интегральному уравнению Фредгольма 1-го рода двумерным преобразованием Фурье:

$$c_1(k_x, k_y, r_1, r_2) = \frac{4\pi}{\Delta U^2} \int_z \varepsilon_1(k_x, k_y, z) |\mathbf{E}_0|^2(k_x, k_y, r_1, r_1, z) dz. \quad (2)$$

Чтобы получить искомое решение задачи томографии в декартовых координатах, необходимо получить решение уравнения (2) для каждой пары компонент k_x, k_y поперечного спектра по данным сканирования в двумерной области x - y системой резонансных датчиков с различной глубиной проникновения ближнего поля в исследуемую среду. Из результата решения $\varepsilon_1(k_x, k_y, z)$ обратной задачи (2) в k -пространстве путем двумерного обратного преобразования Фурье получается трехмерное распределение $\varepsilon_1(x, y, z)$ – искомая трехмерная структура возмущения комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_1(x, y, z) = \iint \varepsilon_1(k_x, k_y, z) \exp(ik_x x + ik_y y) dk_x dk_y. \quad (3)$$

На основе развитой теории были разработаны алгоритмы и программы, реализующие описанный выше метод томографии, и выполнено численное моделирование неоднородностей для среды с параметрами кожи человека [7].

Поскольку сканирующая система находится еще в стадии разработки, экспериментальные исследования были начаты с более простого случая одномерно неоднородной среды. При этом трехмерное интегральное уравнение (1) редуцируется к одномерному уравнению:

$$c_1(r_1, r_2) = \int_{-\infty}^0 \varepsilon_1(z') \left[\iint K(x-x', y-y', z', r_1, r_2) dx' dy' \right] dz' = \int_{z_d}^0 \varepsilon_1(z') K_1(z', r_1, r_2) dz'. \quad (4)$$

При решении (4) использовался алгоритм метода обобщенной невязки Тихонова для комплекснозначных функций, примененный в [2,3].

3. Исследование метода на двухслойной структуре спирт-тефлон

Несмотря на то, что ядро уравнения (4) в квазистатическом приближении может быть получено из формул [7], мы использовали метод его определения из эксперимента для среды с известным профилем диэлектрических параметров, что позволяет в определенной степени исключить влияние ограничений квазистатического приближения и других неучтенных источников погрешности. В данной работе для этой цели мы использовали двухслойную среду спирт-тефлон с переменным положением границы раздела сред z_d (см. на рис. 1).

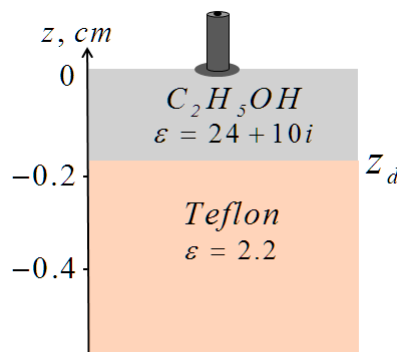


Рис. 1. Схема измерений двухслойной среды спирт-тефлон.

При этом профиль комплексной диэлектрической проницаемости имеет вид:

$$\varepsilon_1(z') = \begin{cases} \varepsilon_1, & z_d \leq z' < 0, \\ 0, & z' < -z_d, \end{cases} \quad (4)$$

где возмущение ε_1 понимается как разность диэлектрических проницаемостей спирта и тефлона. Тогда уравнение (4) может быть записано как

$$c_1(z_d, r_1, r_2) = \int_{z_d}^0 \varepsilon_1(z') K_1(z', r_1, r_2) dz', \quad (5)$$

ядро которого легко определить из измерений с переменной толщиной слоя спирта из соотношения

$$K_1(z_d, r_1, r_2) = -\frac{dc_1(z_d, r_1, r_2)}{dz_d} / \varepsilon_1. \quad (6)$$

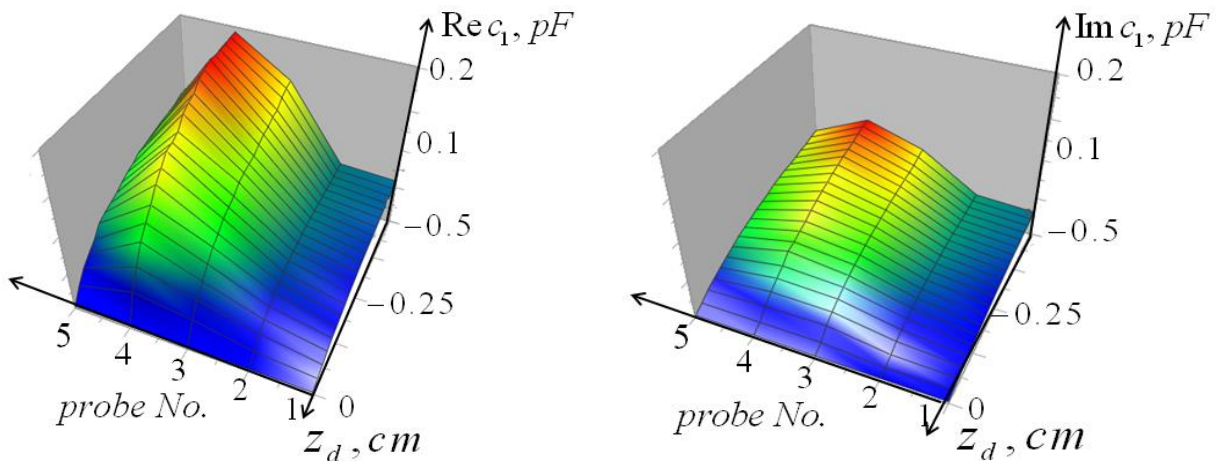


Рис. 2. Слева – вариации реальной части измерительной емкости в зависимости от положения границы раздела сред и номера датчика; справа – соответствующее распределение мнимой части.

На рис.2, где показаны результаты измерений, можно видеть, что распределение параметров измерительной емкости чувствительно к положению границы раздела сред до глубин порядка 5 мм, что создает предпосылки решения обратной задачи восстановления подповерхностной структуры $\varepsilon(z)$ из решения уравнения (5). На рис. 3,4 демонстрируются результаты решения этой обратной задачи для каждого из 31 значения z_d в виде двумерных

распределений $\varepsilon_1(z, z_d) = \varepsilon_1' + i\varepsilon_1''$ данной двухслойной среды для действительной и мнимой частей соответственно. Решение получено методом обобщенной невязки Тихонова [2,3].

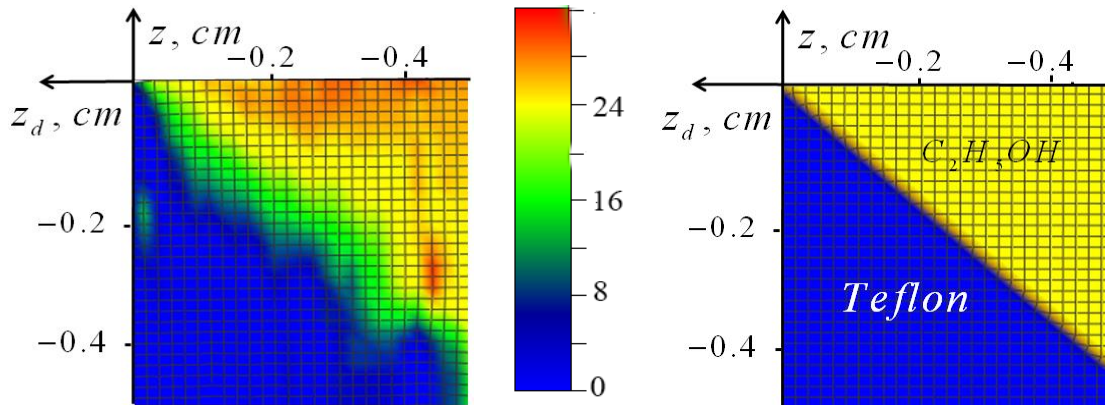


Рис. 3. Слева – результаты восстановления $\varepsilon_1'(z, z_d)$ из решения обратной задачи; справа – реальная структура параметра в эксперименте.

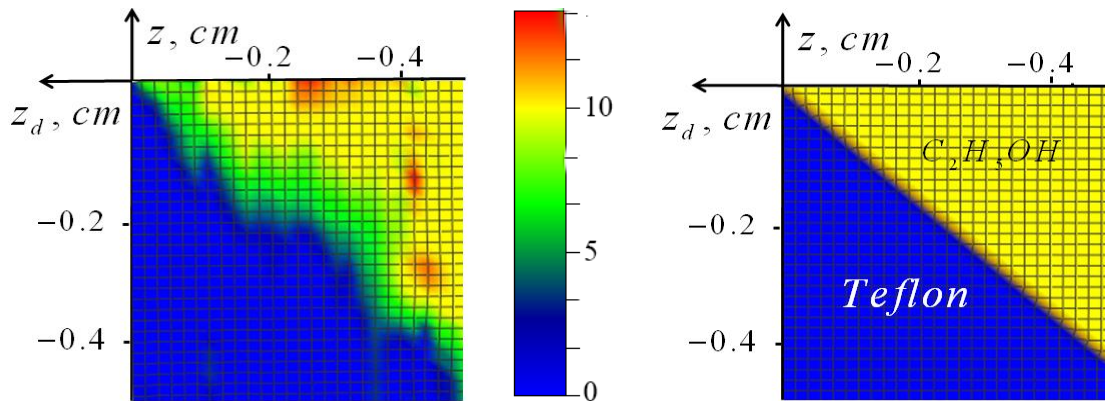


Рис. 4. Слева – результаты восстановления $\varepsilon_1''(z, z_d)$ из решения обратной задачи; справа – реальная структура параметра в эксперименте.

Восстановленные распределения профиля диэлектрических параметров показывают, что разработанный алгоритм СВЧ профилирования весьма эффективен в диапазоне глубин до 4-5 мм, который примерно соответствует диапазону погружения поля в среду для данного набора датчиков.

4. Зондирование диэлектрической структуры кожи

Параметры задачи выбирались, ориентируясь на возможности их реализации в реальных измерениях. При моделировании многоапертурного метода полагалось, что сканирующая система состоит из пяти ближнепольных зондов с параметрами $r_1 = 0,6; 1,2; 1,8; 2,4; 3$ мм при постоянном значении $r_2 = 3,8$ мм. При моделировании многоуровневого метода полагалось, что сканирование осуществляется на пяти уровнях высоты над поверхностью среды: $z_0 = 0; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6$ мм. Исходными данными для анализа являлись результаты измерений вариаций вносимой неоднородностями емкости в двумерной области x - y размерами 1×1 см² над зондируемой подповерхностной неоднородностью. Исследовались возможности томографического анализа распределенных неоднородностей, а также томографии и голографии сплошных подповерхностных объектов.

Таким образом, представленные в п.3 результаты численного моделирования разработанных методов ближнепольной импедансной СВЧ томографии, голографии и профилирования демонстрируют свою эффективность и перспективность применения СВЧ ближнепольной диагностики в биомедицинских приложениях.

Описанные выше калибровочные измерения позволили определить ядро уравнения (4) и использовать его в анализе диэлектрической структуры кожи и ее вариаций при ожогах. На рис. 5 можно видеть профили действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости здоровой кожи (два человека, кисть руки).

На рисунках видно уменьшение диэлектрических параметров с глубиной, что можно объяснить возрастающим содержанием жировых клеток в переходе от области дермиса к гиподермису на глубинах 1-2 мм. Этот переход до определенной степени сглажен, как и на рис. 3-4, из-за влияния погрешностей измерений, которые в данном случае выше из-за контактных эффектов на упругой поверхности кожи. Различие между диэлектрическими параметрами кожи двух человек можно объяснить различной степенью ее увлажненности.

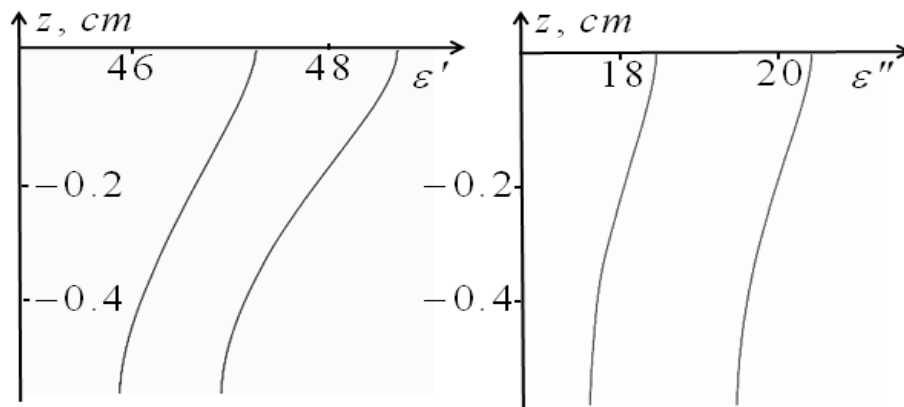


Рис. 5. Слева – восстановленные профили $\varepsilon'(z)$ кожи человека; справа – профили $\varepsilon''(z)$.

Были выполнены исследования возмущений профилей диэлектрических параметров структуры кожи, связанные с ее трансформацией при ожогах, нанесенных с использованием запатентованного нами метода [9], в экспериментах на шести крысах линии Вистар (см. вид ожоговой раны на рис.6).



Рис. 6. Пример ожоговой раны, смоделированной у крысы линии Вистар.

На рис. 7 представлены результаты эксперимента по резонансной СВЧ диагностике ожогов, где приведены отклонения в ожоге измерительной емкости $\Delta \text{Im} \varepsilon''_1$ и восстановленных профилей мнимой части диэлектрической проницаемости $\Delta \varepsilon''(z)$ от соответствующих параметров здоровой кожи. Можно видеть, что влияние ожога проявляется в уменьшении значений $\varepsilon''(z)$ в приповерхностном слое и возрастании на глубинах 2-4 мм. Учитывая, что мнимая часть диэлектрической проницаемости существенно определяется

водосодержанием тканей, можно интерпретировать наблюдаемое возмущение профилей, полагая, что сухая ожоговая корочка верхнего слоя объясняет пониженные значения ε'' , а расположенный глубже влажный ожоговый пузырь – повышенные значения [9, 10].

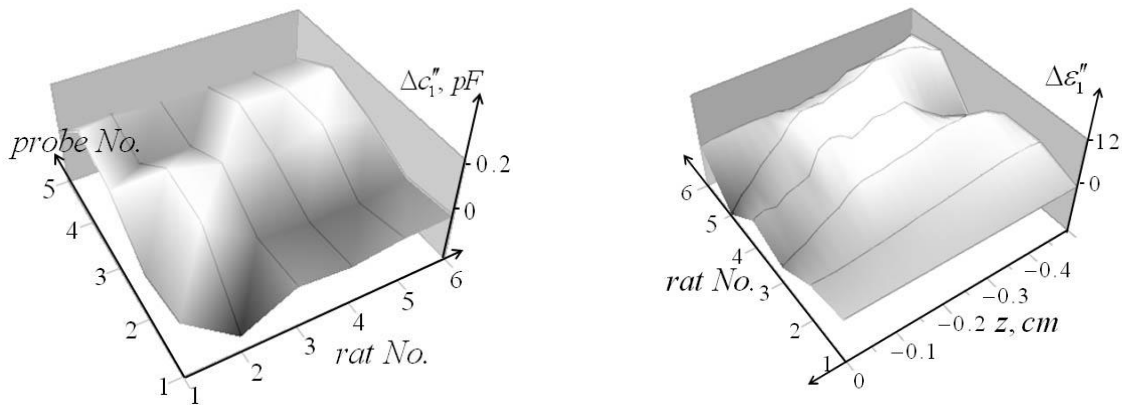


Рис. 6. Резонансная ближнепольная диагностика глубинной структуры кожи 6 крыс в ожоге. Слева – приращение $\Delta C_1''$ в области ожога; Справа – соответствующее изменение $\Delta \varepsilon''(z)$.

Результаты показывают перспективы применения метода в биомедицинской диагностике глубинной структуры кожи и ее нарушений, возникающих в том числе в условиях ожога. Это представляет практический интерес для уточнения глубины и объема полученной травмы, а также принципиально необходимо для выбора тактики лечения.

Исследования были выполнены при поддержке РФФИ, проект № 15-47-02294-р_поволжье.

Литература

1. Gaikovich K.P. Subsurface Near-Field Scanning Tomography // Physical Review Letters, vol.98, no.18, pp.183902, 2007.
2. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K., Maksimovitch Ye.S., Badeev V.A. Pseudopulse near-field subsurface tomography // Physical Review Letters, vol.108, no.16, pp. 163902, 2012.

3. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K., Maksimovitch Ye.S., Badeev V.A. Subsurface near-field microwave holography // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol.9, issue 1, p. 74-82, 2016.
4. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K., Maksimovitch Ye.S., Smirnov A.I., Sumin M.I. Dual regularization in non-linear inverse scattering problems // Inverse Problems in Science and Engineering, vol. 24, no.7, p. 1215–1239, 2016.
5. Gaikovich K.P. Methods of near-field subsurface diagnostics: theory, study, comparison // Proc. Of 19th International Conference on Transparent Optical Networks: ICTON 2017 (Spain, Girona, July 2-6, 2017). pp. We.A4.3.
6. Янин Д.В., Галка А.Г., Костров А.В., Смирнов А.И., Стриковский А.В., Кузнецов И.В. Подповерхностная диагностика квазиодномерных неоднородностей методом резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования // Известия вузов. Радиофизика, т.57, №1, с. 35-47, 2014.
7. Гайкович К.П., Смирнов А.И., Янин Д.В. Методы ближнепольной резонансной СВЧ диагностики биологических тканей // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал № 2, 2017. URL <http://jre.cplire.ru/jre/feb17/5/text.pdf>.
8. Мартусевич А.К., Соловьева А.Г., Мартусевич А.А., Перетягин П.В. Особенности функционально-метаболической адаптации организма в условиях травматического стресса // Медицинский альманах. №5, с. 175-178, 2012.
9. Перетягин С.П., Мартусевич А.К., Вазина И.Р. с соавт. Разработка нового способа моделирования комбинированной ожоговой травмы // Современные технологии в медицине. №2, с. 106-109, 2011.

Для цитирования:

К. П. Гайкович, А. Г. Галка, А. К. Мартусевич, А. И. Смирнов, Д. В. Янин. Экспериментальное исследование ближнепольной резонансной СВЧ диагностики биологических сред. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/2/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.10.2