

К ВОПРОСУ О РАДИАЛЬНОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОАКСИАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АПЕРТУРЫ

*СЛИПЧЕНКО Н.И., БОРОДКИНА А.Н.,
ИБРАИМОВ И.К., ПАНЧЕНКО А.Ю.*

Рассматривается задача перспективности дальнейшего развития аналитических моделей СВЧ сенсоров в виде открытой коаксиальной апертуры. Геометрическая схема сенсора допускает возможность использования математической модели для строгого решения задачи, которая относится к многослойным объектам. Обсуждаются результаты расчетов компонент электромагнитного поля в рабочей области сенсора. На основании решения задачи описания полей в рабочей области такого сенсора делается вывод о возможности оценки свойств малых объектов, вплоть до наноразмерных.

Ключевые слова: коаксиальная линия; апертура; емкость; граничные условия; постоянная распространения; компоненты электромагнитного поля.

Key words: coaxial line; aperture; capacity; border conditions; propagation constant; electromagnetic field components.

Введение

В настоящее время происходит быстрое развитие нанотехнологий. Актуальной задачей становится создание неразрушающих средства контроля наноразмерных объектов. Открытая коаксиальная апертура позволяет сконцентрировать электромагнитное поле в малой области, которая существенно меньше длины волны. Это позволяет использовать ее в качестве сенсора нанообъектов. Открытые коаксиальные сенсоры (ОКС) СВЧ диапазона имеют ряд преимуществ. Они требуют минимальной обработки исследуемого образца. Уменьшение размеров ОКС позволяет расширить частотный диапазон измерений в область высших частот. Измерение в широком диапазоне увеличивает объем первичной информации. Это способствует повышению достоверности информации, полученной при косвенных измерениях. Кроме того, возможно создать достаточно точную аналитическую модель процесса измерений. Это упрощает создание конкретных конструкций измерителей.

Аналитическое решение для распределения компонент электромагнитного поля (ЭМП) наиболее просто записывается для слоистого образца, ЭМП в котором возбуждается коаксиальной апертурой. Это позволяет описать свойства ОКС, предназначенных для исследования тонких пленок. Ранее рассматривались различные варианты

влияния тонких слоев, включая анализ излученной волны [1]. Оценке радиальных неоднородностей уделено меньше внимания. Для этого требуются принципиально новые, существенно более сложные аналитические модели. Перспективы создания таких моделей необходимо обосновать. Оценить такие перспективы и направления дальнейшего развития можно на основании уже созданных моделей.

Цель данной работы – предварительная оценка пространственной разрешающей способности ОКС, включая радиальную. Задачами работы является анализ компонент ЭМП в рабочей зоне ОКС.

1. Задачи аналитического описания ОКС

Строгое математическое представление компонент ЭМП в рабочей области ОКС можно получить на основании тензорных функций Грина уравнений Максвелла для цилиндрических областей [2,3]. В основе этих представлений лежит свойство аддитивности волновых процессов. При заданных условиях на всей поверхности области можно определить пространственное распределение компонент ЭМП. В общем виде это интеграл по той части области, в которой расположены источники от произведения функции Грина на интенсивность источников. В случае векторного поля и источников, которые также являются векторами, функция Грина представляет собой тензор второго ранга. Например, общее выражение для распределения магнитного поля \vec{H} при действии только внешних магнитных токов будет иметь вид:

$$\vec{H}(\vec{r}, z) = \int_V \vec{A}^M(\vec{r}, \vec{r}') \vec{j}^i(\vec{r}') dv, \quad (1)$$

где \vec{A}^M – тензор магнитного поля; \vec{j}^i – источники магнитного поля.

Если область однородная и ее границы совпадают с координатными поверхностями, такой подход не вызывает затруднений. На основании свойства аддитивности поля функция Грина составляется из собственных функций области. При неоднородной области требуется сопряжение полей на границах. Производится это на основании граничных условий для компонент ЭМП. В регулярной области (регулярном волноводе) это существенно усложняет аналитическую запись, приводя к лестничному выражению [4,5]. Но в этом случае собственные функции всех участков области одинаковые. При нарушении регулярности требуется решение интегрального уравнения на каждой из границ [6]. Поэтому при нескольких границах более эффективным является численное решение с использованием соответствующего ПО.

Для ОКС, длина рабочей волны которых меньше размеров апертуры, в случае контроля слоистых образцов аналитические модели показали свою эффективность. Нерегулярность структуры в плоскости апертуры требовала решения одного интегрального уравнения [7]. При радиально неоднородном образце задача существенно усложняется.

2. Обоснование пути решения

Схема измерений и структура электрического поля ОКС в этом случае показана на рис. 1.

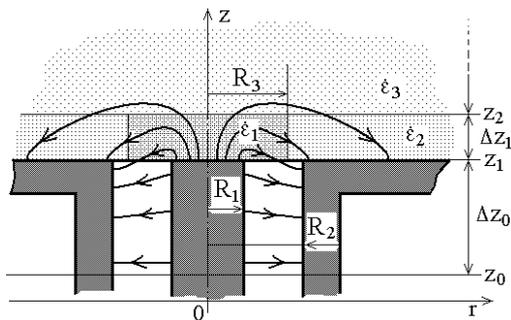


Рис. 1. Структура электрического поля ОКС при радиально неоднородном образце

Одномодовый режим работы ОКС обеспечивается при ТЕМ волне в подводящей линии. Поэтому в ОКС имеется только одна компонента магнитного поля – H_ϕ . Электрическое поле имеет две компоненты: радиальную – E_r и осевую – E_z .

При такой структуре ЭМП H_ϕ связана только с одной составляющей источника – j_ϕ^i . При этом $j_\phi^i = E_r$, и из 9 компонент \vec{A}^M для $\vec{H} = \vec{\nabla}_0 H_\phi$ достаточно воспользоваться одной поперечной. Соответствие выбора $E_r(z, r)$ реальному распределению определяет точность общего результата. При малой апертуре ($R_2 \ll \lambda$) распределение $E_r(z, r)$ отличается от поля в подводящей линии только в верхней части области Δz_1 . Если расположить плоскость $z_0 = \text{const}$ в нижней части области Δz_1 , то можно задать $E_r(z, r)$ в виде $E_r(z_0, r) = U_0 r^{-1}$. Тогда значение U_0 связано с напряжением в линии U_L , как $U_L = U_0 \ln(R_2 / R_1)$. Для строгого определения поля в исследуемом образце потребуется решение интегрального уравнения относительно $E_r(z_1, r)$ – поля в плоскости апертуры [7]. Однако строгий анализ показывает, что отличие $E_r(z_1, r)$ от $U_0 r^{-1}$ проявляется только вблизи краев апертуры. При малой апертуре это отличие

незначительно влияет на выходные параметры ОКС [8].

При $R_2 \ll \lambda$ наиболее информативным выходным параметром является емкость ОКС – \dot{C}_a . При расчете емкости в плоскости z_0 можно получить максимально точное решение [9]. Для оценки свойств ОКС на качественном уровне достаточен анализ \dot{C}_a рассчитанной в плоскости апертуры. Общая энергия электрического поля связана со значением электрической емкости, что можно использовать для оценки ее величины [10,11]. Поэтому оценка распределения компонент электрического поля позволит определить область, которая вносит наибольший вклад в \dot{C}_a . Размер этой области позволит судить о разрешающей способности ОКС [12]. Таким образом, анализ распределений компонент ЭМП, полученный сравнительно простым способом, решает задачу, поставленную в статье. При этом также можно воспользоваться случаем однородного образца.

3. Основные соотношения для ОКС

При $E_r(z_1, r) = U_0 r^{-1}$ выражения для E_z , E_r и H_ϕ упрощаются до интегралов по волновым числам $0 < k < \infty$ [13]:

$$H_\phi(r, z) = -j\omega\epsilon_0\dot{C}_a U_0 \times \int_0^\infty \frac{[J_0(kR_1) - J_0(kR_2)]J_1(kr)}{\gamma_1 \exp[\gamma_1(z - z_1)]} dk, \quad (2)$$

$$E_r(r, z) = -U_0 \times \int_0^\infty \frac{[J_0(kR_1) - J_0(kR_2)]J_1(kr)}{\exp[\gamma_1(z - z_1)]} dk, \quad (3)$$

$$E_z(r, z) = U_0 \times \int_0^\infty \frac{[J_0(kR_1) - J_0(kR_2)]J_0(kr)}{\gamma_1 \exp[\gamma_1(z - z_1)]} k dk, \quad (4)$$

где J_0 и J_1 – функции Бесселя;

ω – круговая частота: $\omega = 2\pi f$;

f – рабочая частота;

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

Постоянная распространения в образце определяется как $\gamma_1 = \sqrt{k^2 - \epsilon_1 k_0^2}$, где k_0 – постоянная распространения в вакууме.

4. Анализ распределений компонент ЭМП

Оценка участка распределения с наибольшей интенсивностью компонент электромагнитного поля в образце покажет размеры области образца, свойства которой внесут наибольший вклад в изменение выходного параметра сенсора.

Численный анализ проведем для $U_a = 1\text{В}$, $f = 10\text{ГГц}$, $R_2 = 2\text{мм}$ и диэлектрической прони-

цаемости образца $\hat{\epsilon}_1 = 1 - i0,0001$. Выбор этих значений обусловлен следующими соображениями. Выбранный диаметр апертуры соответствует примерно половине от $\lambda/4$. В этом случае ОКС будет функционировать в ближнеполевом режиме, который для него является основным. Но при этом уже можно будет увидеть первые признаки влияния антенных свойств апертуры. Некоторые из этих свойств были рассмотрены ранее [1]. Изменение действительной части диэлектрической проницаемости образца приведет к пропорциональному изменению длины волны. Естественно, при этом изменится коэффициент отражения в линии, но можно сказать, что это не приведет к качественным изменениям распределения компонент ЭМП в плоскости апертуры. Поэтому оценка свойств ОКС, которая проводится на качественном уровне, и выводы, полученные на основании этой оценки, можно будет использовать при выборе и разработке конкретных конструкций ОКС.

Аналогичные рассуждения можно применить и к оценке воздействия потерь в образце. При увеличении потерь распределение ЭМП будет прижиматься к апертуре.

На рис. 2,а,б,в показаны распределения $H_\varphi(r, z)$ для трех значений соотношения R_1/R_2 .

Для сравнения показаны максимальные значения напряженности магнитного поля в плоскости апертуры – $H_{\varphi\max}$ и положение точек с этими значениями – R_{\max} .

Изменение $H_{\varphi\max}$ при изменении отношения R_1/R_2 соответствует изменениям волнового сопротивления подводящей линии. При одинаковом значении напряжения между проводниками коаксиальной линии среднее значение интенсивности магнитного поля будет изменяться. Естественно, при этом изменяется общая энергия ЭМП и коэффициент отражения в плоскости апертуры. Влияние этого фактора можно детально проанализировать при более строгом подходе к данной задаче, основанном на решении интегрального уравнения. Но, поскольку это не входит в задачи данной работы, здесь ограничимся анализом всех компонент ЭМП на заданном распределении в плоскости ОКС. Поэтому в данном случае определяющим является относительное изменение интенсивности поля в пространстве.

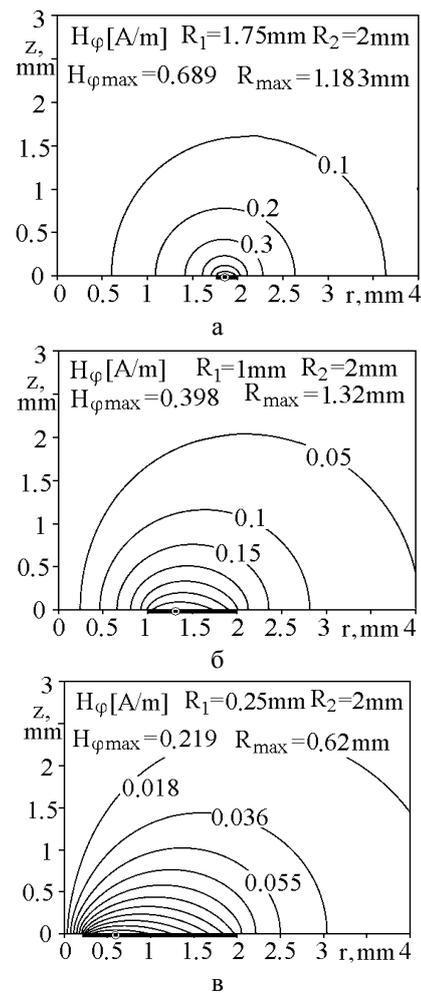


Рис. 2. Интенсивность магнитной компоненты в образце

В большинстве практических случаев измерению подлежат диэлектрические свойства объектов. Но именно они определяют энергию электрического поля в емкостной структуре. Поэтому распределения E_r и E_z позволят более наглядно представить, как будет изменяться разрешающая способность ОКС.

Распределение радиальной компоненты электрического поля E_r показано на рис.3, а,б,в.

Можно заметить некоторое сходство распределений на рис. 2 и 3. Это особенно наглядно проявляется в области, находящейся напротив щели между проводниками сенсора. В остальной части в соответствии с граничными условиями $E_r = 0$. Вблизи ребер E_r существенно возрастает, но не до бесконечности.

Распределение осевой компоненты электрического поля E_z показано на рис. 4, а,б,в.

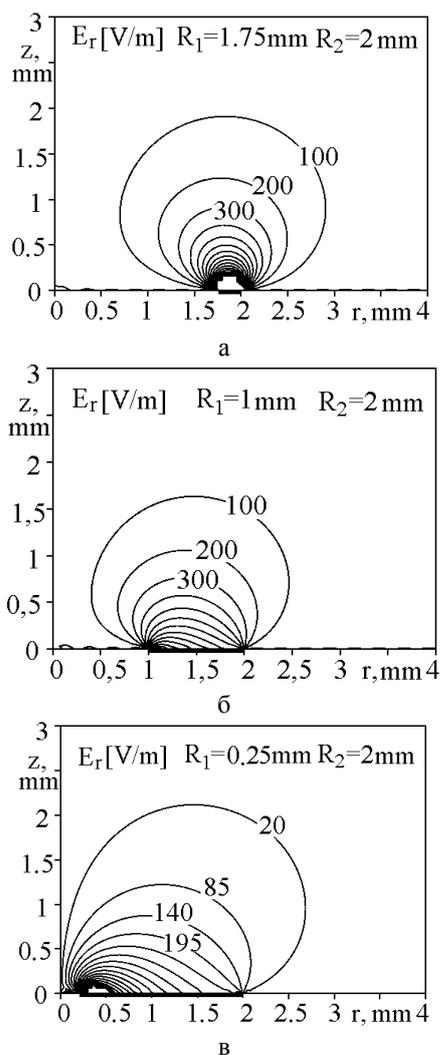


Рис. 3. Интенсивность радиальной электрической компоненты в образце

Как показывают распределения E_r и E_z , наибольшая концентрация электрической компоненты вблизи краев апертуры. Отметим, что при более строгом анализе наблюдается усиление этого фактора [7]. Однако общая энергия поля вблизи краев относительно невелика и не вносит существенный вклад в \dot{C}_a . Наибольший вклад в общее значение \dot{C}_a вносят промежуточные части распределений, те части, где поле проникает в образец.

Показанная на рис. 2, 3 и 4 трансформация распределения при $R_1/R_2 \rightarrow 0$ указывает на то, что концентрация \vec{E} вблизи центрального проводника возрастает. При этом возрастание в направлениях осей \vec{r}_0 и \vec{z}_0 примерно одинаковое (рис. 4, в). Поэтому уменьшение радиуса центрального стержня пропорционально увеличивает разрешающую способность в радиальном направлении. Но в этом случае поле менее глубоко проникает в исследуемый образец.

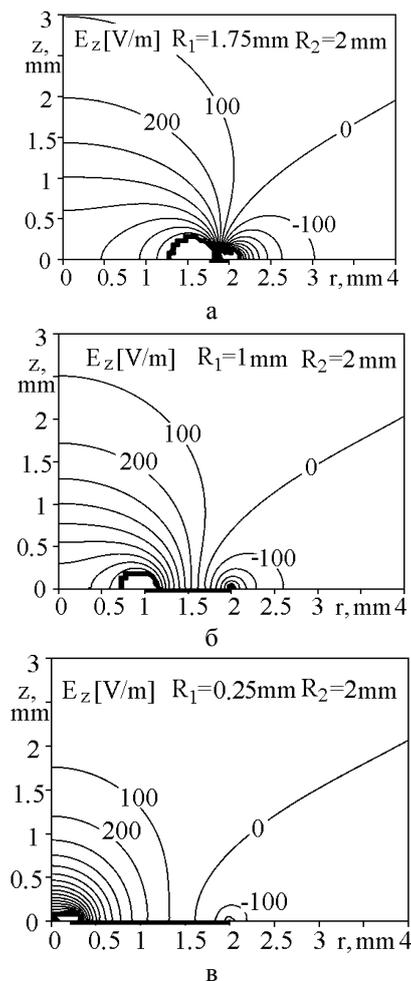


Рис. 4. Интенсивность осевой электрической компоненты в образце

Однако при $R_1/R_2 \rightarrow 1$ проникновение сравнимо размером щели между центральным и наружным проводниками апертуры. При этом также осевое проникновение соответствует радиальному.

Таким образом, можно сделать вывод, что как радиальная, так и осевая разрешающая способность сравнима с размером минимального элемента образующего апертуру. Соответственно вклад в изменение выходного значения \dot{C}_a будет одного порядка [14].

Выводы

Проведенный анализ соответствует реальным измерительным преобразователям и имеет практическую ценность. Представленные результаты показывают, что варьируя форму апертуры можно изменять характеристики сенсора, подбирая их под свойства образцов. Показано, что осевая и радиальная пространственная разрешающая способность ОКС зависит от минимальных размеров элементов, образующих апертуру. При этом разрешающая способность в обоих направлениях имеет примерно одинаковые величины. Проведенный анализ указывает на перспективность использования ОКС при исследовании наноразмерных объектов. Кроме того, он является основанием для дальнейшего развития аналитических моделей данного вида сенсоров.

Литература: 1. *Wen Mingming, Ch. Liu, Panchenko A.Yu., Slipchenko N.I.* Evaluation of influence of microwave radiation sensor in the form of an open end of the coaxial line on its metrological characteristics // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2015. V.74, No.15. P.1355-1366. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i15.2. *Панченко Б.А.* Тензорные функции Грина уравнений Максвелла для цилиндрических областей // *Радиотехника*. 1970. Вып. 15. С. 82-91. 3. *Tai C.T.* Dyadic Green's functions for a coaxial line. *IEEE Trans. of Antennas and Propagation*. 1983. Vol.48, No.2, P. 355-358. 4. *Слипченко Н. И., Бородкина А.Н., Панченко А.Ю.* Особенности аналитической модели четвертьволнового резонаторного СВЧ сенсора для контроля сердечно-сосудистых патологий // *Материалы Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии"*, (КрыМиКо'2014), Севастополь, 8-13 сентября 2014. Т.2. С. 1051-1052. 5. *Слипченко Н. И., Бородкина А.Н., Панченко А.Ю.* Совершенствование аналитической модели четверть волнового резонаторного сенсора для диагностики сердечно сосудистых патологий // *Радиотехника*. 2014. Вып.177. С.185-191. 6. *Лю Чан, Панченко А. Ю., Слипченко Н. И., Зайченко О. Б.* Коаксиальный сенсор открытого типа. Интегральное уравнение электрического поля в плоскости апертуры // *Вестник НТУ КПИ. Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение*. 2017. Вып.69. С.11-16. 7. *Ch. Lu, Panchenko A.Yu., Slipchenko Mykola I.* An integral equation for the field distribution within the aperture plane of the coaxial sensor // *Telecommunications and Radio Engineering* Том 75, 2016 I.7 P.587-594. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i7.20. 8. *Panchenko A.Yu.* Modeling a small aperture resonator type microwave meter of substance parameters // *Telecommunications and Radio Engineering*. 1998. V.52 No.8. P. 118-121. 9. *Panchenko A.Yu., Slipchenko N.I., Borodkina A.N.* On the development of a practical technique of theoretical calibration of resonant sensors for near-field microwave diagnostics // *Telecommunication and Radio Engineering*. 2014. V.73, №15. P. 1397-1407. 10. *Слипченко Н. И., Бородкина А.Н., Панченко А.Ю.* Повышение точности теоретической калибровки и информативности четвертьволновых резонаторных датчиков для СВЧ диагностики // *Радиоэлектроника и информатика*. 2014. №2. С. 8-14. 11. *Panchenko A.Yu., Slipchenko N.I., Borodkina A.N.* Improvement of the analytical model of a quarter-wave resonator sensor for cardiovascular scanning // *Telecommunication and Radio Engineering*. 2015. V.74, №4. P. 345-354. 12. *Лю Чан, Панченко А. Ю., Слипченко Н. И., Зайченко О. Б.* Ближнеполевой коаксиальный сенсор открытого типа. Оценка пространственной разрешающей способности измерительной апертуры // *Вестник НТУ КПИ. Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение*. 2017. Вып.71. С.17-24. 13. *Лю Чан, Слипченко Н. И., Бондаренко И.Н., Панченко А.Ю.* СВЧ сенсор быстрых трансформаций свойств биологических жидкостей // *Радиоэлектроника и информатика*. 2018. №2. С. 5-10. 14. *Бондаренко И.Н., Мамедова Н.А., Панченко А.Ю., Светличная И.Н.* Оценка осевой разрешающей способности СВЧ сенсора для исследований

биологических объектов // *Радиоэлектроника и информатика*. 2018. №4. С. 6-11.

Transliterated bibliography:

1. *Wen Mingming, Ch. Liu, Panchenko A.Yu., Slipchenko N.I.* Evaluation of influence of microwave radiation sensor in the form of an open end of the coaxial line on its metrological characteristics // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2015. V.74, No.15. P.1355-1366. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i15
2. *Panchenko B.A.* Tenzornye funkicii Grina uravnenij Maksvela dlja cilindricheskikh oblastej // *Radiotekhnika: Vseukrainskij mezhvedomstvennyj nauchno-tehnicheskij sbornik*. 1970. Vyp. 15. S. 82-91.
3. *Tai C.T.* Dyadic Green's functions for a coaxial line. *IEEE Trans. of Antennas and Propagation*. 1983. Vol.48, No.2, P. 355-358.
4. *Slipchenko N. I., Borodkina A.N., Panchenko A.Ju.* Osobennosti analiticheskoy modeli chetvert'volnovogo rezonatornogo SVCh sensora dlja kontrolja serdechno-sosudistykh patologij // *Materialy Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii"*, (KryMiKo'2014), Sevastopol', 8-13 sentjabrja 2014 g. T.2. S. 1051-1052.
5. *Slipchenko N. I., Borodkina A.N., Panchenko A.Ju.* Sovershenstvovanie analiticheskoy modeli chetvert' volnovogo rezonatornogo sensora dlja diagnostiki serdechno sosudistykh patologij // *Radiotekhnika: Vseukrainskij mezhvedomstvennyj nauchno-tehnicheskij sbornik*. 2014. Vyp.177. S.185-191.
6. *Liu Chang, Panchenko A. Ju., Slipchenko N. I., Zajchenko O. B.* Koaksial'nyj sensor otkrytogo tipa. Integral'noe uravnenie jelektricheskogo polja v ploskosti apertury // *Vestnik NTU KPI. Serija Radiotekhnika. Radioapparatostroenie*. 2017. Vyp.69. S.11-16.
7. *Ch. Lu, Panchenko A.Yu., Slipchenko Mykola I.* An integral equation for the field distribution within the aperture plane of the coaxial sensor // *Telecommunications and Radio Engineering* Том 75, 2016 I.7 P.587-594. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i7.20
8. *Panchenko A.Yu.* Modeling a small aperture resonator type microwave meter of substance parameters // *Telecommunications and Radio Engineering*. 1998. V.52 No.8. P. 118-121.
9. *Panchenko A.Yu., Slipchenko N.I., Borodkina A.N.* On the development of a practical technique of theoretical calibration of resonant sensors for near-field microwave diagnostics // *Telecommunication and Radio Engineering*. 2014. V.73, №15. P. 1397-1407.
10. *Slipchenko N.I., Borodkina A.N., Panchenko A.Ju.* Povyshenie tochnosti teoreticheskoy kalibrovki i informativnosti chetvert'volnovykh rezonatornykh datchikov dlja SVCh diagnostiki // *Radiojelektronika i informatika*. 2014. №2. S. 8-14.
11. *Panchenko A.Yu., Slipchenko N.I., Borodkina A.N.* Improvement of the analytical model of a quarter-wave resonator sensor for cardiovascular scanning // *Telecommunication and Radio Engineering*. 2015. V.74, №4. P. 345-354.
12. *Liu Chang, Panchenko A. Ju., Slipchenko N. I., Zajchenko O. B.* Blizhnepolevoj koaksial'nyj sensor otkrytogo tipa. Ocenka prostranstvennoj razreshajushhej sposobnosti izmeritel'noj apertury // *Vestnik NTU KPI*.

Serija Radiotehnika. Radioapparatostroenie. 2017. Vyp.71. S.17-24.

13. Liu Chang, Slipchenko N. I., Bondarenko I.N., Panchenko A.Ju. SVCh sensor bystryh transformacij svojstv biologicheskikh zhidkостей // Radiojelektronika i informatika. 2018. №2. S. 5-10.

14. Bondarenko I.N., Mamedova N.A., Panchenko A.Ju., Svetlichnaja I.N. Ocenka osevoj razreshajushhej sposobnosti SVCh sensora dlja issledovaniy biologicheskikh ob"ektov // Radiojelektronika i informatika. 2018. №4. S. 6-11.

Поступила в редколлегию 22.02.2019

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Дорошенко В.А.
Слипченко Николай Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф. Института сцинтилляционных материалов НАН Украины. Научные интересы: микроволновая микроскопия, микро- и оптоэлектроника, СВЧ-гигрометрия, приборостроение. Адрес: Украина, 61000, Харьков, пр. Науки, 60.

Бородкина Анна Николаевна, доцент Харьковского национального медицинского университета. Научные интересы: биофизика, радиофизика, СВЧ методы измерений, неразрушающий контроль. Адрес: Украина, 61022, Харьков, пр. Науки, 4.

Ибраимов Ильвер Казимович, аспирант кафедры проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХНУРЭ. Научные интересы: электродинамика, волновые процессы, акустика. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14 тел. 7021494.

Панченко Александр Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХНУРЭ. Научные интересы: электродинамика, волновые процессы, акустика. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. 7021494.

Slipchenko Nikolay Ivanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute for Scintillation Materials NAS of Ukraine. Scientific interests: electrodynamics. Address: 60, Nauky Ave., Kharkiv, 61000, Ukraine

Borodkina Anna Nikolaevna, PhD, professor Kharkiv National Medical University. Scientific interests: electrodynamics. Address: 4, Nauky Ave., Kharkiv, 61022, Ukraine.

Ibraimov Ilver Kazimovich post graduate student of the Department of Design and Operation of Electronic Devices of the Kharkov National University of Radio Electronics. Scientific interests: electrodynamics, atmospheric acoustics. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021494, e-mail: il-ver.ibraimov@nure.ua

Alexander Panchenko, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Operation of Electronic Devices of the Kharkov National University of Radio Electronics. Scientific interests: electrodynamics, atmospheric acoustics. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021494, e-mail: oleksandr.panchenko@nure.ua