

Коаксиальный сенсор открытого типа. Интегральное уравнение электрического поля в плоскости апертуры

Лю Чан¹, Панченко А. Ю.², Слипченко Н.И.², Зайченко О. Б.²

¹Хэйлунзянский Бауи аграрный университет, КНР

²Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

E-mail: olha.zaychenko@nure.ua

В работе показана методика получения интегрального уравнения поля в плоскости апертуры сенсора, которое позволяет строго решить задачу определения параметров сенсора, или при использовании приближения заданного поля вычислить их с высокой степенью точности. Это является основой дальнейшего анализа параметров сенсоров на качественном уровне, а также их практического расчета. Показаны критерии использования приближения и возможности нормировки задачи.

Ключевые слова: функции Бесселя; граничные условия; собственные функции; функция Грина

Введение

Для приборов оперативного контроля параметров материалов в СВЧ диапазоне в качестве сенсора весьма привлекательным является открытый конец коаксиальной линии (рис. 1).

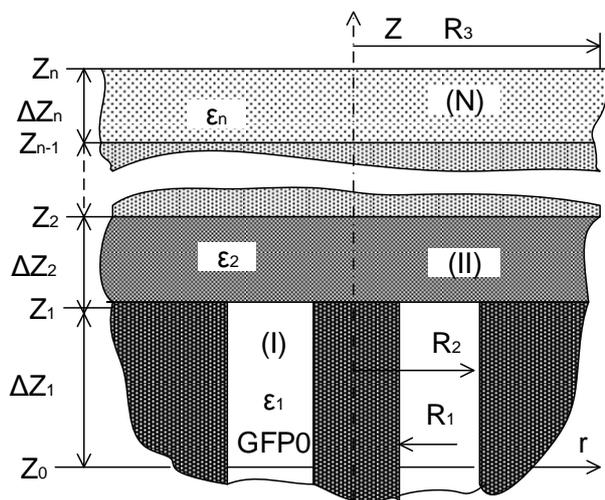


Рис. 1. Геометрическая схема измерений с помощью ОКС: R_1 – внутренний радиус коаксиальной линии; R_2 – внешний

Он отличается простотой, технологичностью, возможностью работать в широком диапазоне частот, высокой локальностью поля, простой подготовкой образцов к измерениям. Несложно осуществить изменения конструкции открытого коаксиального сенсора (ОКС), которые открывают возможности

варьирования измеряемых образцов и областей применения.

Для реализации достоинств ОКС требуется строгая оценка его метрологических свойств. Для этого требуется максимально точный расчет распределения электромагнитного поля. Современное ПО дает возможность его точного расчета. Но для определения взаимосвязей и понимания его свойств необходимо развивать аналитические методы.

Первоначально рассматривались вопросы излучения апертуры, и при описании дальнего поля ограничивались сферическими функциями нулевого порядка [1, 2]. В случае ближнего поля сначала использовалось статическое приближение [3]. В дальнейшем, при электродинамическом подходе использовалось приближение заданного поля (ПЗП), которое задают в плоскости апертуры (Given Field Plane – GFP на рис.1 при $\Delta z_1 = 0$) для ТЕМ волны: $E_r \approx r^{-1}$, $E_z = E_\varphi = 0$ [4–6]. Но, как показано еще в [7], поле в апертуре будет значительно отличаться от поля ТЕМ волны. Для учета влияния высших гармоник в работе [8], в отличие от традиционных известных подходов, GFP расположено в глубине коаксиала, но решение получено не аналитическим, а численным методом. Анализ метрологических свойств ОКС зачастую подразумевал работу в лабораторных условиях [9–11], в том числе с использованием спаренных ОКС [10, 11]. Иногда численный расчет сопровождался экспериментом [12–15], что указывает на прикладную цель таких работ. Кроме коаксиальных рассматривались и иные виды апертур [16, 17]. Так же нужно отметить, что в настоящее время в ряде работ как для

задач дальнего, так и ближнего поля ОКС рассмотрены весьма специфические аспекты [1, 19, 20]. В частности, влияние излучения ОКС при измерениях слоистых объектов рассматривались в работе [21].

В качестве наиболее полных примеров описания ближнего поля ОКС можно привести различные подходы решения вопросов измерения параметров слоистых образцов [8, 22]. В работе [23] задача описания ближнего поля сформулирована в наиболее строгой постановке и представлен общий путь ее решения для поля в апертуре ОКС. Данная работа посвящена дальнейшему уточнению пути решения и анализу факторов, которые без потери точности позволят упростить расчет и обобщить результаты.

1 Особенности конструкций ОКС и постановка задачи

Наиболее универсальным ОКС можно считать выход коаксиальной линии в плоском экране (рис. 1). Для представления исходных соотношений в данной работе будем считать образец однослойным, однородным и бесконечным ($R_3 \rightarrow \infty$ и $\Delta z_2 \rightarrow \infty$). Наиболее перспективны ОКС с малыми апертурами ($2R_2 \ll \lambda/2$). Они могут работать в очень широком диапазоне частот, что на практике может быть использовано для увеличения количества получаемой информации. Поэтому основным режимом является режим ближнего поля, коаксиальная линия будет запредельной для высших типов волн, и это позволит дальнейший анализ ограничить случаем ее возбуждения на TEM моде. Открытая апертура может быть использована в измерителях волноводного и резонаторного типа. Резонаторные измерители предпочтительнее, так как они имеют более высокую чувствительность, а при использовании четвертьволнового резонатора появляется возможность создания измерителя, работающего в широком диапазоне частот [24]. В этом случае с достаточной точностью можно разделить процедуру расчета на расчет емкости со стороны открытого конца и индуктивности закороченной части. Сохранению метрологической ценности результата способствует то, что достаточно определить отклик резонаторного преобразователя на введение измеряемого объекта. Это позволяет ограничиться получением выражений для комплексной емкости апертуры \dot{C}_a , и далее для изменений $\Delta \dot{C}_a$ при измерениях. Представленная ранее методика расчета ОКС требует определения полей в областях (I) и (II) (рис. 1) [4, 7, 21, 22, 24]. Учитывая ограниченный объем статьи, на данном этапе представим методику определения $E_r(z_1, r)$, которая является основой для расчета \dot{C}_a и $\Delta \dot{C}_a$. При ряде эвристических предположений эта методика показана в [25].

2 Основные соотношения

Связь между радиальной компонентой электрического поля и магнитным полем выражается через собственные радиальные функции области — $\chi_\infty(r)$ и функцию источника в осевом направлении — $g(z, z')$ [26]:

$$H_\phi(z, r) = -j\omega\epsilon_0\dot{\epsilon}_2 \int_{z'_1}^{z'_2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\frac{\partial}{\partial r}(\chi_\infty(r)) \frac{\partial}{\partial r'}(\chi_\infty(r'))}{\eta_\infty k_\infty^2} \cdot g(z, z') E_r(z', r') r' dk dr' d\phi' dz',$$

где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная; $\dot{\epsilon}_2$ — комплексное значение относительной диэлектрической проницаемости открытой области (II на рис. 1), $\dot{\epsilon}_2 = \epsilon'_2(1 - jtg\delta_2)$; ω — круговая частота; k_∞ — собственные числа, при $R_3 \rightarrow \infty$: $k_\infty = \kappa$; $\kappa = 0 \dots \infty$; η_∞ — квадрат нормы: $\eta_\infty = 2\pi/\kappa$. В открытой по радиусу области собственные функции определяются как: $\chi_\infty(r) = J_0(\kappa r)$, где $J_0(\kappa r)$ — функции Бесселя нулевого порядка. Продольная компонента функции Грина $g(z, z')$ в этом выражении равна

$$g(z, z') = 1/\gamma_{i,\infty} sh \gamma_{i,\infty} \Delta z_i \cdot \begin{cases} ch \gamma_{i,\infty} z ch \gamma_{i,\infty} (\Delta z_i - z') & z < z' \\ ch \gamma_{i,\infty} z' ch \gamma_{i,\infty} (\Delta z_i - z) & z > z', \end{cases} \quad (1)$$

где $\gamma_{i,\infty} = \sqrt{\kappa^2 - \dot{\epsilon}_i k_0^2}$ — постоянная распространения в области; k_0 — постоянная распространения в вакууме. Для сокращения записи здесь и далее будут удаляться все незначимые индексы, а для обозначения гиперболических функций выбраны наиболее краткие записи (ch — для косинуса гиперболического, sh — для синуса, sch — для секанса, csh — для косеканса, cth — для котангенса).

В коаксиальной области (I на рис. 1) собственные числа k_n^c имеют дискретные значения при $n = 0, 1, 2 \dots \infty$, и при $n = 1, 2 \dots \infty$ представляют собой n -е корни уравнения

$$Y_0(k_n^c R_2) \cdot J_0(k_n^c R_1) - Y_0(k_n^c R_1) \cdot J_0(k_n^c R_2) = 0, \quad (2)$$

где Y_0 — функция Неймана нулевого порядка.

Магнитное поле в (I) выразится через радиальные компоненты электрического поля на ее нижней ($E_r(z_0, r)$) и верхней ($E_r(z_1, r)$) границах следую-

щим образом [26, 27]:

$$H_\phi(z, r) = -j\omega\varepsilon_0\dot{\varepsilon}_1 \int_{R_1}^{R_2} \sum_n \frac{2\pi}{\eta_n^c(k_n^c)^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r'} (\chi_n^c(r)) (\chi_n^c(r')) \frac{r'}{\gamma_n^c \text{sh} \gamma_n^c \Delta z_1} \cdot \left[E_r(z_0, r') \text{ch}(\gamma_n^c(\Delta z_1 - z)) - E_r(z_1, r') \text{ch}(\gamma_n^c z) \right] dr', \quad (3)$$

где

$$\chi_n^c(r) = Y_0(k_n^c R_1) \cdot J_0(k_n^c r) - Y_0(k_n^c r) \cdot J_0(k_n^c R_1),$$

$$\eta_n^c = \frac{2\pi}{\nu_0} \left[0,5 \cdot R_2^2 \cdot \left[Y_0(k_n^c R_1) \cdot J_1(k_n^c R_2) - Y_1(k_n^c R_2) \cdot J_0(k_n^c R_1) \right]^2 - 0,5 \cdot R_1^2 \cdot \left[Y_0(k_n^c R_1) \cdot J_1(k_n^c R_1) - Y_1(k_n^c R_1) \cdot J_0(k_n^c R_1) \right]^2 \right],$$

$$\gamma_n^c = \sqrt{(k_n^c)^2 - \dot{\varepsilon}_1 k_0^2},$$

где ν_0 – коэффициент ряда Фурье азимутальных компонент, при $m = 0$ $\nu_m = 1$ и при $m > 1$ $\nu_m = 2$; при $n = 0$: $\chi_0^c(r) = \ln(k_0 r)$, $\gamma_0^c = \sqrt{-\dot{\varepsilon}_1 k_0^2}$, $\eta_0^c = \frac{2\pi}{\nu_0} \ln(R_2/R_1)$.

3 Интегральное уравнение источника

Основываясь на методе частичных областей и используя граничные условия для магнитной компоненты, можно приравнять $H_\phi(z, r)$ над и под границей $z = z_1$. Опуская громоздкие преобразования, на основании выражений для $H_\phi(z, r)$, записанных для плоскостей $H_\phi(z_1 + 0, r)$ и $H_\phi(z_1 - 0, r)$, получим интегральное выражение для распределения радиальной компоненты электрического поля в сечении ОКС – $E_r(z_1, r)$:

$$\int_{R_1}^{R_2} E_r(z_1, r') \left[\dot{\varepsilon}_2 \dot{S}_3(r, r') + \dot{\varepsilon}_1 \dot{S}_2(r, r') \right] r' dr' = \dot{\varepsilon}_1 \int_{R_1}^{R_2} E_r(z_0, r') \dot{S}_1(r, r') r' dr', \quad (4)$$

где

$$\dot{S}_1(r, r') = 2\pi \sum_n \frac{\text{csh}(\gamma_n^c \Delta z_1)}{\eta_n^c(k_n^c)^2 \gamma_n^c} \frac{\partial}{\partial r} (\chi_n^c(r)) \frac{\partial}{\partial r'} (\chi_n^c(r')),$$

$$\dot{S}_2(r, r') = 2\pi \sum_n \frac{\text{cth}(\gamma_n^c \Delta z_1)}{\eta_n^c(k_n^c)^2 \gamma_n^c} \frac{\partial}{\partial r} (\chi_n^c(r)) \frac{\partial}{\partial r'} (\chi_n^c(r')),$$

$$\dot{S}_3(r, r') = \int_0^\infty J_1(\kappa r) J_1(\kappa r') \frac{\kappa}{\gamma_2(\kappa)} d\kappa.$$

При использовании этого выражения степень приближения конечных результатов будет определяться только точностью эвристического выбора распределения $E_r(z_0, r')$. Для получения точного решения необходимо продолжить процедуру «сшивания» полей на границах изменения сечений резонатора ниже плоскости заданного поля вплоть до закорачивающей стенки индуктивной части. В простейшем случае можно считать, что ниже z_0 будет расположена индуктивная часть длиной Δz_L , у которой сечение и заполнение будет такое же, как и на участке Δz_L (рис. 1), и которая заканчивается плоской проводящей стенкой. Записывая магнитное поле над и под сечением $z = z_0$: $H_\phi(z_0 + 0, r)$ и $H_\phi(z_0 - 0, r)$, и приравнявая эти выражения, получим строгое уравнение для $E_r(z_1, r')$:

$$\int_{R_1}^{R_2} E_r(z_1, r') \left[\dot{\varepsilon}_2 \dot{S}_3(r, r') + \dot{\varepsilon}_1 \dot{S}_2(r, r') - \dot{\varepsilon}_1 \dot{S}_4(r, r') \right] r' dr' = 0, \quad (5)$$

где

$$\dot{S}_4 = 2\pi \cdot \sum_n \frac{\text{csh}^2(\gamma_n^c \Delta z_1)}{\eta_n^c(k_n^c)^2 \gamma_n^c [\text{cth}(\gamma_n^c \Delta z_1) + \text{cth}(\gamma_n^c \Delta z_L)]} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\chi_n^c(r)) \frac{\partial}{\partial r'} (\chi_n^c(r')), \quad (6)$$

Нетривиальное решение даст распределение $E_r(z_1, r')$ для заданной частоты ω .

4 Упрощение задачи и нормировка решения

При расчете реальных резонаторных измерителей практический интерес представляет сдвиг резонансной частоты и изменение добротности при внесении образца, которые связаны с $\Delta \dot{C}_a$. Для расчета при $R_2 \ll \lambda$, в широком диапазоне частот можно ограничиться использованием ПЗП и, соответственно, выражением (??)(2). Исходное распределение – $E_r(z_0, r)$ в GFP, можно задать в виде: $E_r(z_0, r) = U_0 r^{-1}$, где U_0 – произвольное напряжение (рис.1). В отличие от использовавшегося ранее варианта ПЗП с расположением GFP в плоскости апертуры, в данном случае можно расположить GFP в глубине коаксиальной линии. При $R_2 \ll \lambda$ затухание высших гармоник поля будет достаточно сильным и можно будет подобрать

Δz_1 таким, чтобы обеспечить заданную точность расчета.

В подобных задачах часто нормируют все размеры к длине волны в свободном пространстве λ_0 . В данном случае можно нормировать к длине волны в диэлектрике на выходе коаксиальной линии. Но при распространении решения на всю область резонатора, включая области ввода/вывода энергии, поршень и прочие, это создаст неудобства.

Нормировка размеров к длине волны в свободном пространстве потребует ввести множитель λ_0 в выражениях $H_\phi(z, r)$. Нормированная постоянная распространения в свободном пространстве будет равна $k_0 = 2\pi$, а значения корней уравнения (2)(1) примут универсальный характер. Асимптотическое поведение корней позволит существенно упростить процедуру оценки точности при использовании данного варианта ПЗП. Функции Бесселя стремятся к своим асимптотам при $R_1/R_2 \rightarrow 1$ и $\Delta R \rightarrow 0$. Поэтому асимптоты для k_n^c имеют вид: $\tilde{k}_n^c \rightarrow n\pi/\Delta R$. На рис. 2 для $n = 1...3$ показаны зависимости отношений $\Delta k_n^c = k_n^c/\tilde{k}_n^c$ от R_1/R_2 . Для произвольных n при $R_1/R_2 > 0,1$ форма этих зависимостей меняется слабо, изменяется только их масштаб.

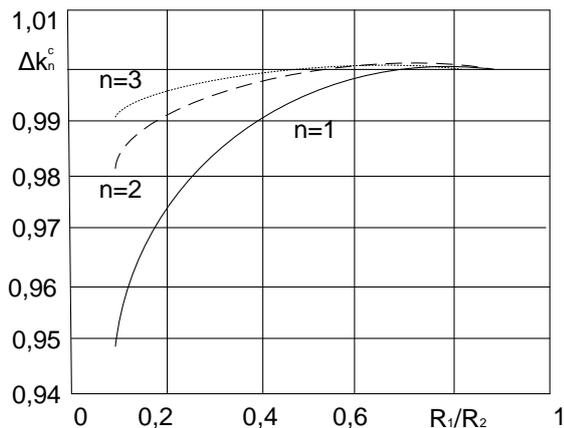


Рис. 2. Асимптотическое приближение корней собственных функций коаксиальной линии

Выводы

Представленное решение задачи определения поля в апертуре является основой для определения функции преобразования ОКС, а разработанную методику можно распространить для решения широкого класса осесимметричных СВЧ устройств. Аналитическое описание позволяет на этапе выбора конструкции измерителя оценить вклад физических факторов, обосновать поведение результирующих характеристик, построить систему критериев оценки качества, обосновать и оптимизировать геометрические схемы сенсоров, упростить последующие этапы, включая макетирование и эксперимент.

Благодарности

Данная работа выполнена благодаря поддержке со стороны проектов No. XDB2014-18 и No. NDJY15Z13 Хэйлунцзянского Бауи аграрного университета (КНР).

Перечень ссылок

1. Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике / Р. Митра. – М.: Издательство Мир, . –1977. –485с.
2. Van Bladel J. G. Electromagnetic fields. – John Wiley Sons. – 2007. – Vol. 19. – 1149 p.
3. Детинко М. В. Электродинамическая модель СВЧ-резонатора с кольцевым измерительным отверстием, нагруженного на многослойную полупроводниковую структуру / М. В. Детинко, С. А. Хоптяр // Известия вузов. Физика. – 1993. – №9. – С. 53–58.
4. Гордиенко Ю. Е. Приближение заданного поля в задачах определения характеристик резонаторных СВЧ - датчиков апертурного типа / Ю. Е. Гордиенко, А. Ю. Панченко, Р. С. Фар // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 1998. – Вып. 107. – С. 93–103.
5. Hyde M. W. Nondestructive characterization of PEC-backed materials using the combined measurements of a rectangular waveguide and coaxial probe / M. W. Hyde, A.E. Bogle, M. J. Havrilla // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. – 2014. – Vol. 24, No. 11. – pp. 808–810.
6. Hyde M. W. Nondestructive electromagnetic material characterization using a dual waveguide probe: A full wave solution / M. W. Hyde, J. W. Stewart, M. J. Havrilla, W. P. Baker, E. J. Rothwell, D. P. Nyquist // Radio Science. –2009. –Vol. 44, No. 3. – pp.1–13.
7. Panchenko A.Yu. Modeling a small aperture resonator type microwave meter of substance parameters / A. Yu. Panchenko // Telecommunications and Radio Engineering. –1998. – No.52 (8). – pp. 118–121.
8. Huang R. Analysis of open-ended coaxial probes by using a two-dimensional finite-difference frequency-domain method / R.Huang, D. Zhang // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2008. –Vol. 57, No. 5. – pp. 931–939.
9. Иванов В. К., Силин А. О., Стадник А. М. Определение комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей коаксиальными зондами с использованием подложек из метаматериала / В. К. Иванов, А. О. Силин, А. М. Стадник // Вісник Харківського національного університету ім. Каразіна. Серія Радіофізика та електроніка. – 2011. –Т. 2(16), №1. – С. 91-98.
10. Hosseini M. H. Wideband Nondestructive Measurement of Complex Permittivity and Permeability Using Coupled Coaxial Probes / M. H. Hosseini, H. Heidar, M. H. Shams // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2017. – Vol. 66, No.1, pp. 148–157.
11. Hyde M. W. Nondestructive Determination of the Permittivity Tensor of a Uniaxial Material Using a Two-Port Clamped Coaxial Probe / M. W. Hyde, M. J. Havrilla, A. E. Bogle // IEEE Trans. Microwave Theory and Technique. –2016. – Vol.64, No.1. – pp. 239–246.
12. Cenovic A. Measurement setup for non-destructive complex permittivity determination of solid materials using two coupled coaxial probes / A. Cenovic, M. Schramm, L. Schmidt // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. –2011. –pp. 1–4.

13. Yee L. K. (2015) Modelling of microwave elliptical and conical tip sensors for in vivo dielectric measurements / L. K. Yee, N. W. Hau, C. B. Kuan, P. Y. Nan, L. H. Sheng, L. E. Hock // *IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)*. – 2015. – pp. 222–226.
14. Abdelgwad A. H. Measured Dielectric permittivity of chlorinated drinking water in the microwave frequency range / A. H. Abdelgwad, T. M. Said // *IEEE 15 Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*. – 2014. – pp. 1–4.
15. Wagner N. Numerical 3-D FEM and experimental analysis of the open-ended coaxial line technique for microwave dielectric spectroscopy on soil / N. Wagner, M. Schwing, A. Scheuermann // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 52, No. 2. – pp. 880–893.
16. Hyde M. W. Broadband, nondestructive microwave sensor for characterizing magnetic sheet materials / M. W. Hyde, M. J. Havrilla // *IEEE Sensors J.* – 2016. – Vol. 16, No. 12. – pp. 4740–4748.
17. Kempin M. Modified waveguide flange for evaluation of stratified composites / M. Kempin, M. Ghasr, J. Case, R. Zoughi // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 2014. – Vol. 63, No. 6. – pp. 1524–1534.
18. Думин А. Н. Дифракция нестационарной ТЕМ-волны на открытом конце коаксиального волновода / А. Н. Думин, В. А. Катрич, Н. Н. Колчигин, С. Н. Пивненко, О. А. Третьяков // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2000. – Т. 5, № 1. – С. 55–67.
19. Boybay M. S. Open-ended coaxial line probes with negative permittivity materials / M. S. Boybay, O. M. Ramahi // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2011. – Vol. 59, No. 5. – pp. 1765–1769.
20. Maftooli H. Output signal prediction of an open-ended coaxial probe when scanning arbitrary-shape surface cracks in metals / H. Maftooli, H. R. Karami, S. H. H. Sadeghi, R. Moini // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 2012. – Vol. 61, No. 9. – pp. 2384–2391.
21. Wen Mingming. Evaluation of influence of microwave radiation sensor in the form of an open end of the coaxial line on its metrological characteristics / Mingming Wen, Ch. Liu, A. Yu. Panchenko, N. I. Slipchenko // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2015. – No. 74(15). – pp. 1355–1366.
22. Гордиенко Ю. Е. Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур. *Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник*. – 1996. – Вып. 100. – С. 253–260.
23. Lu Ch. An integral equation for the field distribution within the aperture plane of the coaxial sensor / Ch. Lu, A. Yu. Panchenko, M. I. Slipchenko // *Telecommunications and Radio Engineering* – 2016. – No. 75(7). – pp. 587–594.
24. Гордиенко Ю. Е. Вычисление комплексных частот СВЧ резонаторных датчиков апертурного типа / Ю. Е. Гордиенко, А. А. Рябухин // *Радиоэлектроника и информатика*. – 2001. – № 2. – С. 4–7.
25. Panchenko A. Yu. On the development of a practical technique of theoretical calibration of resonant sensors for near-field microwave diagnostics / A. Yu. Panchenko, N. I. Slipchenko, A. N. Borodkina // *Telecommunication and Radio Engineering*. – 2014. – No. 73(15). – pp. 1397–1407.
26. Панченко Б. А. Тензорные функции Грина уравнений Максвелла для цилиндрических областей / Б. А. Панченко // *Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник*. – 1970. – Вып. 15 – С. 82–91.
27. Tai C. T. Dyadic Green's functions for a coaxial line / C. T. Tai // *IEEE Trans. of Antennas and Propagation*. – 1983. – Vol. 48, No. 2. – pp. 355–358.

References

- [1] Mittra R. (1973) *Computer Techniques for Electromagnetics*, Pergamon Press, 416 p.
- [2] Van Bladel J. G. (2007) *Electromagnetic fields*, John Wiley Sons., Vol. 19, 1149 p.
- [3] Detinko M. B. and Hoptyar C. A. (1993) Elektrodinamičeskaya model SVCH-rezonatora s koltsevim izmeritelnyim otverstiem, nagruženno na mnogosloynnyu poluprovodnikovuyu strukturu [Electrodynamic model of microwave cavity with a circular orifice, which is loaded on the multilayer semiconductor structure], *Izvestiya vuzov. Fizika*, No. 9, pp. 53–58.
- [4] Gordienko Yu. E., Panchenko A. Yu. and Far R. S. (1998) Približenie zadannogo polya v zadachah opredeleniya harakteristik rezonatornyh SVCH- datchikov aperturnogo tipa [Approximation of a preset field in the problems of determining the characteristics of the resonator of the microwave sensors aperture type], *Radiotekhnika: Vseukrainskiy mezhvedomstvennyy nauchno-tehnicheskiiy sbornik*, Vol. 107, pp. 93–103.
- [5] Hyde M. W. and Bogle A. E. (2014) Nondestructive characterization of PEC-backed materials using the combined measurements of a rectangular waveguide and coaxial probe. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, Vol. 24, No. 11, pp. 808–810. DOI: 10.1109/LMWC.2014.2348496
- [6] Hyde M. W. and Stewart (2009) Nondestructive electromagnetic material characterization using a dual waveguide probe: A full wave solution, *Radio Science*, Vol., Issue 3. pp. 1–13. DOI: 10.1029/2008RS003937
- [7] Panchenko A. Yu. (1998) Modeling a small aperture resonator type microwave meter of substance parameters, *Telecommunications and Radio Engineering*, No. 52 (8), pp. 118–121.
- [8] Huang R. and Zhang D. (2008) Analysis of open-ended coaxial probes by using a two-dimensional finite-difference frequency-domain method. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 57, Iss. 5 pp. 931–939. DOI: 10.1109/TIM.2007.913830
- [9] Ivanov V. K., Silin A. O. and Stadnik A. M. (2011) Opredelenie kompleksnoy dielektricheskoy pronitsaemosti jidkostey koaksialnyimi zondami s ispolzovaniem podlojek iz metamateriala [Determination of complex permittivity of liquids coaxial probes using metamaterial substrates from], *Visnik Harkivskogo natsionalnogo universitetu im. Karazina. Seriya Radiofizika ta elektronika*, Vol. 2(16), No. 1, pp. 91–98.
- [10] Hosseini M. H. and Heidar H. (2017) Wideband Nondestructive Measurement of Complex Permittivity and Permeability Using Coupled Coaxial Probes, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 66, No. 1, pp. 148–157. DOI: 10.1109/TIM.2016.2619958
- [11] Hyde M. W. and Havrilla M. J. (2016) Nondestructive Determination of the Permittivity Tensor of a Uniaxial Material Using a Two-Port Clamped Coaxial Probe *IEEE Trans. Microwave Theory and Technique*, Vol. 64, No. 1, pp. 239–246. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2502242

- [12] Cenanic A. and Schramm M. (2011) Measurement setup for non-destructive complex permittivity determination of solid materials using two coupled coaxial probes, *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2011.5972838
- [13] Yee L. K. and Hau N. W. (2015) Modelling of microwave elliptical and conical tip sensors for in vivo dielectric measurements, *IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)*, pp. 222–226. DOI: 10.1109/RFM.2015.7587749
- [14] Abdelgwad A. H. and Said T. M. (2014) Measured Dielectric permittivity of chlorinated drinking water in the microwave frequency range, *IEEE 15 Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MMS.2015.7375497
- [15] Wagner N. (2014) Numerical 3-D FEM and experimental analysis of the open-ended coaxial line technique for microwave dielectric spectroscopy on soil, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 2, pp. 880–893. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2245138
- [16] Hyde. M. W. and Havrilla M. J. (2016) Broadband, nondestructive microwave sensor for characterizing magnetic sheet materials, *IEEE Sensors J.*, Vol. 16, No. 12, pp. 4740–4748. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2548560
- [17] Kempin M. and Ghasr M. (2014) Modified waveguide flange for evaluation of stratified composites, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 63, No. 6, pp. 1524–1534. DOI: 10.1109/TIM.2013.2291952
- [18] Dumin A. N., Katrich V. A., Kolchigin N. N., Pivnenko S. N. and Tretyakov O. A. (2000) Difraktsiya nestatsionarnoy TEM-volny na otkrytom kontse koaksialnogo volnovoda [Nonstationary diffraction of THE wave at the open end of the coaxial waveguide], *«Radiofizika i radioastronomiya*, Vol. 5, No.1, pp. 55–67.
- [19] Boybay M. S. and Ramahi O. M. (2011) Open-ended coaxial line probes with negative permittivity materials, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 59, No. 5, pp. 1765–1769. DOI: 10.1109/TAP.2011.2123056
- [20] (2012) Maftooli H. Output signal prediction of an open-ended coaxial probe when scanning arbitrary-shape surface cracks in metals, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 61, No. 9, pp. 2384–2391. DOI: 10.1109/TIM.2012.2199193
- [21] Wen Mingming and Liu Ch. (2015) 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*, No.74(15), pp. 1355–1366. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i15.40
- [22] Gordienko Yu. E. (1996) Rezonatornyie izmeritelnyie preobrazovateli v diagnostike mikroslolistyih struktur [The resonator transducers in the diagnosis microslot structures], *Radiotekhnika: Vseukrainskiy mezhvedomstvennyiy nauchno-tehnicheskiiy sbornik*, Vol. 100, pp. 253–260.
- [23] Lu Ch. and Panchenko A. Yu. (2015) An integral equation for the field distribution within the aperture plane of the coaxial sensor, *Telecommunications and Radio Engineering*, No.75(7), pp. 587–594. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i7.20
- [24] Gordienko Yu. E. and Ryabuhin A. A. (2001) Vyichislenie kompleksnyih chastot SVCH rezonatornyih datchikov aperturnogo tipa [The calculation of the complex frequency of the microwave resonator sensors aperture type, *Radioelektronika i informatika*. Iss. 2, pp. 4–7.
- [25] Panchenko A. Yu. (2014) On the development of a practical technique of theoretical calibration of resonant sensors for near-field microwave diagnostics, *Telecommunications and Radio Engineering*, No. 73(15), pp. 1397–1407. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.80
- [26] Panchenko B. A. (1970) Tenzornyye funktsii Grina uravneniy Maksvela dlya tsilindricheskikh oblastey [Tensor Green's functions of Maxwell's equations for cylindrical regions]. *Radiotekhnika: Vseukrainskiy mezhvedomstvennyiy nauchno-tehnicheskiiy sbornik*, Vol. 15, pp. 82–91.
- [27] Tai C. T. (1983) Dyadic Green's functions for a coaxial line, *IEEE Trans. of Antennas and Propagation*, Vol. 48, No. 2, pp. 355–358. DOI: 10.1109/TAP.1983.1143029

Коаксіальний сенсор відкритого типу. Інтегральне рівняння електричного поля в площині апертури

Лю Чан, Панченко О. Ю., Слипченко М. І., Зайченко О. Б.

В роботі показана методика отримання інтегрального рівняння поля в площині апертури сенсора, що дозволяє строго розв'язати задачу визначення параметрів сенсора, або при використанні наближення заданого поля обчислити їх з високим ступенем точності. Це є основою подальшого аналізу параметрів сенсорів на якісному рівні, а також їх практичного розрахунку. Показано критерії використання наближення і можливості норміровки задачі.

Ключові слова: функції Беселя; граничні умови; власні функції; функція Гріна

Open type coaxial sensor. Integral equation of the electric field in the aperture plane

Chang Liu, Panchenko A. Yu., Slipchenko N. I., Zaichenko O. B.

Introduction. The open end of a coaxial line has good prospects of usage as a sensor for devices of flexi monitoring of parameters of materials in the microwave range. Its exact mathematical description requires the definition of the field in any section.

Integral equation. A rigorous integral equation for the radial component of the electric field in the plane aperture is obtained. The technique of obtaining this equation is based on the method of partial areas and boundary conditions for magnetic components. The criteria of using the approximation of the given field and possibilities of the solution normalization are shown.

Conclusions. The obtained technique can be distributed to solving problems a wide class of axisymmetric microwave devices. It is the basis of further analysis of their parameters and practical calculation. Information on the normalization summarize the results and will be useful in the selecting designs of sensors.

Key words: Bessel functions; boundary conditions; eigenfunctions; Green's function