

**В.П. Манойлов, д.т.н., проф.,
Д.С. Морозов, ст. викл.,
Т.М. Нікітчук, к.т.н., доц.,
І.І. Полещук, ст. викл.**

Житомирський державний технологічний університет

Математична модель взаємодії ближнього поля коаксіального давача із шаруватим середовищем

Розглянуто конструкцію коаксіальних давачів для НВЧ-досліджень складу речовини. Розглянуті особливості використання НВЧ-давачів ближнього поля для дослідження складу речовини. Проаналізовано шляхи вдосконалення коаксіальних давачів для дослідження багатошарових діелектриків в медико-біологічних дослідженнях. Показано, що введення круглого диску дозволяє локалізувати електричне поле в площині паралельній апертурі давача. Запропоновано варіант математичної моделі взаємодії ближнього поля коаксіального давача із шаруватим середовищем. Проведено кількісний аналіз резонаторного давача з круглим диском з позиції досягнення підвищення чутливості визначення параметрів багатошарових діелектричних об'єктів. Результати розрахунків порівнюються з відповідними результатами лабораторних досліджень.

Ключові слова: коаксіальний резонатор; шаруватий діелектрик.

Вступ. Неруйнівний контроль і НВЧ радіометрія є актуальною задачею як в промисловості так і в медико-біологічних дослідженнях. Серед різноманітних методів неруйнівного контролю речовин важливе місце займають радіохвильові методи [1, 2, 3]. Складність останніх пояснюється багатошаровістю тканин і органів людського організму, що значно ускладнює процес розробки відповідних первинних перетворювачів і датчиків для їх проведення. Особливості поглинання високочастотного електромагнітного випромінювання певних діапазонів дозволяють ефективно використовувати контактні резонаторні давачі на основі НВЧ хвилеводів і резонаторів для визначення діелектричних параметрів тканин з високою точністю.

Постановка проблеми і аналіз останніх досліджень. Зміна параметрів об'єктів контролю впливає на проходження, відбиття, поглинання і розсіювання електромагнітних хвиль (ЕМХ). При цьому відбувається зміна їх амплітуди, частоти, фази і поляризації. По ступені зміни цих параметрів можна робити висновки про властивості і склад самого об'єкта дослідження, а також про відхилення його параметрів від нормованих значень. Зміна густини і структури об'єктів так само супроводжується зміною електромагнітних параметрів, що дозволяє судити про їх характеристики. Висока радіопрозорість діелектричних об'єктів і їх власне радіотеплове ЕМВ, що залежить від хімічного складу і фізичних властивостей (температури, вологості, густини, шаруватості та ін.) обумовлює можливість їх контролю за допомогою НВЧ радіометрії.

В НВЧ-радіометрії для діагностики різноманітних матеріалів, середовищ і об'єктів технічного призначення використовуються сенсори на основі резонаторних давачів (РД) [4, 5]. При контролі параметрів діелектриків і середовищ особливо ефективними є РД з коаксіальною вимірювальною апертурою [6, 7], які базуються на використанні резонаторів з відкритою вимірювальною стороною.

Актуальним в даний час є оптимізація РД по критерію чутливості для різноманітних середовищ, що контролюються [8, 9]. Рішення цієї задачі потребує створення математичної моделі РД з урахуванням всіх параметрів.

Для зменшення довжини коаксіального резонатора між центральним провідником і апертурою зазвичай залишають проміжок (рис.1), довжина якого значно менше довжини хвилі λ , що забезпечує підвищену концентрацію електричного поля і дозволяє збільшити взаємодію РД з об'єктом. Еквівалентна схема такого резонатора може бути представлена у вигляді короткозамкнутого з одного боку відрізка лінії довжиною h , другий кінець якої навантажений на зосереджену ємність C_0 . Резонанс даної системи можливий, якщо вхідний опір короткозамкнутого відрізка лінії носить індуктивний характер [10]. Коаксіальний відрізок лінії має індуктивний вхідний опір при $h \leq \lambda/4$. Тому загальна довжина такого резонатора не перевищує довжини хвилі λ . Більшості випадків моделювання РД з коаксіальною вимірювальною апертурою здійснюється в квазістатичному наближенні, результат якого співпадає з вимірними величинами [10, 11].

Як показано в роботі [12] гранична чутливість РД спостерігається, якщо внутрішній провідний навантажений на круглий диск (рис. 1). Коаксіальний резонатор працює на основній хвилі типу Т.

Область I відповідає основному об'єму коаксіального резонатора з радіусами a і b . Область II являє собою щілину товщиною h між відкритою частиною і об'єктом діагностики, що представлений областю III. Структура цієї області може бути різноманітна: від напівнескінченного об'єму до шаруватого середовища з різними параметрами середовища, обмеженої екраном або вільним простором. В коаксіальному резонаторі утворюється ємність, що ввімкнена між зовнішнім і внутрішнім провідниками РД.

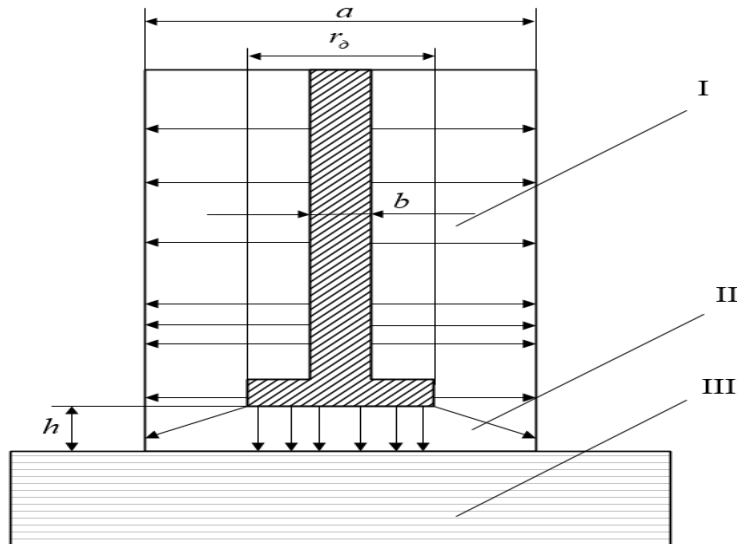


Рис.1. Коаксіальний резонаторний давач

Ціллю даної роботи є проведення кількісного аналізу РД з круглим диском з позиції досягнення підвищення чутливості визначення параметрів багатошарових діелектричних об'єктів.

Основна частина. Для визначення квазістатичного поля необхідно вирішити рівняння Лапласа для скалярного потенціалу ψ [13]:

$$\nabla \psi = 0; \quad (1)$$

яке в узагальненій ортогональній системі координат ξ, η, ζ має вигляд:

$$\frac{1}{h_\xi h_\eta h_\zeta} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{h_\eta h_\zeta}{h_\xi} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{h_\xi h_\zeta}{h_\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{h_\xi h_\eta}{h_\zeta} \frac{\partial \psi}{\partial \zeta} \right) \right\} = 0; \quad (2)$$

тут h_ξ, h_η, h_ζ – метричні коефіцієнти.

В рівнянні (2) координата ζ направлена вздовж ребра диска, тому вона може біти названа «поздовжньою» і визначена через кут φ ($\zeta = \varphi$) (рис.2). Координати ξ і η можуть бути названі «поперечними», вони лежать в площині $\varphi = const$. Вибір локальних координат ξ і η визначається профілем перерізу диска. Із конструктивних особливостей диска впливає, що його поле E_φ як і поле Т-хвилі коаксіалу має осьову симетрію, тобто і потенціал ψ не залежить від кута φ : $\frac{d\psi}{d\varphi} = 0$. Тому третій

доданок в рівнянні (2) дорівнює 0, що дозволяє звести задачу до площини, припускаючи координату ζ декартовою ($h_\zeta = 1$), при цьому диск і зовнішній циліндр трансформуються в ребро і площину, і утворюється лінія нескінченної довжини – ребро над площиною. Товщина ребра t , відстань між ребром і площиною $\delta = r_r - r_0$ (рис. 2).

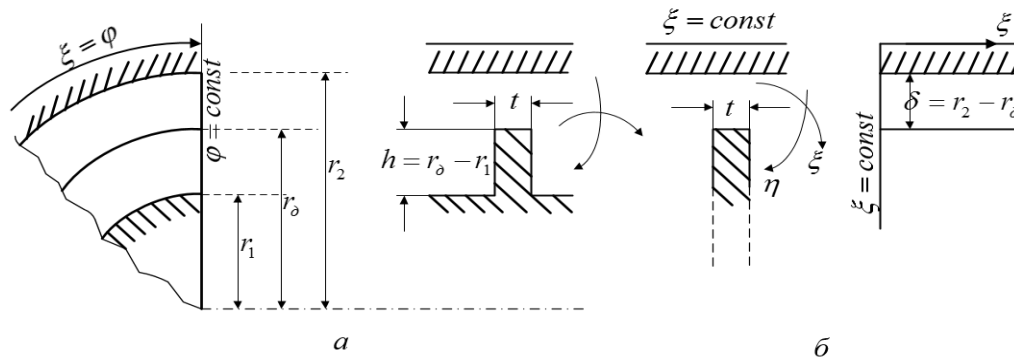


Рис. 2. Локальні координати профіля диска

Рівняння (2) з врахуванням останніх зауважень приймає вигляд:

$$\frac{1}{h_\eta h_\xi} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{h_\eta}{h_\xi} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{h_\xi}{h_\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \right) \right\} = 0; \quad (3)$$

Використання метода розділення змінних і підстановка потенціалу ψ як добуток двох функцій

$$\psi(\xi, \eta) = K(\xi)T(\eta); \quad (4)$$

дозволяє перетворити рівняння виду (3) до виду:

$$\left\{ \frac{1}{K(\xi)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{h_\eta}{h_\xi} \frac{\partial K(\xi)}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{T(\eta)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{h_\xi}{h_\eta} \frac{\partial T(\eta)}{\partial \eta} \right) \right\} = 0; \quad (5)$$

Для вирішення рівняння (5) методом розділення змінних необхідно замість реального профіля перерізу ребра над площиною вибрати його модель, в яку реальний профіль легко «вписується». Вибирається еліптична ортогональна система координат, що утворена еліпсами, що пересікаються із гіперболами. Математичні коефіцієнти в цій системі мають вигляд:

$$h_\xi = c \sqrt{\frac{\xi^2 - \eta^2}{\xi^2 - 1}}, \quad h_\eta = c \sqrt{\frac{\xi^2 - \eta^2}{1 - \eta^2}}; \quad (6)$$

де c – масштабний коефіцієнт.

Зв'язок між еліптичною системою координат ξ, η і декартовою x, y представляється формулами

$$x = c\xi\eta, \quad y = c\sqrt{(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)}; \quad (7)$$

З (7) можна отримати рівняння координатних поверхонь:

$$\xi = const, \quad \left(\frac{x}{c} \right)^2 \frac{1}{\xi^2} + \left(\frac{y}{c} \right)^2 \frac{1}{\xi^2 - 1} - 1; \quad (8)$$

$$\eta = const, \quad \left(\frac{x}{c} \right)^2 \frac{1}{\eta^2} + \left(\frac{y}{c} \right)^2 \frac{1}{1 - \eta^2} - 1; \quad (9)$$

Координатні поверхні (8) і (9) представляють собою сімейства еліпсів ($\xi = const$) і гіпербол ($\eta = const$) з фокусами в спільній точці з координатами $x = c, y = 0$ (рис. 3 а).

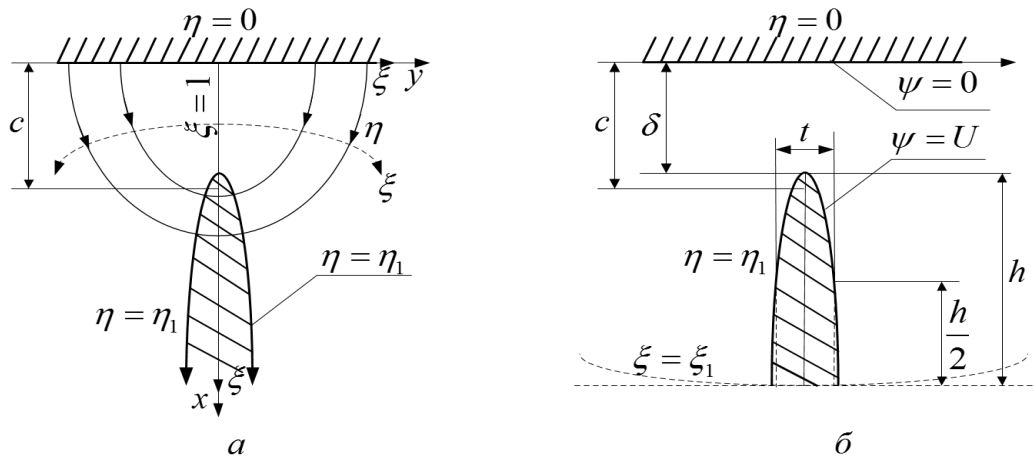


Рис. 3. Координатні поверхні для диска над площиною

При $\eta \rightarrow 0$ гіперболічна поверхня вироджується в площину ($x = 0$, $y = \xi$) і співпадає з металічною площиною. Реальний переріз ребра приблизно «вписується» в одну з гіпербол $\eta = \eta_1 = \text{const}$. Значення η_1 визначається в процесі апроксимації профіля перерізу диска (ребра) гіперболічною поверхнею (рис. 3 б).

Підстановка (6) в (5) призводить до рівняння:

$$\frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{K(\xi)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\sqrt{\xi^2 - 1} \frac{\partial K}{\partial \xi} \right) + \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T(\xi)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\sqrt{1 - \eta^2} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) = 0; \quad (10)$$

Далі використовується граничні умови для потенціалу на металічних поверхнях.

Еквівалент поверхні циліндра коаксіалу – плоска поверхня:

$$\eta = 0, \psi = 0; \quad (11)$$

Еквівалент поверхні диска – поверхня ребра:

$$\eta = \eta_1, \psi = U \quad (12)$$

де U – різниця потенціалів між поверхнею і ребром (рис. 3).

Як виходить з граничних умов (11) і (12) потенціал ψ на металічній поверхні не змінюються, тобто функція $K(\xi)$ є константою не тільки при $\eta = 0$ і $\eta = \eta_1$, але і при будь-яких η .

Тому перший доданок в рівнянні (10) є нулем, а потенціал ψ не залежить від координати ξ . В рівнянні (10) залишається тільки другий доданок і відповідно до (4) воно приймає вигляд

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\sqrt{1 - \eta^2} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \right) = 0; \quad (13)$$

Після інтегрування рівняння (13) знаходяться потенціал $\psi(\eta)$:

$$\psi(\eta) = C_1 \arcsin \eta + C_2; \quad (14)$$

Підстановка (14) в граничні умови (11) і (12) дозволяє знайти постійні C_1 і C_2 і отримати рівняння для потенціалу:

$$\psi(\eta) = \frac{U}{\arcsin \eta_1} \arcsin \eta; \quad (15)$$

Згідно формули для потенціалу (15) лінії $\eta = \text{const}$ (рівняння гіпербол (9)) є еквіпотенціальними лініями $\psi = \text{const}$ (рис. 4).

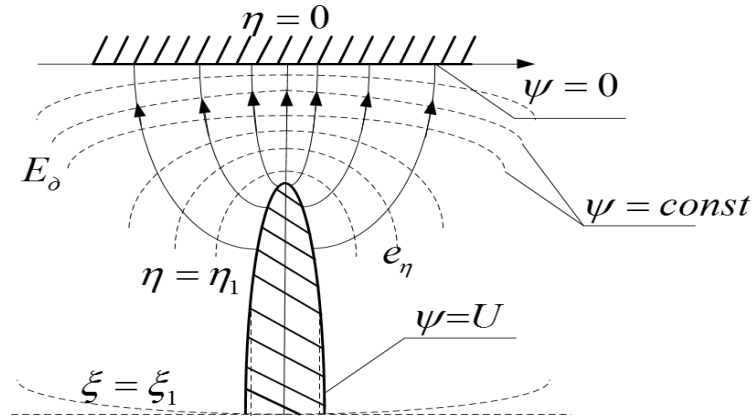


Рис. 4. Силові лінії диска

З формули для потенціалу (15) знаходиться власне електричне поле диска:

$$E_{\delta} = -\text{grad}\psi = \frac{\vec{e}_{\eta}}{h_{\eta}} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} = -\vec{e}_{\eta} \frac{U}{\arcsin \eta_1} \frac{1}{e\sqrt{\xi^2 - \eta^2}}; \quad (16)$$

Для визначення погонної ємності між ребром і площиною необхідно використати формулу, що пов'язує потік електричної індукції і різницю потенціалів між ними:

$$C_{\text{поч}} = 2 \frac{\int_{\xi}^{\xi_1} \varepsilon E_{\delta} \vec{e}_{\eta} h_{\xi} d\xi}{U}; \quad (17)$$

де ε – діелектрична проникність середовища; $\xi = \xi_1$ гіперболічна координата, що відповідає основі ребра (диска) (див. рис. 5).

$$\xi_1 = \frac{h + \delta}{c} = \frac{r_2 - \eta}{c}; \quad (17.1)$$

тут $h = r_{\delta} - h$ – висота ребра (диска); $\delta = r_2 - r_{\delta}$ – величина зазору між кромкою диска і навантаженою поверхнею коаксіалу.

Підстановка (16) і (6) в формулу (17) дає результат:

$$C_{\text{поч}} = \frac{2\varepsilon}{\arcsin \eta} \int_1^{\xi_1} \frac{d\xi}{\sqrt{\xi^2 - 1}} = \frac{2\varepsilon}{\arcsin \eta} \ln(\xi_1 + \sqrt{\xi_1^2 - 1}); \quad (18)$$

Повна ємність диска відносно циліндра зовнішнього провідника коаксіалу визначається як добуток ємності (18) на довжину кола їх середнього радіусу $2\pi(r_{\delta} + r_2)/2$:

$$C_{\delta} = C_{\text{поч}} \pi (r_{\delta} + r_2) = \frac{2\varepsilon \pi (r_{\delta} + r_2)}{\arcsin \eta_1} \ln(\xi_1 + \sqrt{\xi_1^2 - 1}); \quad (19)$$

де параметри η_1 і ξ_1 можна визначити при апроксимації профіля перерізу диска гіперболічної координатної поверхні.

Для визначення значень параметрів η_1 і ξ_1 , що використовуються в формулі (19) ємності диска, можливо запропонувати наступний алгоритм.

Обирається така гіперболічна поверхня $\eta = \eta_1 = \text{const}$, щоб вершина гіперболи торкалась середини торцевої поверхні диска, а лінія гіперболи пересікала лінію профіля диска в середині його висоти h (рис. 5).

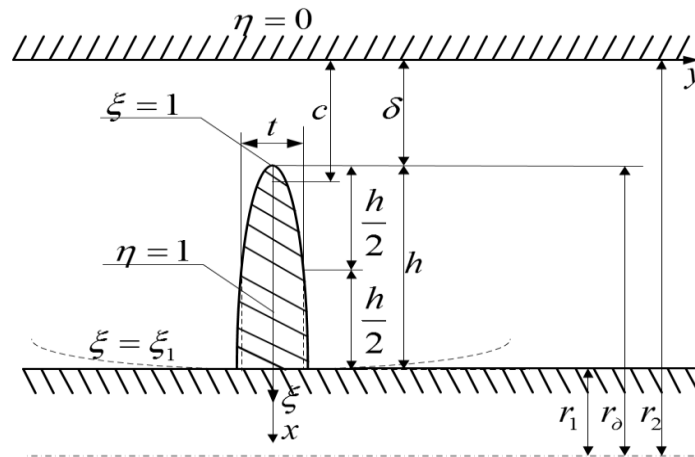


Рис. 5. Визначення значень параметрів η_1 і ξ_1 (формула (19))

Основні позначення на рисунку 5: r_1 – радіус циліндра внутрішнього провідника коаксіалу; r_2 – радіус циліндра зовнішнього провідника коаксіалу; r_0 – радіус диска; h – висота диска; t – товщина диска; δ – величина зазору між кромкою диска і циліндричною поверхнею зовнішнього циліндру коаксіалу; C – масштабний коефіцієнт в рівняннях еліпсів (8) і гіпербол (9): відстань від точки фокусу до циліндричної зовнішньої поверхні коаксіалу; $0,5 h$ – половина висоти диска; $\eta = \eta_1 = const$ – координата гіперболічної поверхні, що апроксимує профіль перерізу диска; $\xi = \xi_1 = const$ – координата еліптичної поверхні, що проходить крізь основу диска (ребра) на поверхні внутрішнього провідника коаксіалу.

Згідно рівнянням (7) і позначенням на рис. 5 між геометричними параметрами є наступний зв'язок:

$$\xi = 1; \eta = \eta_1; x = \delta; \delta = c\eta_1; \quad (20)$$

Точка основи диска на циліндричній поверхні внутрішнього провідника коаксіалу:

$$\xi = 1; \eta = \eta_1; x = \delta + h; \delta + h = c\xi_1; \quad (21)$$

Згідно рівняння (8) точка на половині висоти диска ($0,5 h$) дозволяє отримати рівняння:

$$\frac{(\delta + 0,5h)^2}{(c\eta_1)^2} - \frac{(0,5t)^2}{c^2(1-\eta_1^2)} = 1; \quad (22)$$

Рівняння (20)–(22) легко вирішуються відносно невідомих параметрів η_1 , C , ξ_1 :

$$\eta_1 = \frac{\delta}{C}; \quad (23)$$

$$C = \delta \sqrt{1 + \left(\frac{0,5t}{\delta + 0,5h} \right)^2}; \quad (24)$$

$$\xi_1 = \frac{\delta + h}{c} = \frac{\delta + h}{\delta} \eta_1; \quad (25)$$

де $h = r_0 - \eta$; $\delta = r_2 - r_0$.

На рисунку 6 і 7 приведені нормовані провідності активної і реактивної складової коаксіального датчика, що випромінюється в вільний простір нормовані до довжини хвилі в залежності від відношення a/b Як видно з приведених кривих вони носять нелінійний характер. Розрахунки складових G і B проведені на основі роботи [14].

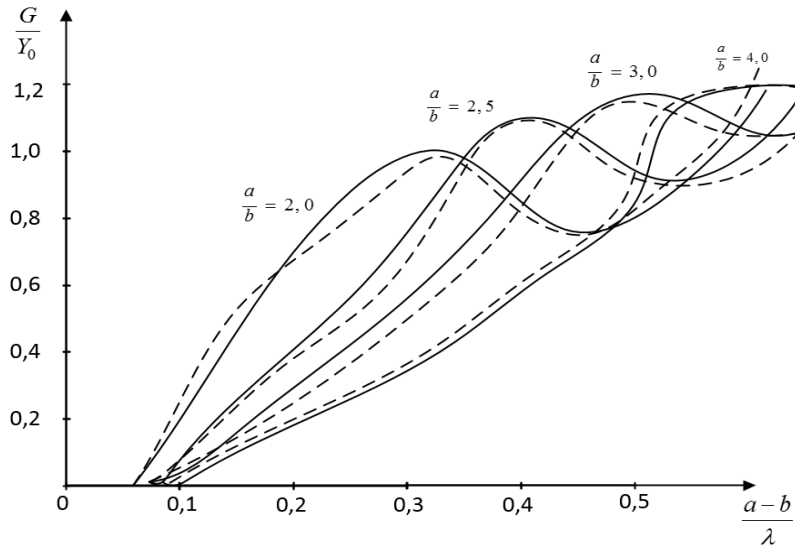


Рис. 6. Активна провідність коаксіального датчика, що випромінює у вільний простір

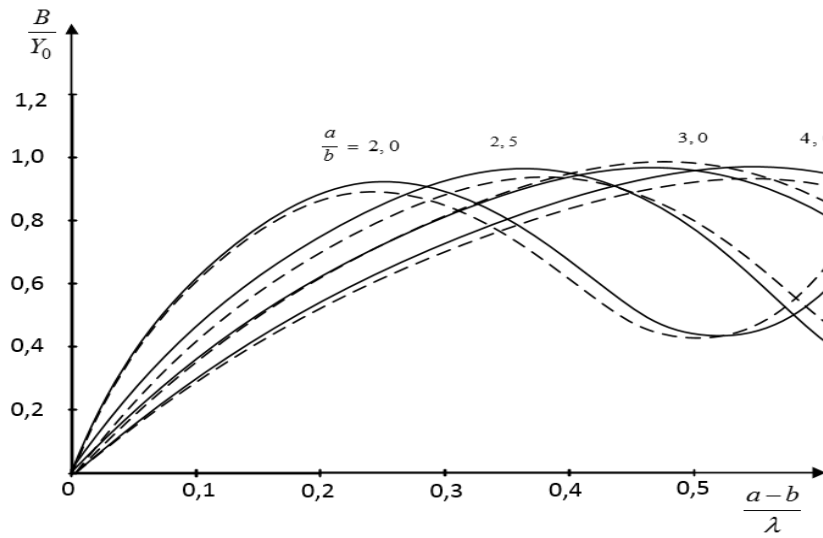
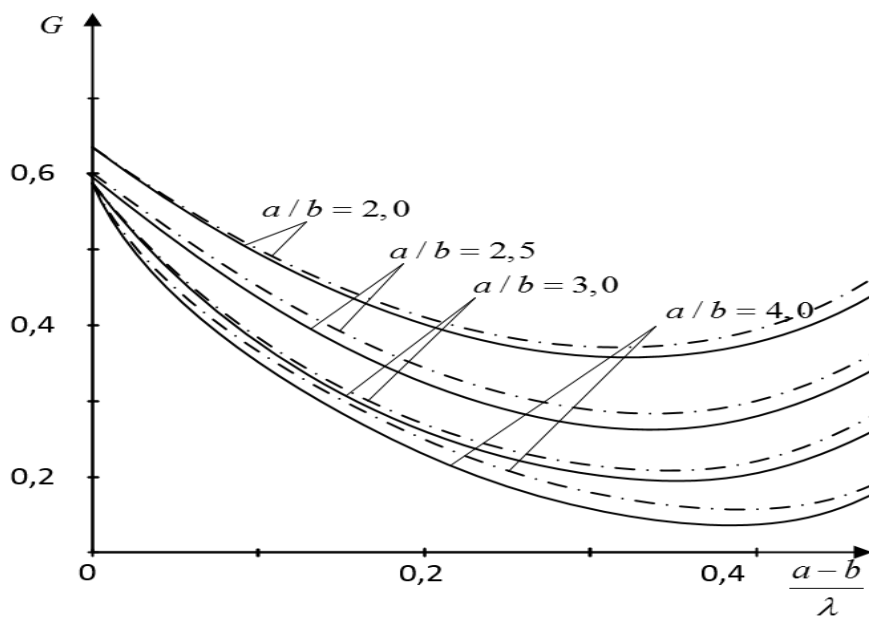


Рис. 7. Реактивна провідність коаксіального датчика, що випромінює у вільний простір

Рис. 8. Залежність нормованої провідності коаксіального датчика від відношення a/b

На рисунку 8 показані розрахунки залежності провідності двошарового середовища шкіра-жир при відношенні фіксованих a/b , причому штрих-пунктирна лінія відповідає матеріалу, що за діелектричними характеристиками імітує досліджуваний матеріал [15–17]. З розглянутих залежностей провідностей випливає, що зі збільшенням відношення a/b вони збільшуються, досягають максимуму при $(a-b)/\lambda$, а далі зменшуються. Інформація, яка може бути отримана про біоб'єкт залежить від геометричних розмірів датчика і радіуса дика, а також від відстані між ним і об'єктом.

Висновки. В результаті проведених досліджень і їх аналізу отримана математична модель взаємодії коаксіального датчика ближнього поля з біологічним середовищем. Введення круглого диску дозволяє локалізувати електричне поле в площині паралельній апертурі давача. Отримані аналітичні рівняння для активної і реактивної складової повної провідності давача. Аналіз математичної моделі показує, що при зміні властивостей шаруватого середовища змінюється провідність коаксіального датчика, а це дозволяє отримати інформацію про її стан. Представлені результати можуть слугувати основою теорії коаксіальних датчиків для оптимізації їх характеристик.

Список використаної літератури:

1. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко, В.Ф. Манойлов, В.П. Куценко, Ю.Б. Гимпелевич. – Житомир : «Волянь». – 2003. – 406 с.
2. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / В.П. Куценко, Ю.А. Скрипник, Н.Ф. Трегубов, К.Л. Шевченко, А.Ф. Яненко. – Донецк : Наука і освіта. – 2011. – 322 с.
3. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі датчиків нового покоління / Ю.О. Гордієнко, Я.І. Лепіх та ін. – Одеса : Астропринт. – 2011. – С. 186–190.
4. Hyde M.W. Nondestructive characterization of PEC-backed materials using the combined measurements of a rectangular waveguide and coaxial probe / M.W. Hyde // IEEE Microw/Wireless Compon.Lett. – 2014. – Vol. 24. – No. 11. – Pp. 808–810.
5. Гордієнко Ю.Е. Оценка численно-аналитических моделей резонаторных датчиков с коаксиальной измерительной апертурой / Ю.Е. Гордієнко, В.В. Петров, Ф.М. Хаммуд // Науч.-техн. сборник «Радиотехника». – Харьков : ХНУРЕ, 2005. – Вып. 140. – С. 156–162.
6. Пименов Ю.В. Техническая электродинамика / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов. – М. : Радио и связь, 2000. – 536 с.
7. Устройства СВЧ- и НВЧ-диапазонов / Ю.А. Иларионов, А.С. Раевский, С.Б. Раевский, А.Ю. Седаков. – М. : Радиотехника, 2013. – 750 с.
8. Anlage S.M. Principles of near-field microwave microscopy / S.M. Anlage, V.V. Talanov, A.R. Schwartz // Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale ; in S.V. Kalinin, A.Gruveman (ed.). – New-York : Springer-Verlag, 2007/ – Vol. 1. – P. 215–253.
9. Lee K. Near-field scanning microscopy using resonant waveguide probe at millimeter wavelengths / K.Lee, W.Park, I.Kim // Journal of the Korean Physical Society. – 2001. – Vol. 39. – № 6. – P. 1002–1006.
10. Yee L.K. Modelling of microwave electrical and conical tip sensors for in vivo dielectric measurements / L.K. Yee // IEEE international RF and microwave Conference (RFM). – 2015. – P. 222–226.
11. Баскаков С.Н. Электродинамика и распространение радиоволн / С.Н. Баскаков. – М. : Радиотехника, 2015. – 418 с.
12. Думин А.Н. Дифракция нестационарной ТЕМ волны на открытом конце коаксиального волновода / А.Н. Думин // Радиофизика и радиоастрономия. – Т. 5. – 2000. – № 1. – С. 55–67.
13. Гордієнко Ю.Е. Вычисление комплексных резонансных частот СВЧ резонаторных датчиков апертурного типа / Ю.Е. Гордієнко, А.А. Рябухин // Радиоэлектроника и информатика. – 2001. – № 2. – С. 4–7.
14. Неганов В.А. Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн / В.А. Неганов, Е.И. Нефёдов, Г.П. Яровой. – М. : Радио и связь, 2002. – 400 с.
15. Манойлов В.П. Визначення параметрів математичної моделі ближньохвильової взаємодії антенн з біологічним середовищем / В.П. Манойлов, Л.Ю. Назарчук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – № 50. – С. 83–91.
16. Манойлов В.П. Імпедансна модель аплікаторної антени / В.П. Манойлов, Л.Ю. Назарчук // Вісник ЖДТУ. – № 1 (25). – С. 69–79.
17. Березовський В.А. Биофизические характеристики тканей человека : справочник / В.А. Березовський, Н.Н. Колотилов. – К. : Наукова думка, 1990. – 224 с.

References:

1. Skripnik, Ju.A., Janenko, A.F., Manoylov, V.F., Kucenko, V.P. and Gimpelevich, Ju.B. (2003), *Mikrovolnovaja radiometrija fizicheskikh i biologicheskikh obektov*, Volyn', Zhitomir, 406 p.
2. Kucenko, V.P., Skripnik, Ju.A., Tregubov, N.F., Shevchenko, K.L. and Janenko, A.F. (2011), *Metody i sredstva sverhvysochastotnoj radiometrii*, Nauka i osvita, Doneck, 322 p.
3. Gordienko, Ju.O. and Lepih, Ja.I. (2011), «Інтелектуальні вимірювальні системи на основі датчиків нового покоління», *Astroprint*, Odessa, pp. 186–190.
4. Hyde, M.W. (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.

5. Gordienko, Ju.E., Petrov, V.V. and Hammud, F.M. (2005), «Ocenka chislenno-analiticheskikh modelej rezonatornykh datchikov s koaksial'noj izmeritel'noj aperturoj», *Radiotekhnika*, No. 140, pp. 156–162.
6. Pimenov, Ju.V., Vol'man, V.I. and Muravcov, A.D. (2000), *Tekhnicheskaja jelektrodinamika*, Radio i svjaz', Moscow, 536 p.
7. Ilarionov, Ju.A., Raevskij, A.S., Raevskij, S.B. and Sedakov, A.Ju. (2013), *Ustrojstva SVCh- i NVCh-diapazonov*, Radiotekhnika, Moscow, 750 p.
8. Anlage, S.M., Talanov, V.V. and Schwartz, A.R. (2007), «Principles of near-field microwave microscopy. Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale», *Springer-Verlag*, New-York, pp. 215–253.
9. Lee, K., Park, W. and Kim, I. (2001), «Near-field scanning microscopy using resonant waveguide probe at millimeter wavelengths», *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 39, No. 6, pp. 1002–1006.
10. Yee, L.K. (2015), «Modelling of microwave electrical and conical tip sensors for in vivo dielectric measurements», *IEEE international RF and microwave Conferense (RFM)*, pp. 222–226.
11. Baskakov, S.N. (2015), *Jelektrodinamika i rasprostranenie radiovoln*, Radiotekhnika, Moscow, 418 p.
12. Dumin, A.N. (2000), «Difrakcija nestacionarnoj TEM volny na otkrytom konce koaksial'nogo volnovoda», *Radiofizika i radioastronomija*, Vol. 5, No. 1, pp. 55–67.
13. Gordienko, Ju.E. and Rjabuhin, A.A. (2001), «Vychislenie kompleksnykh rezonansnykh chastot SVCh rezonatornykh datchikov aperturnogo tipa», *Radioelektronika i informatika*, No. 2, pp. 4–7.
14. Neganov, V.A., Nefjodov, E.I. and Jarovoj, G.P. (2002), *Jelektrodinamicheskie metody proektirovanija ustrojstv SVCh i anten*, Radio i svjaz', Moscow, 400 p.
15. Manoylov, V.P. and Nazarchuk, L.Ju. (2012), «Viznachennja parametriv matematichnoї modeli blizhn'ohvil'ovoї vzaemodії anten z biologichnim seredovishhem», *Visnik NTUU «KPI», Seriya Radiotekhnika. Radioaparatabuduvannja*, No. 50, pp. 83–91.
16. Manoylov, V.P. and Nazarchuk, L.Ju. (2003), «Impedansna model' aplikatornoї anteni», *Visnik ZhDTU*, No. 1 (25), pp. 69–79.
17. Berezovs'kij, V.A. and Kolotilov, N.N. (1990), *Biofizicheskie harakteristiki tkanej cheloveka*, spravochnik, Naukova dumka, Kyiv, 224 p.

Манойлов В'ячеслав Пилипович – доктор технічних наук, професор кафедри біомедичної інженерії і телекомунікації Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- електродинаміка;
- прилади НВЧ та антени;
- біомедичні прилади та системи.

Тел.: (0412) 41–39–63.

E-mail: kaf.rfat@ukr.net.

Морозов Дмитро Сергійович – старший викладач кафедри біомедичної інженерії і телекомунікації Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- діелектрометрія;
- НВЧ методи дослідження складу речовини;
- об'ємні резонатори.

E-mail: morozovds@ukr.net.

Нікітчук Тетяна Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри біомедичної інженерії і телекомунікації Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- медичні прилади і системи;
- обробка фазових портретів пульсової хвилі;
- математичне моделювання.

Полещук Іван Іванович – старший викладач кафедри біомедичної інженерії і телекомунікації Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- радіотехнічні системи;
- радіоприймальні пристрої;
- широкосмугові телекомунікаційні системи.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2018.