УДК 621.372.413

# СТРУКТУРА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ФЕРИТ-ДІЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЗОНАТОРА

***Репік О. А., аспірантка***
*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

## STRUCTURE OF THE ELECTROMAGNETIC FIELDS FERRITE-DIELECTRIC RESONATOR

***O. Repic, postgraduate***
*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

## Вступ

Керування резонансною частотою діелектричного резонатора можливо в конструкціях резонаторів, що містять поряд з діелектриком також елементи з феритових матеріалів, тобто ферит-діелектричних резонаторах. При цьому резонатор повинен бути розташований в зазорі магнітної системи, що створює керуюче поле для перестроювання частоти коливальної системи. У разі повного заміщення діелектрика феритом ферит-діелектричний резонатор називають феритовим. Феритові резонатори, як правило, виготовляються сферичної форми (у вигляді кулі). Цей резонатор має як спектр магнітостатичних, так і діелектричних резонансів. Керований зовнішнім магнітним полем діелектричний резонанс феритового резонатора досліджений в роботі [1]. При співпаданні резонансних частот феритового і діелектричного резонансу спостерігається явище затягування частоти резонансу [2]. Для поєднання резонансів феритового та діелектричного резонаторів необхідно дослідити структуру поля та резонансні частоти можливих видів коливань сферичного діелектричного резонатора.

В роботі [3] проведено дослідження електромагнітних резонансів ізотропної діелектричної сфери без діелектричних втрат, яка розміщена в нескінченному просторі. Таке дослідження показує, що в ізотропній діелектричній сфері можуть існувати коливання *TE (H)*- та *TM (E)*-видів. В реальних пристроях НВЧ ферит-діелектричні резонатори розміщують поблизу металевих стінок та діелектричних вкладишів, які суттєво впливають на їх резонансні частоти.

В роботі [4] досліджується вплив електродинамічної системи на спектр магнітостатичних коливань феритового резонатора за допомогою методу збурень, але спектр діелектричних коливань феритового резонатора не розглядався. В роботі [5] було проведено дослідження впливу металевої стінки на спектр коливань циліндричного діелектричного резонатора. Показано, що суттєвий вплив на резонансну частоту основного виду коливань $H_{01\delta}$ дає наближення металевої стінки до поверхні циліндричного діелектричного резонатора на відстань 3-4 *мм*, але не вказаний радіус циліндричного резонатора, що не дає змоги ввести порівняння цієї відстані з радіусом резонатора. Вплив сферичної металевої стінки на сферичний діелектричний резонатор можна дослідити із аналітичного розв'язку задачі для випадку розміщення сферичного діелектричного резонатора в центрі сферичної діелектричної порожнини [6].

Аналітичний розв'язок для загального випадку розміщення резонатора в будь-якій електродинамічній системі досить складний. Тому дослідження впливу електродинамічної системи на сферичний ферит-діелектричний резонатор будемо проводити за допомогою методу збурень. Для застосування методу збурень необхідно розрахувати енергію всередині та ззовні феритового резонатора, для чого потрібно мати вирази для компонентів електромагнітного поля всередині та ззовні феритового резонатора в явному вигляді. Метою даної роботи є дослідження структури електромагнітного поля діелектричних коливань феритового резонатора для реальних пристроїв.

## Розрахунки електромагнітного поля ферит-діелектричного резонатора

Розрахунки проводилися для феритового резонатора, виготовленого з монокристалу залізо-ітрієвого гранату, з наступними параметрами: діаметр $D$=8.28 мм, діелектрична проникність $\varepsilon$=16, намагніченість насичення фериту $M$=140 кА/м.

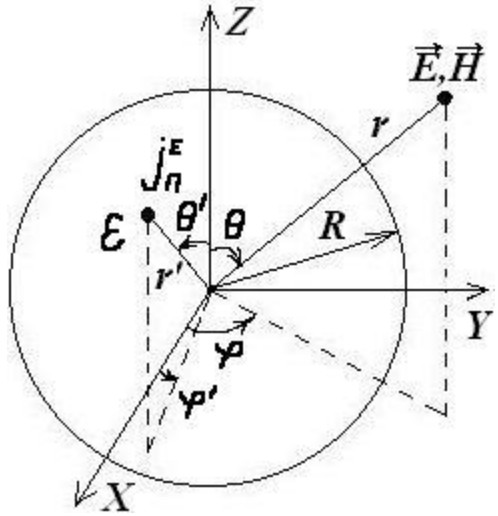


Рис. 1. Куля в сферичній системі координат.

Використовуючи формули для компонент електромагнітного поля всередині сфери [3], запишемо їх для основного виду коливань $H_{110}$ при $m$=0 в сферичній системі координат (рис. 1).

$$E_r = E_\theta = H_\varphi = 0,$$

$$H_r = \frac{2}{r^2} \cdot \sqrt{k \cdot r} \cdot J_{1+\frac{1}{2}}(k \cdot r) \cdot P_1^0(\cos\theta),$$

$$H_\theta = \frac{1}{r} \cdot \frac{d\left[\sqrt{k \cdot r} \cdot J_{1+\frac{1}{2}}(k \cdot r)\right]}{dr} \cdot \frac{dP_1^0(\cos\theta)}{d\theta},$$

$$E_\varphi = i \cdot \frac{k}{r} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \sqrt{k \cdot r} \cdot J_{1+\frac{1}{2}}(k \cdot r) \cdot \frac{dP_1^0(\cos\theta)}{d\theta}, \quad (1)$$

де $P_1^0(\cos\theta)$ - приєднані функції Лежандра

1-го роду; $\cos\theta$ - аргумент; $J_{1+\frac{1}{2}}(k\cdot r)$ - функції Бесселя 1-го роду порядку $n$+1/2; $k=\omega\cdot\frac{\sqrt{\varepsilon\cdot\mu}}{c}$ - хвильове число всередині сфери.

Як видно з цих формул, структура поля має осьову симетрію і компоненти поля не залежать від азимутальної координати $\varphi$.

Формули для компонент зовнішнього поля в роботі [3] задані в неявному вигляді, а для застосування методу збурень нам необхідні поля в явному вигляді, тому можна використати для подальших досліджень формули для компонентів поля назовні сферичного діелектричного резонатора, приведені в роботі [7], або розрахувати ці компоненти за допомогою методики збудження електромагнітного поля струмами поляризації [8].

Знайдемо струм поляризації через внутрішні поля, приведені для коливання виду $H_{110}$ (1).

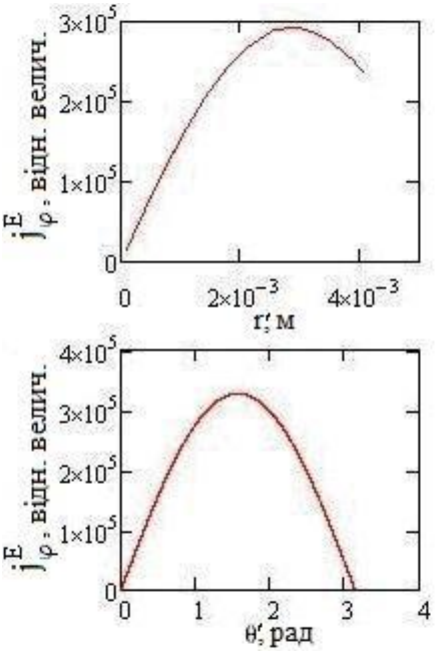


Рис. 2. Залежності струму поляризації від радіуса $r'$, розраховані при куті $\theta'=\pi/4$, а від кута $\theta'$ при $r'=R$.

Оскільки дослідження проводиться для випадку основного виду діелектричних коливань сферичного діелектричного резонатора $H_{110}$, вважаємо, що всі магнітні струми поляризації $j_r^M=j_\theta^M=j_\varphi^M=0$, електричні струми $j_r^E=j_\theta^E=0$. Для розрахунку електричного струму поляризації залишається тільки компонента $E_\varphi$.

$$j_\varphi^E=i\cdot\omega\cdot\varepsilon_0\cdot(\varepsilon-1)\cdot E_\varphi,$$

де

$$E_\varphi=i\cdot\frac{k}{r'}\cdot\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\cdot\sqrt{k\cdot r'}\cdot J_{1+\frac{1}{2}}(k\cdot r')\cdot\frac{\partial P_1^0(\cos\theta')}{\partial\theta'}.$$

Після заміни функції Бесселя 1-го роду порядку $n$+1/2 та приєднаних функцій Лежандра елементарними функціями отримаємо:

$$J_{1+\frac{1}{2}}(k\cdot r')=\frac{\sin(k\cdot r')}{(k\cdot r')^{\frac{3}{2}}}-\frac{\cos(k\cdot r')}{\sqrt{k\cdot r'}},$$

$$\frac{\partial P_1^0(\cos\theta')}{\partial\theta'}=-\sin\theta'.$$

Тоді електричний струм поляризації матиме вигляд

$$j_\varphi^E=\omega\cdot\varepsilon_0\cdot(\varepsilon-1)\cdot\frac{k}{r'}\cdot\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\cdot\sin\theta'\cdot\left[\frac{\sin(k\cdot r')}{(k\cdot r')^{\frac{3}{2}}}-\frac{\cos(k\cdot r')}{\sqrt{k\cdot r'}}\right].$$

Залежність струму поляризації від координат $r'$ та $\theta'$ приведена на рис. 2.

Через струм поляризації знайдемо компоненти зовнішнього електромагнітного поля для основного виду коливань $H_{110}$ [8]

$$H_r = \frac{2}{r} \cdot U_{110}^M.$$

$$U_{110}^M = \frac{\partial P_1^0(\cos\theta)}{\partial\theta} \cdot \xi_1^{(2)}(k_0 \cdot r) \cdot F_{10}^{2M},$$

де $$\xi_1^{(2)}(k_0 \cdot r) = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot k_0 \cdot r}} \cdot H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_0 \cdot r);$$

$\xi_1^{(2)}(k_0 \cdot r)$ - радіальна сферична функція 1-го роду;

$H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_0 \cdot r)$ - функції Ганкеля 2-го роду порядку $n$+1/2.

Якщо провести заміну функцій Ганкеля на елементарні функції для порядку $n$=0, отримаємо

$$H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_0 \cdot r) = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot k_0 \cdot r}} \cdot \frac{e^{-i \cdot k_0 \cdot r}}{-i}.$$

Тоді $$\xi_1^{(2)}(k_0 \cdot r) = \frac{1}{k_0 \cdot r} \cdot \frac{e^{-i \cdot k_0 \cdot r}}{-i}.$$

$$F_{10}^{2M} = \frac{3}{2} \cdot \frac{k}{4 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \mu_0} \cdot \int_V j_\phi^E \cdot i \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot k \cdot r'}} \cdot J_{1+\frac{1}{2}}(k \cdot r') \cdot \frac{\partial P_1^0(\cos\theta')}{\partial\theta'} \cdot r'^2 \cdot \sin\theta' \cdot dr' \cdot d\theta',$$

$$F_{10}^{2M} = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot \varepsilon}} \cdot \frac{i \cdot k \cdot \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon - 1)}{\omega \cdot \pi} \cdot \int_0^R \left( \frac{\sin(k \cdot r')}{k \cdot r'} - \cos(k \cdot r') \right)^2 \cdot dr'.$$

Тоді з однорідних рівнянь Максвела для магнітних хвиль отримаємо вирази

$$H_\theta = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{d\theta} \left[ \frac{d}{dr} \left( r \cdot U_{110}^M \right) \right],$$

$$E_\varphi = \frac{i \cdot \omega \cdot \mu_0}{r} \cdot \frac{d}{d\theta} \left( r \cdot U_{110}^M \right).$$

Розрахуємо залежність всіх компонентів зовнішнього електромагнітного поля від координат $r$ та $\theta$ для основного виду діелектричних коливань сферичного діелектричного резонатора $H_{110}$ та побудуємо графіки цих залежностей (рис. 3).

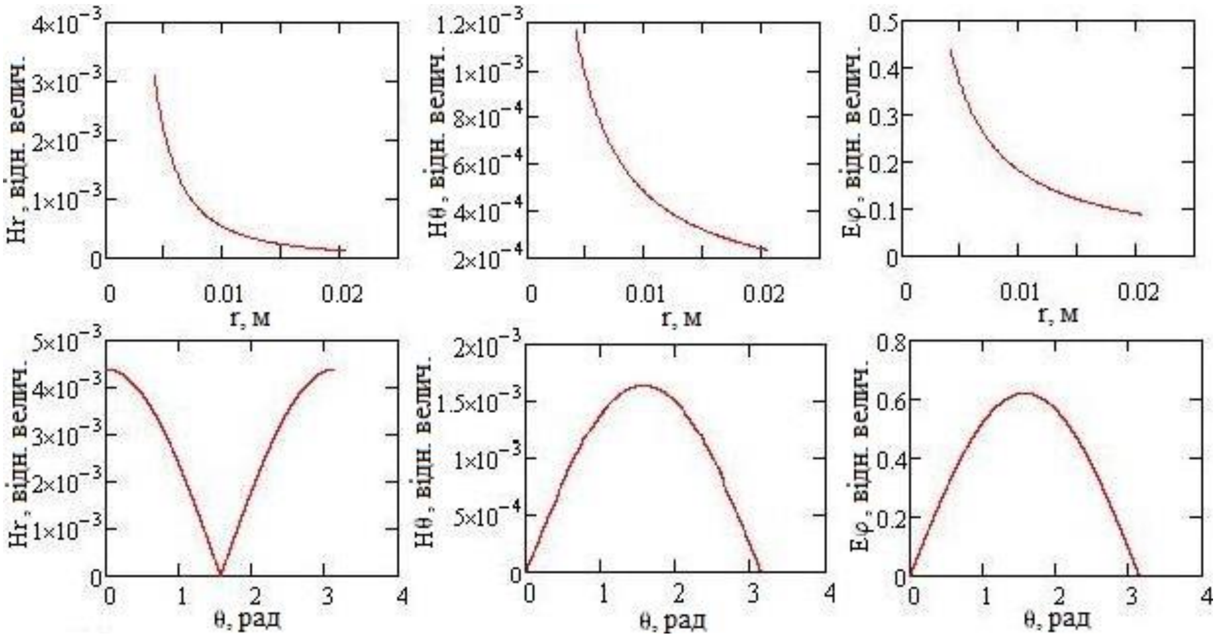


Рис. 3. Залежності зовнішнього електромагнітного поля від радіуса $r$, розраховані при куті $\theta=\pi/4$, а від кута $\theta$ при $r=R$.

Графіки залежностей компонентів зовнішнього електромагнітного поля від координат $\varphi$ та $\theta$ для основного виду діелектричних коливань сферичного діелектричного резонатора $H_{110}$ збігаються з точністю до постійного множника з графіками залежностей, побудованих на основі роботи [7] і якісно відрізняються щодо залежностей компонентів зовнішнього електромагнітного поля від координати $r$ (рис. 4). В той же час залежності компонентів зовнішнього електромагнітного поля від координати $r$ для основного виду діелектричних коливань сферичного діелектричного резонатора $H_{110}$ співпадають із розрахунками цієї залежності в роботі [9]. Різний характер цих залежностей потребує додаткових експериментальних досліджень. Зауважимо, що графіки (рис. 3), побудовані на основі наведених вище розрахунків, відображають типову залежність електромагнітного поля в ближній зоні для випадку елементарного магнітного диполя.

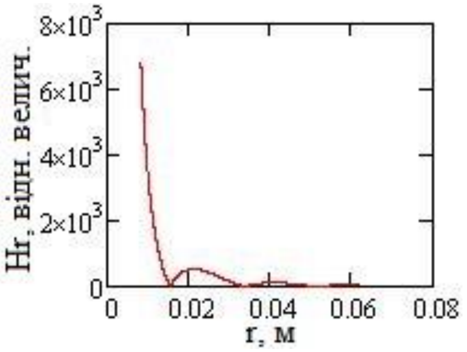


Рис. 4. Залежність зовнішнього електромагнітного поля від радіуса $r$, розрахована при куті $\theta=\pi/4$ на основі роботи [7].

## Висновки

Проведено дослідження структури електромагнітного поля феритового резонатора як окремого випадку ферит-діелектричного резонатора. Для розрахунків використані вирази для внутрішніх полів, отримані в роботі [3]. Дослідження структури зовнішніх електромагнітних полів проводиться для випадку основного виду діелектричних коливань за допомогою методики розрахунку збудження цих полів струмами поляризації. Струми поляризації знаходимо із виразів для внутрішнього електромагнітного поля для основного виду коливань феритового резонатора $H_{110}$. Результати розрахунків можуть бути використані при дослідженні впливу електродинамічної системи на спектр діелектричних коливань ферит-діелектричного резонатора в реальних пристроях НВЧ.

**Література:**

1. Вунтесмери В. С. Исследование магнитодиэлектрических резонаторов в волноводе / В. С. Вунтесмери, В. А. Сызранов // Вестник КПИ. Сер. Радиотехники и электроакустики. — 1974. — № 11. — С. 24—25.

2. Ильченко М. Е. Составной феррито-диэлектрический резонатор в волноводе / М. Е. Ильченко, Г. А. Мелков // Радиотехника и электроника. — 1973. — № 11. — С. 2288—2293.

3. Gastine M. Electromagnetic Resonances of Free Dielectric Spheres / Monique Gastine, Louis Courtois, Jean Louis Dormann // IEEE. Trans. MTT-15. — 1967. — № 12. — p. 694—700.

4. Вунтесмери В. С. Влияние электродинамической системы на параметры ферритового резонатора / В. С. Вунтесмери // Радиоэлектроника. — 1992. — № 3. — С. 9—17. — ISSN 0021-3470.

5. Ильченко М. Е. Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ / М. Е. Ильченко, Е. В. Кудинов. — К. : Киевский университет, 1973. — 175 с.

6. Ильченко М. Е. Электродинамика диэлектрических резонаторов / М. Е. Ильченко, А. А. Трубин — К. : Наукова думка, 2004. — 266 с.

7. Ильченко М. Е. Учёт внешних полей при вычислении параметров СДР / М. Е. Ильченко, М. А. Старков // Вестник КПИ. Сер. Радиотехника. — 1980. — № 17. — С. 24-25.

8. Марков Г. Т. Возбуждение электромагнитных волн / Г. Т. Марков, А. Ф. Чаплин — М. : Л. : Энергия, 1967. — 376 с.

9. Диэлектрические резонаторы / [М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятышев, Л. Г. Гасанов и др.]. — М. : Радио и связь, 1989. — 328 с. — ISBN 5-256-00217-1.

**References:**

1. Vuntesmeri V. S., Syzranov V. A. Issledovaniye magnitodielektricheskikh rezonatorov v volnovode. Vestnik KPI. Ser. Radiotekhniki i elektroakustiki, 1974, no. 11, pp. 24–25.

2. Ilchenko M. Ye., Melkov G. A. Sostavnoy ferrito-dielektricheskiy rezonator v volnovode. Radiotekhnika i elektronika, 1973, no. 11, pp. 2288–2293.

3. Gastine M., Courtois L., Dormann J. L. Electromagnetic Resonances of Free Dielectric Spheres. IEEE. Trans. MTT-15, 1967, no. 12, pp. 694–700.

4. Vuntesmeri V. S. Vliyaniye elektrodinamicheskoy sistemy na parametry ferritovogo rezonatora. Radioelektronika, 1992, no. 3, pp. 9–17, ISSN 0021-3470.

5. Ilchenko M. Ye., Kudinov Ye. V. Ferritovyye i dielektricheskiye rezonatory SVCh. K.: Kiyevskiy universitet, 1973, 175 p.

6. Ilchenko M. Ye., Trubin A. A. Elektrodinamika dielektricheskikh rezonatorov. – Kiev, Naukova dumka, 2004, 266 p.

7. Ilchenko M. Ye., Starkov M. A. Uchet vneshnikh poley pri vychislenii parametrov SDR. Vestnik KPI. Ser. Radiotekhnika, 1980, no. 17, pp. 24–25.

8. Markov G. T., Chaplin A. F. Vozbuzhdeniye elektromagnitnykh voln. Moscow, Energiya, 1967, 376 p.

9. Ilchenko M. Ye., Vzyatyshev V. F., Gasanov L. G. i dr. Dielektricheskiye rezonatory.– Moscow, Radio i svyaz, 1989, 328 p., ISBN 5-256-00217-1.

*Репік О.А.* ***Структура електромагнітного поля ферит-діелектричного резонатора.*** *В роботі отримані вирази для компонентів електромагнітного поля ззовні феритового резонатора для діелектричного спектру коливань в явному вигляді. Розраховані залежності компонентів зовнішнього електромагнітного поля від координат r та θ для основного виду діелектричних коливань сферичного діелектричного резонатора* $H_{110}$ *та побудовані графіки цих залежностей. Проведено порівняння виразів для компонентів електромагнітного поля назовні феритового резонатора для діелектричного спектру коливань, розрахованих за допомогою методики збудження електромагнітного поля струмами поляризації, з відомими виразами, отриманими іншими методами.*

***Ключові слова:*** *ферит-діелектричний резонатор, електромагнітний резонанс, резонансна частота, спектр коливань, електродинамічна система, метод збурень, структура поля, струм поляризації.*

*Репик О.А.* ***Структура электромагнитного поля феррит-диэлектрического резонатора.*** *В работе получены выражения для компонентов электромагнитного поля снаружи ферритового резонатора для диэлектрического спектра колебаний в явном виде. Рассчитаны зависимости компонентов внешнего электромагнитного поля от координат r и θ для основного вида диэлектрических колебаний сферического диэлектрического резонатора* $H_{110}$ *и построены графики этих зависимостей. Проведено сравнение выражений для компонентов электромагнитного поля снаружи ферритового резонатора для диэлектрического спектра колебаний, рассчитанных с помощью методики возбуждения электромагнитного поля токами поляризации, с известными выражениями, полученными другими методами.*

***Ключевые слова:*** *феррит-диэлектрический резонатор, электромагнитный резонанс, резонансная частота, спектр колебаний, электродинамическая система, метод возмущений, структура электромагнитного поля, ток поляризации.*

*Repik O.* ***Structure of the electromagnetic field ferrite-dielectric resonator****.*

*Introduction. The considered several works explore the question of electromagnetic resonance ferrite and dielectric resonators, the influence of electrodynamics system on the spectrum of magnetostatic oscillations ferrite resonator, the influence of metal wall on the spectrum of cylindrical dielectric resonator vibrations.*

*Calculations of the electromagnetic field ferrite-dielectric resonator. The expressions for the components of the electromagnetic field outside the ferrite resonator for dielectric spectrum of fluctuations* are obtained *explicitly.* The *dependence of components of the external electromagnetic field on the coordinates r and θ for the main type of dielectric fluctuations spherical dielectric resonator* $H_{110}$ is *calculated.* The *graphs of these dependencies are constructed. The comparison of expressions for the components of the electromagnetic field outside the ferrite resonator for dielectric spectrum fluctuations is conducted*. These components are calculated *using the technique of electromagnetic field excitation polarization currents with known expressions obtained by other methods.*

*Conclusions.* The *investigation of the electromagnetic field ferrite resonator structure as a particular case of ferrite-*dielectric *resonator is conducted. The investigation of the external electromagnetic fields structure is carried out for the case of the main type of dielectric fluctuations using the method of calculating the excitation polarization currents of these fields. Polarization currents are found from the expression for the internal electromagnetic fields for basic type oscillation* of *ferrite resonator* $H_{110}$.

***Keywords****: ferrite-dielectric resonator, electromagnetic resonance, resonance frequency, spectrum of oscillations, electrodynamics system, the method of perturbation, the structure of the electromagnetic field, the polarization current.*