

УДК 537.635

DOI: [10.20535/2312-1807.2017.22.2.93802](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.2.93802)**Федорчук О. П.**, к.т.н., OrcID [0000-0002-3917-6711](https://orcid.org/0000-0002-3917-6711)e-mail alex1377c9@gmail.com

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Попов М. А., к.ф.-м.н., OrcID [0000-0003-3509-7108](https://orcid.org/0000-0003-3509-7108)e-mail maxim_popov@univ.kiev.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

МАГНІТОКЕРОВАНІ КОМПОЗИЦІЙНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ «ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАТОР / ПЛІВКА ФЕРИТУ»

Розроблено керувані магнітним полем композиційні резонатори на основі легованого оксидом цинку тетраїтанату барію та фериту нікелю. Наведено теоретичні міркування щодо можливості створення подібних елементів, обговорено критерії вибору матеріалів. Досліджено передавальні характеристики отриманих композиційних резонаторів. Показано вплив магнітного поля на резонансну частоту та поглинання енергії у резонансі. Визначено орієнтовні значення добротності отриманих композиційних резонаторів, створених методом трафаретного друку.

Бібл. 13, рис. 3.

Ключові слова: тетраїтанат барію; ферит нікелю; композиційна структура; резонатор; техніка НВЧ.

Вступ. При розробці фільтрів радіочастотного діапазону, твердотільних генераторів, діелектричних антен, які широко використовуються у сучасних системах зв'язку, важливу роль відіграють високодобротні, термостабільні діелектричні резонатори [1-5]. Діелектричні резонатори (ДР) розробляють на основі матеріалів, які в діапазоні надвисоких частот (НВЧ) характеризуються підвищеними значеннями діелектричної проникності ($\epsilon \sim 20-100$), низькими діелектричними втратами ($\text{tg}\delta \sim 10^{-3}-10^{-4}$) і високою температурною стабільністю електрофізичних властивостей (температурний коефіцієнт діелектричної проникності $\text{TK}\epsilon \sim 10^{-5}-10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [6]. Впродовж останніх десятиліть було прикладено багато зусиль для розробки матеріалів, які б задовольняли вказаним вище вимогам [1, 7].

Одним із недоліків діелектричних резонаторів є відсутність можливості змінювати їх властивості за допомогою електричних сигналів. При цьому, використання ДР, характеристиками яких можна керувати, скажімо, зовнішнім електричним чи магнітним полем, дозволило б значно розширити функціональні можливості НВЧ приладів. Зокрема, це дозволило б динамічно узгоджувати передавальні амплітудно- або фазочастотні характеристики НВЧ елемента зі спектром вхідного сигналу.

Вже описано чимало підходів до створення керуваніх резонансних елементів на основі діелектричних матеріалів. Зокрема, описані

структури, в яких для керування робочими частотами використовуються механічні, п'єзоелектричні та MEMS-актуатори, варактори, феритові диски, зміна оптичних властивостей матеріалів, температури [8]. В нашій роботі пропонується розвиток ідеї використання додаткових феритових компонентів для управління характеристиками ДР.

Відомо, що діелектричні резонатори на основі феромагнітних матеріалів дозволяють змінювати резонансну частоту під дією магнітного поля внаслідок явища феромагнітного резонансу (ФМР) [9]. Проте ФМР супроводжується значними магнітними втратами, що затрудняє його використання при розробці керуваніх елементів сучасних систем зв'язку. Одним із можливих шляхів вирішення цієї проблеми є розробка композиційних резонансних елементів, які б включали діелектричний резонатор на основі високодобротного, термостабільного НВЧ матеріалу й нанесену на його поверхню феромагнітну плівку. При цьому необхідно знайти оптимальні співвідношення між розмірами діелектричного резонатора, який повинен забезпечити необхідну діелектричну добротність ($Q = 1 / \text{tg}\delta$) і термостабільність електрофізичних властивостей, в той час як плівка на основі феромагнітного матеріалу забезпечить керування властивостями композиційного резонатора зовнішнім магнітним полем, не вносячи помітних діелектричних втрат. Раніше [10] нами був розробле-



ний композиційний діелектричний резонатор на основі полікристалічного корунду ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), який характеризується невисокою діелектричною проникністю ($\epsilon \sim 9,8$), малими діелектричними втратами ($\text{tg}\delta \sim 10^{-4}$), високою термостабільністю ($\text{TK}\epsilon \sim 8\text{-}10\cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) [6]. На резонатор наносилась плівка фериту нікелю зі структурою шпінелі. Такий вибір матеріалу обумовлений тим, що даний магнітний матеріал характеризується високою намагніченістю насичення та малою коерцитивною силою, що забезпечує високу чутливість до магнітного поля й збільшує діапазон зміни характеристик композиційного резонатора. В результаті проведених досліджень показана принципова можливість зміни резонансної частоти та рівня резонансного поглинання композитної структури під дією магнітного поля.

Метою даної роботи була розробка композиційного резонатора, у якому поєднуються діелектричний матеріал з $\epsilon \sim 34\text{-}36$ (на основі BaTi_4O_9 з домішкою ZnO) і плівка фериту нікелю зі структурою шпінелі.

Постановка задачі. У вступі даної роботи згадувались існуючі підходи до створення керованих резонансних елементів. Кожен з підходів має свої специфічні переваги, наприклад, механічне керування забезпечує значну зміну характеристик при зовнішньому впливі. Однак, для кожного з них існують обмеження стосовно мініатюризації, енерговитрат на керування та добротності елементів. Так механічні методи потребують досить високих енергозатрат для роботи й мають значні розміри, використання варакторів веде до втрат енергії через використання металевих компонент в конструкції, сегнетоелектрики потребують підтримки постійних температурних режимів і т.д..

Задачами даної роботи є: розробка магнітокерованих резонансних елементів (резонаторів), які можуть бути створені за допомогою стандартних процесів планарної технології, визначення можливості керування їх характеристиками та орієнтовних значень добротності отримуваних структур.

Теоретичне обґрунтування. Для обґрунтування можливості створення керованих магнітним полем композиційних резонаторів буде використано теорію збурень разом з відомими результатами з електродинаміки магнітовпорядкованих середовищ.

Враховуючи, що об'єм діелектричного резонатора набагато більший, ніж об'єм фериту, можна вважати, що будь-які зміни у розподілі

поля, викликані фізичними процесами у плівці фериту, є збуренням поля вільного діелектричного резонатора. Відповідно, мода діелектричного резонатора є домінуючою у композиційній системі «діелектрик – плівка фериту». За таких умов теорія збурень передбачає, що зміна комплексної частоти діелектричного резонатора $\omega_r = 2\pi f_r(1 + i/2Q)$ під впливом магнітного поля у загальному випадку може бути розрахована за допомогою виразу [11, 12]

$$\frac{\omega_r(H) - \omega_r(H=0)}{\omega_r(H=0)} = - \frac{\int_{V_F} m(r) \cdot h_0^*(r) dV}{2 \int_{V_{DR}} h_0(r) \cdot h_0^*(r) dV}, \quad (1)$$

де $\omega_r(H)$ – значення частоти резонансу при прикладанні зовнішнього магнітного поля, $\omega_r(H=0)$ – значення частоти резонансу за відсутності зовнішнього магнітного поля, $h_0(r)$ – незбурене магнітне поле власної моди ДР як функція від координати, $m(r)$ – високочастотна намагніченість всередині феритової компоненти V_F й V_{DR} – об'єми шару фериту й діелектричного резонатора. Чисельник виразу (1) пропорційний енергії, зосередженій у збурюючому об'ємі (фериті), в той час як знаменник пропорційний повній енергії незбуреного діелектричного резонатора.

Намагніченості визначається тензором магнітної сприйнятливості $m(r) = \chi \cdot h_0(r)$, який, у свою чергу, залежить від зовнішнього магнітного поля, що якраз і дозволяє здійснювати магнітне керування.

Відмітимо також, що величина максимальної зміни частоти резонансу відповідно до (1) залежить від відношення об'єму фериту й діелектрика та величини компонент тензора магнітної сприйнятливості, які, в свою чергу, залежать від намагніченості матеріалу та ширини лінії феромагнітного резонансу [11], тобто намагніченість насичення фериту є одним із важливих факторів, що впливатиме на діапазон зміни частоти.

Прикладання магнітного поля також змінюватиме ширину кривої резонансного поглинання [12], яка тісно пов'язана з добротністю, тому можна зробити висновок, що зміна зовнішнього поля H буде викликати зміни як резонансної частоти, так і добротності композиційного резонатора. Останнє веде до зміни ширини лінії резонансу відповідної моди та величини резонансного поглинання енергії при проходженні хвилі.

У підсумку, найбільші зміни параметрів електромагнітних коливань в композиційному резонаторі очікуються у випадку товстого шару фериту більшої товщини, зі значною намагніченістю насичення й малими магнітними втратами при значеннях напруженості зовнішнього магнітного поля, що відповідають поля ФМР на резонансній частоті незбуреної моди ДР ω_r .

Розробка магнітокерованих композиційних резонаторів. Синтез тетратитанату барію $BaTi_4O_9 - ZnO$. Тетратитанат барію був виготовлений методом твердофазного синтезу, в якості вихідних реагентів використовувалися $BaCO_3$ й TiO_2 . В процесі синтезу вводилась необхідна кількість оксиду цинку. Додавання оксиду цинку має позитивний вплив на термостабільність електрофізичних властивостей тетратитанату барію внаслідок різних знаків температурного коефіцієнту резонансної частоти для тетратитанату барію і нової сполуки $BaZn_2Ti_4O_{11}$, яка утворюється при взаємодії тетратитанату й оксиду цинку [13], також поліпшується і добротність матеріалу.

Нанесення плівок фериту нікелю на діелектричний резонатор. Плівки фериту нікелю зі структурою шпінелі наносились на діелектричний резонатор методом трафаретного друку. Для цього готувалась суспензія, яка складалась із наночастинок фериту та фотополімеру гідроксопропілметакрилату. Приготовано суспензії зі співвідношеннями фериту до полімеру 175, 350 та 525 г/л. Суспензія наносилась на поверхню резонатора, накривалась захисним склом та опромінювалась світлом ультрафіолетової лампи протягом 1-ї години. Довжина хвилі випромінювання лампи – 380 нм, потужність – 8 Вт.

Вимірювання передавальних характеристик композиційних резонансних елементів. Вимірювання характеристик виготовлених композиційних резонаторів проводилось за допомогою векторного аналізатора НВЧ кіл *Agilent N5230A PNA-L Network Analyzer* в режимі біжучої хвилі. Вимірювальна комірка являла собою відрізок прямокутного хвилеводу з площею поперечного перерізу $23 \times 10 \text{ мм}^2$, в якому розміщувались досліджувані резонатори. Розміри композиційних резонаторів (діаметр $D = 6,45$

мм, товщина $S = 1,70 \text{ мм}$) забезпечують знаходження основної резонансної моди в 3-сантиметровому діапазоні (8-12 ГГц). Захисне скло піднімало резонатор над стінкою хвилеводу, що зменшувало втрати за рахунок вихрових струмів, а розміщення резонансних елементів у хвилеводі усувало втрати на випромінювання елемента.

Зовнішнє магнітне поле створювалось постійним магнітом з керованою відстанню між полюсами, причому силові лінії поля були направлені перпендикулярно до поверхні зразків (рис. 1).

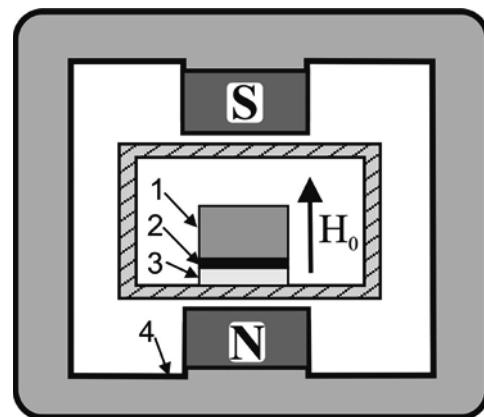


Рис. 1. Схема застосованої вимірювальної комірки: 1 – діелектричний резонатор, 2 – плівка фериту нікелю зі структурою шпінелі, 3 – захисне скло, 4 – металевий прямокутний хвилевід.

Коефіцієнт зв'язку між хвилеводом та композиційним резонатором регулювався шляхом бокового зміщення композиційного резонатора уздовж широкої стінки хвилеводу, зміщення дозволяло забезпечити мінімальні втрати у резонаторі (3-5 дБ) за відсутності зовнішнього магнітного поля.

Була виміряна повна матриця розсіювання досліджуваної структури, зокрема поглинання енергії в елементі при прямому S_{12} й зворотному S_{21} напрямі проходження хвилі. На її основі визначені резонансна частота композиційного резонансного елемента, його добротність та рівень поглинання електромагнітної енергії, а також зміна цих величин під впливом магнітного поля.

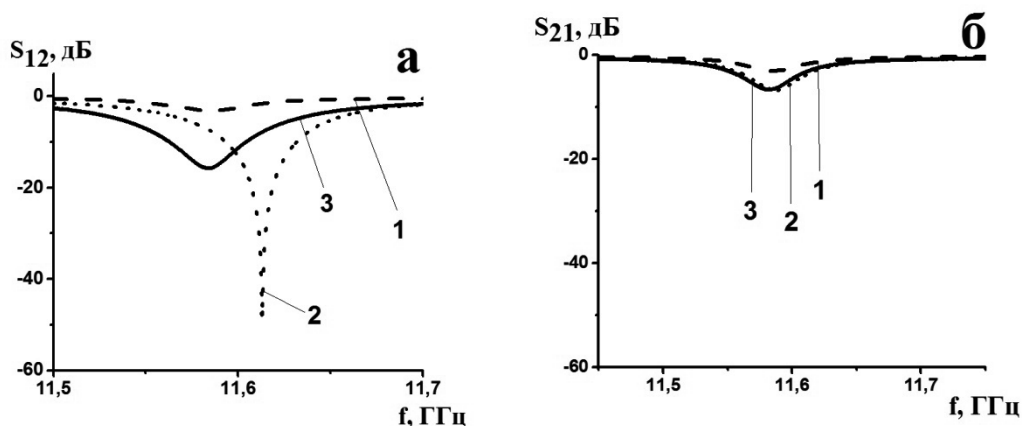


Рис. 2. Передавальна характеристика композиційного резонансного елемента з товщиною плівки фериту 100 мкм, концентрацією фериту у плівкоутворюючій суспензії 175 г/л при проходженні хвилі у «прямому» (а) та «зворотному» (б) напрямі при значеннях зовнішнього магнітного поля 1 – 0 Е, 2 – 2740 Е, 3 – 3530 Е.

Результати. На рис. 2а та 2б показані резонансні криві для композиційного резонансного елемента на основі діелектричного резонатора з легованого тетратитанату барію діаметром 6.45 мм і висотою 1.7 мм та плівки фериту нікелю товщиною 100 мкм, при різних значеннях прикладеного зовнішнього магнітного поля.

На рис. 2а показані резонансні криві для випадку поширення хвилі у вимірювальній комірці в «прямому» напрямі, на рис. 2б – у «зворотному». Зсув частоти у випадку прямого проходження хвилі складає 29 МГц при незбуреній резонансній частоті близько 11,6 ГГц (рис. 3а), зміна рівня поглинання досягає 46,5

дБ (рис. 3б). Водночас, різниця у зміні поглинання енергії хвилі для протилежних напрямів проходження дорівнює ~40 дБ, тобто елемент демонструє сильну невзаємність. Для порівняння: існуючі на ринку вентиляції пропонують розв'язку до 30 дБ. Наявність же відносно сильного поглинання при зворотному проходженні хвилі можна пояснити нерівномірністю направленості вектору намагніченості по об'єму полікристалу фериту, для досягнення кращої невзаємності слід намагнічувати ферит у процесі виготовлення елементів, що призведе до орієнтації всіх власних локальних магнітних моментів в одному напрямі.

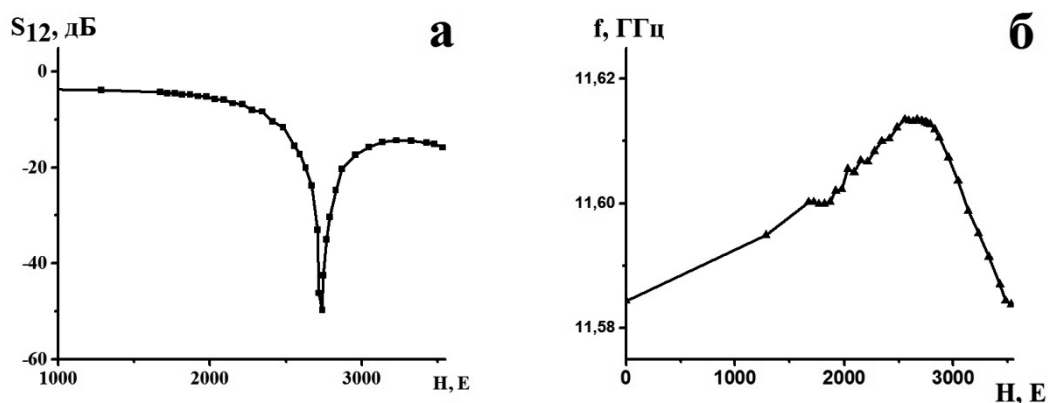


Рис. 3. Зміна коефіцієнту поглинання енергії (а) та зміщення центральної частоти резонансу (б) композиційного резонатора під дією магнітного поля при «прямому» напрямі поширенні хвилі.

Зафіксовано було також і зміну ширини лінії резонансу та, відповідно, його добротності. За відсутності магнітного поля добротність резонатора (визначена по рівню -3 дБ) становила близько 900. При прикладанні зовнішнього магнітного поля власна добротність резонансу на частоті близько 11,613 ГГц ця величина зростала до значень ~ 5000 .

Отже, з нашої точки зору отримані композиційні резонатори мають перспективи щодо використання в якості керованих не взаємних фільтрів та резонансних вентилів НВЧ.

Висновки. Розроблено технологію виготовлення композиційних резонаторів НВЧ діапазону на основі діелектричного резонатора (тетратитанат барію, легований цинком) та фериту нікелю зі структурою шпінелі.

Показано, що такі структури характеризуються відносно високою добротністю (до 5000 в магнітному полі) й дозволяють змінювати резонансну частоту зовнішнім магнітним полем.

Діапазон зміни резонансної частоти становить 29 МГц при частоті резонансу 11,613 ГГц. Розроблені композиційні резонансні елементи характеризуються значною не взаємністю, що важливо при створенні ряду НВЧ пристроїв (зокрема, вентилів). Різниця у зміні рівня поглинання енергії залежно від напрямку проходження електромагнітної хвилі складає до 40 дБ. Також виготовлені резонансні елементи можна використати в якості керованих магнітним полем смугозагороджувачів (режекторних) фільтрів, в генеруючих пристроях.

Можливе проведення подальшої роботи щодо удосконалення параметрів отриманих композиційних резонаторів. Як було сказано вище, феритова компонента мусить мати значну величину намагніченості насичення та низькі магнітні втрати, додатковим фактором, що впливатиме на діапазон переналаштування частоти, є співвідношення між об'ємами діелектричного матеріалу й фериту.

Надійшла до редакції 21 лютого 2017 р.

Література:

1. Wang C., Zaki Kawthar A. Dielectric resonators and filters // IEEE Microwave Magazine. – 2007 – 8, issue 5 – P. 115-127 DOI: [10.1109/MMM.2007.903648](https://doi.org/10.1109/MMM.2007.903648).
2. Kajfez D. Dielectric resonators 2nd ed. / Kajfez D., Guillon P. – Atlanta: Noble Publishing Corporation, 1998. ISBN-10: 1884932053
3. Tsui J.B.Y. Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications / Tsui J.B.Y. – New York: Wiley, 1986.
4. Kudsia, Cameron R., and Tang W.-C. Innovations in microwave filters and multiplexing networks for communications satellite systems // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – June 1992 – 40 (6) – P. 1133-1149, DOI: [10.1109/22.141345](https://doi.org/10.1109/22.141345).
5. Fiedziuszko S.J. Trends and evolution of high performance filters (in proc.) // IEEE 2001 MTT-S Int. Microwave Symp, WMG Workshop. – May 2001.
6. Belous A.G., Ovchar O.V., Macek-Krzman M. [et al.] The homogeneity range and the microwave dielectric properties of the BaZn₂Ti₄O₁₁ ceramics // Journal of the European Ceramic Society. – 2006. – 26, №16. – P. 3733-3739 DOI: [j.jeurceramsoc.2005.12.013](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.12.013).
7. Wong P. W. and Hunter I. Electronically Tunable Filters // IEEE Microwave Magazine. – Oct. 2009 – 10, №6 – P. 46-54, DOI: [10.1109/MMM.2009.933593](https://doi.org/10.1109/MMM.2009.933593).
8. Mansour Raafat R. High-Q tunable dielectric resonator filters // IEEE Microwave Magazine. – 2009 – 10, №6, P. 84-98, DOI: [10.1109/MMM.2009.933591](https://doi.org/10.1109/MMM.2009.933591).
9. Krupka J., Abramowicz A., Derzakowski K. Magnetically tunable filters for cellular communication terminals // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2006 – 54 (6) – P. 2329–3335, DOI: [10.1109/TMTT.2006.875268](https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.875268).
10. Соловійова К.Д., Федорчук О.П., Попов М.О., Зависяк І.В., Білоус А.Г. Розробка композиційних магнітокерованих наногетероструктур на основі “товста плівка фериту нікелю зі структурою шпінелі — діелектричний резонатор $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ” // Український хімічний журнал. – 2016 – 82, №5 – С. 10-13.
11. Chen L.F. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization / Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., and Varadan V.K. John –Wiley & Sons, England: Chichester, 2004, ISBN: 978-0-470-84492-2.
12. Von Aulock W., and Rowen J. H. Measurement of Dielectric and Magnetic Properties of Ferromagnetic Materials at Microwave Frequencies // The Bell System Technical Journal. – 1957, №36 (2), с. 427-448, DOI: [10.1002/j.1538-7305.1957.tb02405.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1957.tb02405.x).



13. А.с. 1021120 СССР, М. КЛ.3 С 04 В 35/46. Шихта для виготовлення термостабільного керамічного діелектрика / В.Г. Цикалов, В.М. Пашков, В.П. Бовтун (СССР). – № 3286870; заяв. 04.05.81; опубл. 01.02.83.

УДК 537.635

Федорчук А. П., к.т.н., OrcID [0000-0002-3917-6711](https://orcid.org/0000-0002-3917-6711)

e-mail alex1377c9@gmail.com

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Попов М. А., к.ф.-м.н., OrcID [0000-0003-3509-7108](https://orcid.org/0000-0003-3509-7108)

e-mail maxim_popov@univ.kiev.ua

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка

МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ «ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР / ПЛЕНКА ФЕРРИТА»

Разработано управляемые магнитным полем композиционные резонаторы на основе диэлектрического материала тетратитаната бария, легированного оксидом цинка, и феррита никеля со структурой шпинели. Приведены теоретические соображения, касающиеся возможности создания подобных элементов, критериев выбора материалов. Исследованы характеристики передачи полученных композиционных резонаторов. Показано влияние магнитного поля на поглощение энергии элементом в резонансе, на резонансную частоту. Определены ориентировочные значения добротности полученных композиционных резонаторов, созданных методом трафаретной печати.

Библ. 13, рис. 3.

Ключевые слова: тетратитанат бария; феррит никеля; композиционная структура; резонатор; техника СВЧ.

UDC 537.635

Fedorchuk O. P., PhD, OrcID [0000-0002-3917-6711](https://orcid.org/0000-0002-3917-6711)

e-mail alex1377c9@gmail.com

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute"

Popov M. A., PhD, OrcID [0000-0003-3509-7108](https://orcid.org/0000-0003-3509-7108)

e-mail maxim_popov@univ.kiev.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv

MAGNETICALLY TUNED COMPOSITE ELEMENTS ON THE BASE OF THE SYSTEM «DIELECTRIC RESONATOR / FERRITE FILM»

Magnetically tuned composite resonators on the base of doped with zinc oxide barium tetratitanate and a nickel ferrite with spinel structure were obtained. Theoretical considerations about a possibility of such elements creation, material choice criteria were given. Transmission characteristics of obtained composite resonators were investigated. The influence of magnetic field on an element energy absorption in the resonance and resonant frequency were shown. Q-factor values of obtained by screen printing method composite resonators were defined.

Reference 13, figures 3.

Keywords: barium tetratitanate; nickel ferrite; composite structure; resonator; microwave technics.

References:

- [1]. Wang C., Zaki Kawthar A., "Dielectric resonators and filters", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 8, issue 5, P. 115-127, 2007 DOI: [10.1109/MMM.2007.903648](https://doi.org/10.1109/MMM.2007.903648).



- [2]. Kajfez D., Guillon P., *Dielectric resonators 2nd ed.*. Atlanta: Noble Publishing Corporation, 1998. ISBN-10: 1884932053
- [3]. Tsui J.B.Y., *Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications*. New York: Wiley, 1986.
- [4]. Kudsia, Cameron R., and Tang W.-C., "Innovations in microwave filters and multiplexing networks for communications satellite systems", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol.40 issue 6, P. 1133-1149, June 1992 DOI: [10.1109/22.141345](https://doi.org/10.1109/22.141345).
- [5]. Fiedziuszko S.J., "Trends and evolution of high performance filters" (in proc.), presented at IEEE 2001 MTT-S Int. Microwave Symp., WMG Workshop, May 2001.
- [6]. Belous A.G., Ovchar O.V., Macek-Krzman M. [et al.], "The homogeneity range and the microwave dielectric properties of the BaZn₂Ti₄O₁₁ ceramics" *Journal of the European Ceramic Society*, vol.26, №16, P. 3733-3739, 2006, DOI: [j.jeurceramsoc.2005.12.013](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.12.013).
- [7]. Wong P. W. and Hunter I., "Electronically Tunable Filters", *IEEE Microwave Magazine*, vol.10, №6, P. 46-54, Oct. 2009, DOI: [10.1109/MMM.2009.933593](https://doi.org/10.1109/MMM.2009.933593).
- [8]. Mansour Raafat R., "High-Q tunable dielectric resonator filters", *IEEE Microwave Magazine*, vol.10, №6, 2009, P. 84-98, DOI: [10.1109/MMM.2009.933591](https://doi.org/10.1109/MMM.2009.933591).
- [9]. Krupka J., Abramowicz A., Derzakowski K., "Magnetically tunable filters for cellular communication terminals", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol.54, issue 6, P. 2329–3335, 2006 DOI: [10.1109/TMTT.2006.875268](https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.875268).
- [10]. Soloviova E.D., Fedorchuk A.P., Popov M.A., Zavislyak I.V., Belous A.G., "Development the composite magnetically heterostructures based on "thick film of spinel nickel ferrite - dielectric resonator α -Al₂O₃", *Ukrainian Chemistry Journal*, vol.82, №5, P. 10-13, 2016 (Rus).
- [11]. Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., and Varadan V.K. John, *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*, Wiley & Sons, England: Chichester, 2004, ISBN: 978-0-470-84492-2.
- [12]. Von Aulock W., and Rowen J. H., "Measurement of Dielectric and Magnetic Properties of Ferromagnetic Materials at Microwave Frequencies", *The Bell System Technical Journal*, vol.36, issue 2, P. 427-448, 1957, DOI: [10.1002/j.1538-7305.1957.tb02405.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1957.tb02405.x).
- [13]. 1W. G. Tsykalov, W. M. Pashkov, W.P. Bovtun, "The Batch for thermostable ceramic dielectric producing", USSR Patent, 3286870, publ. February 1, 1983.