

А.А. Ащеулов, д.т.н., проф.
Інститут термoeлектрики НАН і МОН України
М.Я. Дерев'янчук, аспірант
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Особливості анізотропного конденсатора

Конденсатори є ключовими компонентами сучасних інфокомунікаційних систем завдяки їх здатності зберігати та фільтрувати електричний заряд. Вони забезпечують стабільну роботу електронних схем, згладжуючи пульсації напруги та усуваючи високочастотні шуми. У фільтрах конденсатори допомагають вибирати або блокувати певні частоти, що є важливим для підтримки чіткого та безперебійного зв'язку. Крім того, конденсатори відіграють важливу роль у резонансних підсилювачах і антенних системах, де вони допомагають підсилювати сигнали на різних частотах і підвищувати ефективність передачі та прийому даних.

У цьому дослідженні проведено порівняльний аналіз можливостей конденсаторів з ізотропного та анізотропного уніполярних діелектричних матеріалів. В обох випадках досліджено залежність частоти f_r від фізичних характеристик матеріалу, таких як коефіцієнт заломлення n та геометричні розміри пластини $a \times b \times c$. Встановлено, що, на відміну від конденсатора з ізотропного матеріалу, анізотропний уніполярний діелектричний конденсатор характеризується наявністю двох резонансних частот $f_{r\parallel}$ та $f_{r\perp}$, що значно розширює можливості його практичного застосування.

Використання конденсаторів із двома резонансними частотами дозволяє створювати складніші фільтри та системи, які можуть працювати на кількох частотних діапазонах, що є критично важливим для сучасних багаточастотних телекомунікаційних мереж. Використання цієї особливості конденсаторів буде корисним для мобільних пристроїв, які мають підтримувати різні стандарти зв'язку (Wi-Fi, Bluetooth, LTE, 5–6G).

Ключові слова: тензор; діелектрична проникність; анізотропія; резонанс; конденсатор; електронні засоби; мобільний зв'язок; інфокомунікаційна система.

Актуальність теми. Дослідження особливостей анізотропного конденсатора набуває все більшої актуальності у зв'язку зі швидким розвитком телекомунікаційних систем та радіoeлектроніки. Сучасні мобільні пристрої, що підтримують різні стандарти зв'язку, такі як LTE, 5–6G, Wi-Fi та Bluetooth, потребують ефективних компонентів для роботи в різних частотних діапазонах. Конденсатори з двома резонансними частотами відкривають нові можливості для створення багатосмугових фільтрів і підсилювачів, що забезпечують стабільний та надійний зв'язок у широкому діапазоні частот.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Конструювання конденсаторів з двома резонансними частотами та їх дослідження можуть значно покращити характеристики електронних систем, зокрема в галузях високочастотної електроніки та радіотехніки. Останні публікації з цієї тематики зосереджуються на розробках, які дозволяють досягти стабільних подвійних резонансних частот, а також на аналізі їхніх застосувань у різних пристроях.

Дослідженням подвійних, гібридних резонансних частот приділяють увагу як українські, так і зарубіжні науковці. У [1] українськими науковцями було досліджено гібридний резонанс у структурі, що складається з резонатора з розрізаним кільцем (SRR) і фериту. Дослідження показало наявність кількох піків резонансу поблизу основної резонансної частоти SRR. Запропонована гібридна резонансна структура може бути використана в різних телекомунікаційних системах, де потрібне точне налаштування частот для поліпшення продуктивності.

У [2] описано систематичний підхід до проектування імпульсних трансформаторів з подвійним резонансом. Зокрема, трансформатори з двома спіральними коаксіальними котушками на циліндричних обмотках показали високу ефективність передачі сигналів завдяки точному налаштуванню параметрів геометрії та індуктивності. Така конструкція може бути застосована в радіочастотних комунікаціях і енергетичних системах, де важливими є стабільність та точність передачі імпульсних сигналів.

У дослідженні [3] розглядається розробка антенної системи, здатної працювати на частотах 2,4 і 5,2 ГГц. Висока ефективність і можливість варіювання резонансних частот незалежно робить цю антену перспективною для інтеграції в мобільні пристрої, такі як ноутбуки і смартфони. Перевагою цієї технології є можливість одночасного використання кількох частот без необхідності встановлення окремих антен для кожної частоти, що значно спрощує конструкцію.

Особливий інтерес викликає дослідження [4], яке демонструє використання метаматеріалів для підвищення ширини смуги поглинання. Використання подвійного резонансу дозволило досягти 90 % поглинання у діапазоні 0,5 ГГц, що є значним досягненням у сфері електромагнітного захисту. Завдяки симетричній структурі метаматеріал є нечутливим до поляризації, що розширює його можливості для застосування в захисних системах, зокрема у військових і радіолокаційних технологіях.

Таким чином, дослідження в галузі подвійного резонансу демонструють значні переваги у різних сферах застосування. Використання подвійного резонансу в матеріалах і конструкціях, зокрема і в конденсаторах, дає змогу підвищити ефективність, зменшити втрати і розширити функціональні можливості пристроїв, що є критично важливим для сучасних телекомунікаційних, енергетичних і захисних систем. Подальші дослідження в цьому напрямі можуть призвести до ще більш ефективних і стабільних електронних компонентів, які відповідатимуть зростаючим вимогам сучасних технологій.

Метою статті є дослідження особливостей конденсаторів з анізотропного уніполярного діелектричного матеріалу.

Викладення основного матеріалу. У даний час широко розповсюджені електричні конденсатори різних конструкцій. У класичному вигляді такий конденсатор являє собою діелектричну пластину 1 у формі прямокутного паралелепіпеда довжиною a , висотою b та шириною c ($a \cong c \gg b$) з ізотропного діелектричного матеріалу, діелектрична проникність якого дорівнює ε_1 (рис. 1). Верхня та нижня грані цієї пластини $a \times c$ містять електропровідні шари 2, до яких під'єднано електропідводи 3. Як відомо, ємність C такого класичного конденсатора подається таким виразом [5]

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{ac}{b}, \quad (1)$$

де ε_0 – діелектрична проникність вакууму.

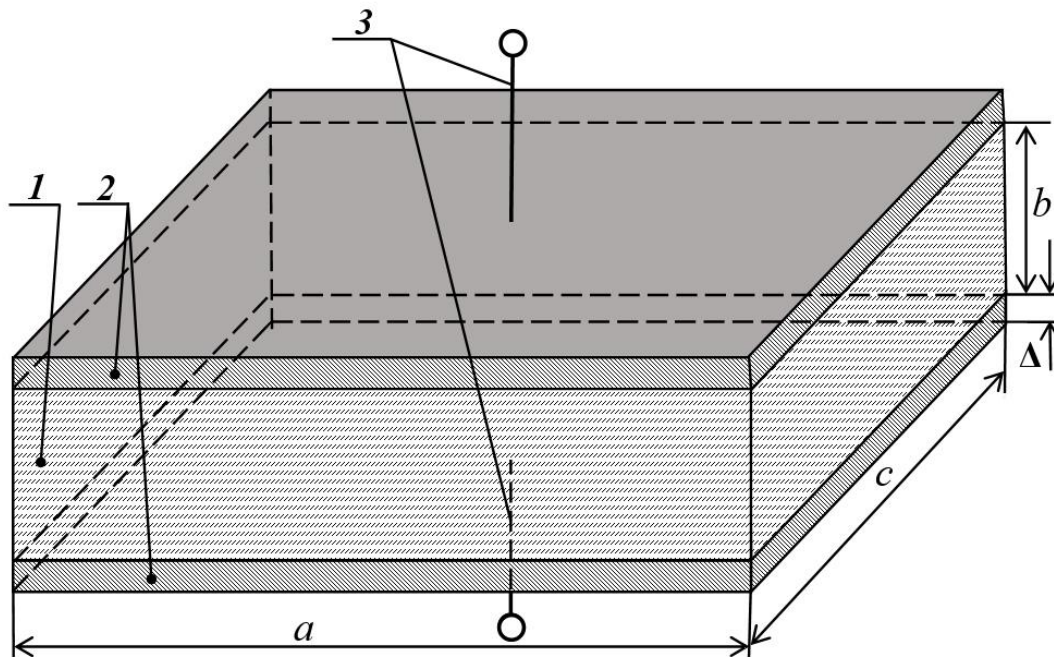


Рис. 1. Конструкція ізотропного конденсатора
(1 – пластинка, 2 – електропровідні шари, 3 – електропідводи)

Подача до електропідводів 3 деякої напруги U з частотою f_0 веде до відповідної зарядки конденсатора, який акумулює енергію ω ,

$$\omega = \frac{CU^2}{2}. \quad (2)$$

Ця енергія обумовлює виникнення між верхніми та нижніми електропровідними шарами сили \vec{F} , яка відома, як сила Кулона [6]:

$$\vec{F} = \frac{CU^2}{2b} = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{ac}{2b^2} U^2. \quad (3)$$

Таким чином, величина сили \vec{F} , з якою верхні та нижні електропровідні шари притягаються одна до одної, пропорційна як величині ємності конденсатора C , так і квадрату електричної напруги U . Вектор цієї сили напрямлений перпендикулярно площині електропровідних шарів $a \times c$. За умови $a \gg b$, поперечної складової сили \vec{F} у об'ємі пластини I немає. Власна резонансна частота f_r такого ізотропного конденсатора, виконаного у вигляді прямокутного паралелепіпеда, розраховується за таким виразом [7]:

$$f_r = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_1}} \sqrt{\left(\frac{n_x}{a}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{b}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{c}\right)^2}, \quad (4)$$

де: f_r – резонансна частота для індексів n_x, n_y, n_z ;

c_0 – швидкість світла у вакуумі;

ϵ_1 – відносна діелектрична проникність матеріалу;

a, b, c – розміри сторін прямокутного паралелепіпеда;

n_x, n_y, n_z – індекси моди коливань (натуральні числа: 0, 1, 2, ...), визначають кількість напівхвиль електромагнітного поля, що вміщаються вздовж відповідних сторін a, b, c .

Таким чином, власна частота конденсатора пластини I , яка виконана з ізотропного діелектричного матеріалу, визначається як коефіцієнтом заломлення $n = \sqrt{\epsilon_1}$, так і геометричними розмірами пластини $a \times b \times c$.

Інша ситуація складається у випадку застосування як матеріалу пластини I анізотропного уніполярного діелектрика [8], коефіцієнти діелектричної проникності $\hat{\epsilon}$ якого у головних кристалографічних осях OX, OY, OZ представляються тензором другого рангу [9].

$$\hat{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

де $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}$ – значення коефіцієнтів у головних кристалографічних осях OX, OY, OZ відповідно.

Якщо пластину I виконати таким чином, щоб вибрані головні кристалографічні осі OX та OY , які розташовано у площині бічної грані $a \times b$ пластини I , зорієнтувати під деяким кутом γ (рис. 2), то тензор $\hat{\epsilon}$ (5) набуває такого вигляду [10]:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{vmatrix} \epsilon_{11} \cos^2 \gamma + \epsilon_{22} \sin^2 \gamma & (\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma & 0 \\ (\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma & \epsilon_{11} \sin^2 \gamma + \epsilon_{22} \cos^2 \gamma & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

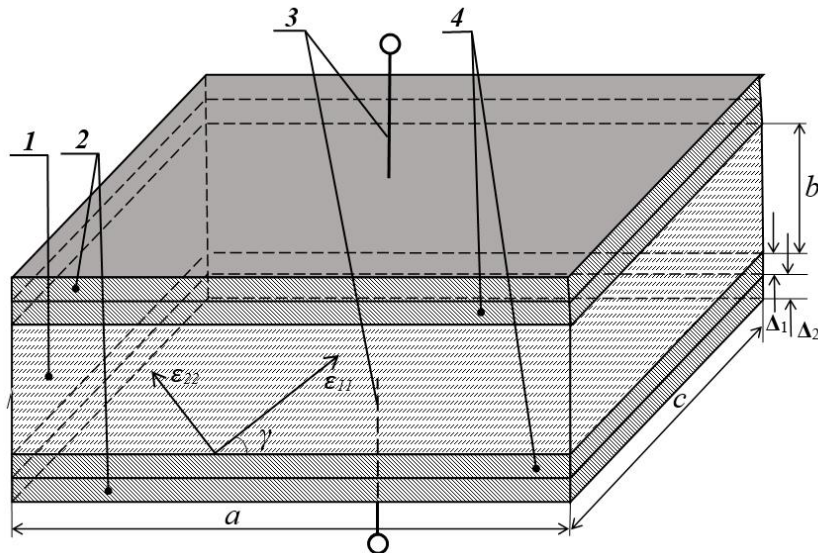


Рис. 2. Конструкція анізотропного уніполярного конденсатора
(1 – пластини, 2 – електропровідні шари, 3 – електроізолятори, 4 – тонкі діелектричні шари)

Таке розміщення осей веде до виникнення як поздовжньої ϵ_{\parallel} , так і поперечної ϵ_{\perp} складових тензора діелектричної проникності [11]:

$$\epsilon_{\parallel} = \epsilon_0 (\epsilon_{11} \cos^2 \gamma + \epsilon_{22} \sin^2 \gamma), \quad (7)$$

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_0 (\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma. \quad (8)$$

При цьому у випадку, де розглядаються верхня та нижня грані $a \times c$ містять послідовно розташовані електропровідні шари 2 (товщиною $\Delta_1 \ll b$) та діелектричні ізолюючі шари 4 (товщина $\Delta_2 \ll b$) з діелектричною проникністю ε .

Окремо варто зауважити, що шари 4 введено для попередження електричного закорочення поперечної складової електрорушійної сили (ЕРС) пластини U_{\perp} , яка виникає в об'ємі пластини 1.

Прикладання напруги U синусоїдальної форми між електропідводами 3 веде до виникнення в об'ємі пластини 1 як поздовжньої \vec{E}_{\parallel} , так і поперечної \vec{E}_{\perp} складових електричного поля \vec{E} .

$$\vec{E}_{\parallel} = \frac{U}{b} \varepsilon_{\parallel}, \quad (9)$$

$$\vec{E}_{\perp} = \frac{U}{b} \varepsilon_{\perp}. \quad (10)$$

Коефіцієнт m поперечно-поздовжнього перетворення електричного поля такого анізотропного уніполярного конденсатора у цьому випадку виглядає таким чином [12]:

$$m = \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}} = \frac{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma}{\varepsilon_{11} \cos^2 \gamma + \varepsilon_{22} \sin^2 \gamma}. \quad (11)$$

Електрична енергія такого конденсатора також характеризується наявністю 2-х складових поздовжньою w_{\parallel} і поперечною w_{\perp} :

$$w_{\parallel} = 0,5 \varepsilon_{\parallel} \frac{ac}{b} U^2 = 0,5 \varepsilon_0 (\varepsilon_{11} \cos^2 \gamma + \varepsilon_{22} \sin^2 \gamma) \frac{ac}{b} U^2, \quad (12)$$

$$w_{\perp} = 0,5 \varepsilon_{\perp} \frac{bc}{a} U^2 = 0,5 \varepsilon_0 (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma \frac{bc}{a} U^2. \quad (13)$$

При цьому пластина характеризується наявністю 2-х складових електричної енергії, як поздовжньої w_{\parallel} , так і поперечної w_{\perp} і складових сил кулона \vec{F}_{\parallel} і \vec{F}_{\perp} :

$$\vec{F}_{\parallel} = 0,5 \varepsilon_{\parallel} \frac{ac}{b^2} U^2 = 0,5 \varepsilon_0 (\varepsilon_{11} \cos^2 \gamma + \varepsilon_{22} \sin^2 \gamma) \frac{ac}{b^2} U^2, \quad (14)$$

$$\vec{F}_{\perp} = 0,5 \varepsilon_{\perp} \frac{bc}{a^2} U^2 = 0,5 \varepsilon_0 (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma \frac{bc}{a^2} U^2. \quad (15)$$

Підкреслимо, що \vec{F}_{\parallel} розміщено перпендикулярно площині $a \times c$ пластини 1, а складова \vec{F}_{\perp} напрямлена вздовж довжини a . Таким чином у об'ємі пластини конденсатора з анізотропного уніполярного діелектрика виникають складові поздовжньої \vec{F}_{\perp} і паралельної \vec{F}_{\parallel} сил Кулона.

У цьому випадку, на відміну від пластини з ізотропного діелектрика, анізотропний уніполярний конденсатор характеризуватиметься наявністю двох резонансних частот $f_{r\parallel}$ і $f_{r\perp}$:

$$f_{r\parallel} = \frac{c_0 \varepsilon_0}{2} \left((\varepsilon_{11} \cos^2 \gamma + \varepsilon_{22} \sin^2 \gamma) \left(\left(\frac{n_x}{a} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{b} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{c} \right)^2 \right) \right)^{1/2}, \quad (16)$$

$$f_{r\perp} = \frac{c_0 \varepsilon_0}{2} \left(((\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma) \left(\left(\frac{n_x}{a} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{b} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{c} \right)^2 \right) \right)^{1/2}. \quad (17)$$

Окремо варто зауважити, що вибір довжини a та висоти b пластини 1 у кінцевому підсумку визначається необхідним значенням частот $f_{r\parallel}$ та $f_{r\perp}$, які вибираються кратному частоті f_0 напрузі U , яка подається на електропідводи 3:

$$a = 2kb \sqrt{\varepsilon_{\parallel} / \varepsilon_{\perp}}, \quad (18)$$

де k – ціле додатне число ($n = 1, 2, 3, \dots$).

На відміну від ізотропного конденсатора анізотропний уніполярний конденсатор характеризується наявністю 2-х резонансних частот, що значно розширює можливості його практичного застосування. Окремо варто зауважити, що сила Кулона, яка виникає як в ізотропному так і анізотропному конденсаторах, зовнішньої роботи виконувати не спроможна.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Використання конденсаторів з двома резонансними частотами в телекомунікаційних системах відкриває нові можливості для покращення якості та ефективності зв'язку. Такі конденсатори дозволяють створювати складніші й ефективніші фільтри, здатні одночасно обробляти кілька частотних діапазонів. Це особливо важливо для сучасних мобільних пристроїв, що підтримують різні стандарти зв'язку, такі як LTE і 5–6G. Крім того, конденсатори з наявністю двох резонансних частот можуть покращити продуктивність резонансних підсилювачів та антенних систем,

забезпечуючи стабільне підсилення та ефективну передачу сигналів на різних частотах. Впровадження таких конденсаторів у окремі елементи телекомунікаційних мереж сприятиме розвитку більш гнучких та продуктивних інфокомунікаційних систем, що відповідатимуть сучасним вимогам.

References:

1. Chornyi, V.S., Skripka, S.L., Lenyk, B.Y. et al. (2019), «Hybrid Resonance in the Split-Ring Resonator/Ferrite Structure in the C-Band», *Ukrainian Journal of Physics*, Vol. 61, No. 8, 727 p., doi: 10.15407/ujpe61.08.0732.
2. Shotts, Z., Rose, F., Merryman, S. and Kirby, R. (2005), «Design Methodology for Dual Resonance Pulse Transformers», *2005 IEEE Pulsed Power Conference*, Monterey, CA, USA, pp. 1117–1120, doi: 10.1109/PPC.2005.300516.
3. Itakura, A., Okano, Y. and Abe, M. (2005), «A study on double resonance H-type slot antenna», *Electronics and Communications in Japan. Part I. Communications*, Vol. 88, pp. 11–20, doi: 10.1002/ecja.20148.
4. Nguyen, T.T. and Lim, S. (2017), «Bandwidth enhancement of metamaterial absorber using double resonance», *IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 380–382, doi: 10.1109/APMC.2017.8251459.
5. Tamm, I.E. (1991), *Fundamentals of the Theory of Electricity*, 2nd English ed., Mir Publishers, Berlin, 630 p.
6. Jackson, J.D. (1999), *Classical Electrodynamics*, Wiley, New York.
7. Lorrain, P. and Corson, D.R. (2004), *Electromagnetic Fields and Waves*, W.H. Freeman and Company, New York, 384 p.
8. Ashcheulov, A.A., Derevianchuk, M.Ya., Lavreniuk, D.O. and Romaniuk, I.S. (2021), *Anizotropnyi dielektrychnyi material*, Patent Ukrainy, No. 145889, Byul. No. 1.
9. Nye, J.F. (1985), *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*, Oxford University Press, Oxford, 329 p.
10. Anatychuk, L.I. (1998), *Thermoelectricity*, Vol. 1. Physics of Thermoelectricity, Institute of Thermoelectricity, Kyiv, Chernivtsi.
11. Ashcheulov, A.A., Derevianchuk, M.Ya. and Lavreniuk, D.O. (2023), «Vykhori z laminarni i turbulentni kharakteramy techii v anizotropnykh seredovyschakh», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (91), pp. 242–248, doi: 10.26642/ten-2023-1(91)-242-248.
12. Ashcheulov, A.A., Verenko, O.S., Derevianchuk, M.Ya. and Lavreniuk, D.O. (2023), «Vplyv vykhrovykh strumiv na parametry anizotropnoho unipoliarnoho termoelementa», *Sensorna elektronika i mikrosystemni tekhnologii*, Vol. 20, No. 4, pp. 45–52, doi: 10.18524/1815-7459.2023.4.294630.

Ащеулов Анатолій Анатолійович – доктор технічних наук, професор Інституту термоелектрики НАН і МОН України.

<https://orcid.org/0000-0002-3195-6342>.

Наукові інтереси:

- термоелектричні явища в анізотропних середовищах та їх практичне застосування;
- розробка та впровадження в промисловість пристроїв та приладів, що працюють на основі термоелектричних явищ в анізотропних середовищах; метаматеріали.

Дерев'яничук Микола Ярославович – аспірант кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

<https://orcid.org/0000-0001-7218-1451>.

Наукові інтереси:

- термоелектричні явища в анізотропних середовищах та їх практичне застосування;
- модернізація елементів інфокомунікаційних систем;
- дослідження нелінійних коливних систем; метаматеріали.

Ashcheulov A.A., Derevianchuk M.Ya.

Features of the anisotropic capacitor

The proposed methods of magnetic field concentration will be used in electrical engineering, radio engineering, metrology and other related fields. Capacitors are key components in modern infocommunications systems due to their ability to store and filter electric charge. They ensure the stable operation of electronic circuits by smoothing voltage fluctuations and eliminating high-frequency noise. In filters, capacitors help select or block certain frequencies, which is important for maintaining clear and uninterrupted communication. Additionally, capacitors play a crucial role in resonant amplifiers and antenna systems, where they help amplify signals at various frequencies and enhance the efficiency of data transmission and reception. This study provides a comparative analysis of the capabilities of capacitors made from isotropic and anisotropic unipolar dielectric materials. In both cases, the dependence of the resonant frequency f_r on the physical properties of the material, such as the refractive index nmn and the geometric dimensions of the plate $a \times b \times c$, was investigated. It was found that, unlike capacitors made from isotropic materials, anisotropic unipolar dielectric capacitors are characterized by the presence of two resonant frequencies $f_{r\parallel}$ and $f_{r\perp}$, which significantly expands their practical applications. The use of capacitors with two resonant frequencies allows for the creation of more complex filters and systems capable of operating across multiple frequency bands, which is critically important for modern multi-frequency telecommunication networks. The application of this feature in capacitors will be beneficial for mobile devices that need to support various communication standards (Wi-Fi, Bluetooth, LTE, 5G-6G).

Keywords: tensor; dielectric permittivity; anisotropy; resonance; capacitor; electronic means; mobile service; infocommunication system.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2024.