

УДК 621.382.383

Шмигін Д. А., асистент; Татарчук Д. Д., к.т.н.

(Національний технічний університет України «КПІ». +8(050) 444-83-26. d.shmygin@gmail.com)

ТЕРМОСТАБІЛЬНІСТЬ КОЛИВАЛЬНИХ НВЧ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ

Шмигін Д. А., Татарчук Д. Д. Термостабільність коливальних НВЧ систем на основі діелектричних резонаторів. Розглянуто методику розрахунку та експериментальні дослідження температурно-стабільної коливальної системи, заснованої на використанні складеного діелектричного резонатора (ДР) з поперечними діелектричними включеннями. Наводяться результати моделювання системи та методики розрахунку таких структур. Одним з можливих рішень підвищення термостабільності коливальних систем на основі ДР є використання складеного діелектричного резонатора (СДР) з поперечними діелектричними включеннями, як компенсуючого елемента. Використання в СДР як поперечного діелектричного включення регульованого повітряного зазору дозволяє отримати перебудову резонансних частот в широких межах при збереженні високої добротності коливальної системи. Перевагою таких конструкцій є відсутність складних термокомпенсуючих систем, простота і технологічність у виготовленні.

Ключові слова: складений діелектричний резонатор, коливальна система, резонансна частота, НВЧ система, термостабільність, добротність

Шмыгин Д. А., Татарчук Д. Д. Термостабильность колебательных систем СВЧ на основе диэлектрических резонаторов. Рассмотрена методика расчета и экспериментальные исследования температурно-стабильной колебательной системы, основанной на использовании составного диэлектрического резонатора (ДР) с поперечными диэлектрическими включениями. Приводятся результаты моделирования системы и методики расчета таких структур. Одним из возможных решений повышения термостабильности колебательных систем на основе ДР является использование составного диэлектрического резонатора (СДР) с поперечными диэлектрическими включениями, как компенсирующего элемента. Использование в СДР в качестве поперечного диэлектрического включения регулируемого воздушного зазора позволяет получить перестройку резонансных частот в широких пределах при сохранении высокой добротности колебательной системы. Преимуществом таких конструкций является отсутствие сложных термокомпенсирующих систем, простота и технологичность в изготовлении.

Ключевые слова: составной диэлектрический резонатор, колебательная система, резонансная частота, СВЧ система, термостабильность, добротность

Shmyhin D. A., Tatarchuk D. D. Thermal stability of oscillatory systems based on microwave dielectric resonator. The method of calculation and experimental studies of the temperature-stable oscillating system based on the use of the composite dielectric resonator (DR) with transverse dielectric inclusions are discussed. The method of calculation and results simulation of such structures was reviewed. One possible solution to improve the thermal stability of oscillatory systems based DR is to use a split dielectric resonator (SDR) with transverse dielectric inclusions as compensating element. Using the SDR with a cross-dielectric adjustable air gap provides a shift of resonant frequencies over a wide range while maintaining the high quality factor of the oscillating system. The advantage of such constructions is the absence of the complex temperature-compensated systems, simplicity and technological effectiveness in production.

Keywords: split dielectric resonator, oscillating system, resonant frequency, microwave system, thermal stability, high quality factor

Вступ. Основні вимоги до сучасних компонентів телекомунікаційних систем – компактність, низька собівартість, висока стабільність частотних характеристик. В даний час мініатюризація коливальних систем надвисоких частот (НВЧ) базується, головним чином, на використанні діелектриків із високою проникністю у якості середовища передачі енергії НВЧ. Як відомо мініатюрні коливальні системи, побудовані на основі діелектричних резонаторів (ДР) мають широке застосування в техніці НВЧ. ДР використовують як елементи частотно-селективних систем, генераторів НВЧ коливальних, антенних і вимірювальних приладів [1]. Стабільність резонансних характеристик приладів на основі ДР досягається за рахунок високої власної добротності ДР як елемента коливальної системи.

В даний час відомий ряд термостабільних СВЧ діелектриків з проникністю $\epsilon \geq 80$ для застосувань в дециметровому і метровому діапазоні довжин хвиль, однак фактор добротності

виготовлених з них діелектричних резонаторів (ДР) не перевищує величини $Q \times F \leq 8000$, причому з підвищенням величини ϵ цей параметр знижується. У цьому відношенні такі матеріали значно поступаються іншій групі СВЧ діелектриків з величиною $\epsilon = 20 \dots 40$.

Для ряду технічних застосувань необхідні діелектричні резонатори, що виготовлені з матеріалів з $\epsilon \geq 80$, що мають велику добротність. Високодобротні діелектричні матеріали з великою ϵ відомі – це параелектрики TiO_2 , CaTiO_3 , KTaO_3 , SrTiO_3 , а також композиції на їх основі [2]. Однак в таких матеріалах не вдається компенсувати температурні параметри до прийнятних для практичного застосування значень температурного коефіцієнта частоти (ТКЧ) без істотного зниження добротності.

У роботі показано, що в параелектриках і композиціях на основі можна істотно знизити величину ТКЧ без застосування дорогих і дефіцитних компонентів. При цьому добротність ДР, виготовлених з них, що не знижується, а в деяких випадках і збільшується. Нижче описується можливість термостабілізації коливальних систем НВЧ на основі багат шарових діелектричних структур, без зниження їх добротності і практично без збільшення їх габаритів.

Основна частина. Термостабільність ДР аналогічно до інших резонансних елементів кількісно характеризується температурними коефіцієнтами частоти TK_f і добротності TKQ_0 . Основний принцип термостабілізації полягає в компенсації зсуву резонансної частоти ДР внаслідок варіації лінійних розмірів і діелектричної проникності матеріалу при зміні температури. Лінійне розширення матеріалу збільшує геометричні розміри резонатора, що призводить до зменшення значення резонансної частоти [3].

Запропонований метод термостабілізації оснований на застосуванні складеного діелектричного резонатора (СДР) [4]. На Рис. 1 наведені приклади СДР у варіанті циліндричної та прямокутної форми.

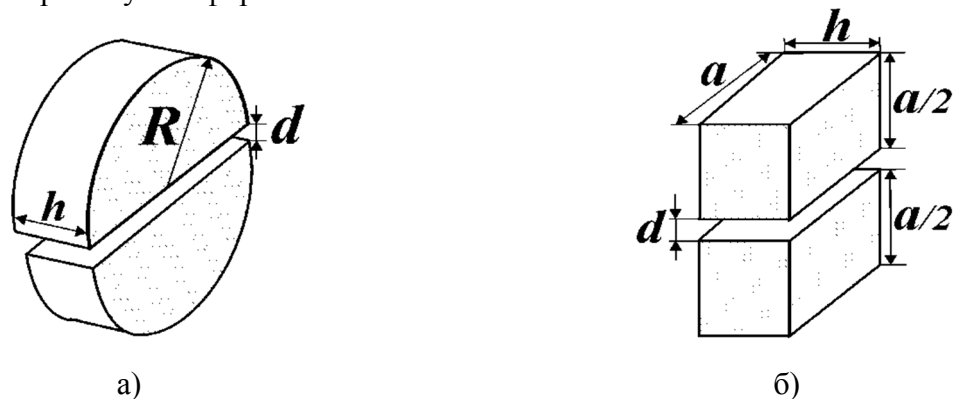


Рис. 1. Складені діелектричні резонатори, виконані у формі:
а) циліндра; б) прямокутного паралелепіпеда

Особливістю СДР є наявність керованого повітряного зазору d між двома діелектричними частинами резонатора в площині, перпендикулярній електричній складовій поля для основного типу колювання. Резонансна частота такого типу резонатора є функцією величини повітряного зазору [5]. Для резонаторів довільної форми рішення характеристичних рівнянь, що визначають дійсні власні значення коливальної системи без втрат, в загальному випадку не може бути отримано в аналітичному вигляді.

Розрахунок структур на основі СДР з поперечними діелектричними включеннями представляє значні труднощі у зв'язку з тим, що існуючі методи розрахунку СДР з поздовжніми включеннями базується на наближеннях звичайних ДР і неприйнятні для резонаторів з неоднорідністю в поперечному перерізі. Наявність некоординатних поверхонь розділу не дозволяє знайти власні функції під областей методом поділу змінних, що значно ускладнює вирішення задачі про власні колювання таких резонаторів. Тому рішення шукалося на основі комбінації методів часткових областей і колокацій [6].

Завдяки симетрії завдання розпадається на окремі випадки, коли площинам $x = 0$, $y = 0$ відповідають або електричні, або магнітні стінки (Рис.2).

$$\vec{n} \times \vec{E} = 0, \vec{n} \cdot \vec{H} = 0;$$

$$\vec{n} \cdot \vec{E} = 0, \vec{n} \times \vec{H} = 0.$$

Рішення даної задачі знаходилося як рішення системи рівнянь, утворених розкладанням поздовжнього електричного і магнітного векторів Герца в кожній з часткових областей 1, 2, 3 (Рис. 2) у вигляді :

$$\Gamma_i^{e(m)} = \sum_{m=0}^{\infty} A_{im}^{e(m)} Z_{i(m)}^{e(m)}(z) \Phi_i^{e(m)}(x, y)$$

де $A_{im}^{e(m)}$ – невизначені коефіцієнти; $\Phi_i^{e(m)}(x, y)$ – мембранні функції;

$Z_{i(m)}^{e(m)}(z)$ – власні функції областей.

Функції $Z_{i(m)}^{e(m)}(z)$ повинні задовольняти відповідним однорідним рівнянням Гельмгольца

$$\nabla^2 \bar{\Gamma}^{e(m)} + \epsilon \kappa^2 \bar{\Gamma}^{e(m)} = 0,$$

та граничним умовам на електричних стінках і умовам безперервності тангенціальних складових на межі розділу середовищ з різними значеннями відносної діелектричної проникності ϵ .

В результаті чисельного рішення рівнянь отримані номограми залежностей параметрів СДР від різних параметрів (Рис. 3).

На Рис. 4 наведено теоретичні та експериментальні залежності резонансної частоти від величин повітряного зазору d . Параметри дослідженого діелектричного матеріалу : $\epsilon = 85$, фактор добротності $Q \cdot F = 25000$ GHz; $TK\epsilon = 660 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; $\alpha = 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Крутизна зміщення частоти на початковому ділянці становить 14...16 МГц/мкм.

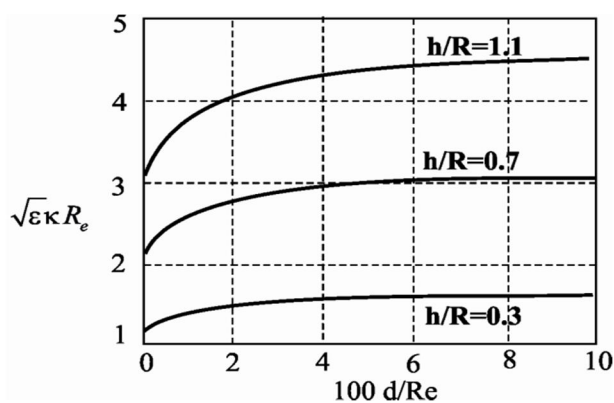


Рис. 3. Розраховані значення нормованого резонансного хвильового числа нижчого типу коливань СДР від нормованої ширини області діелектричного включення, $\epsilon = 80$

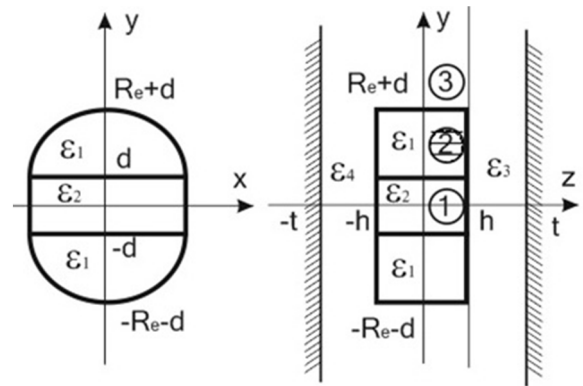


Рис. 2 Круглий СДР з поперечним діелектричним включенням

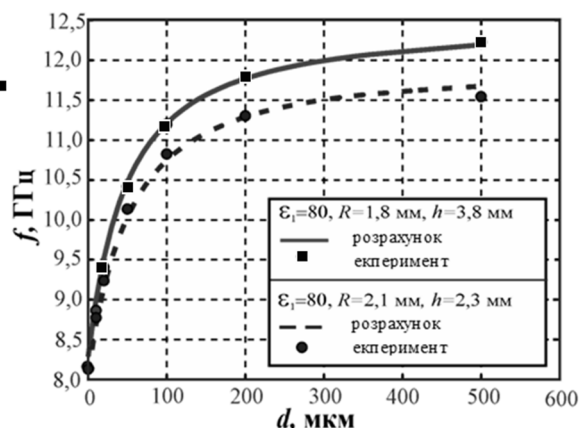


Рис. 4. Залежність вимірної і розрахованої резонансної частоти від взаємної відстані між частинами СДР виконаного у формі циліндра

Слід зауважити, що крутизна залежності $\Delta F/\Delta d$ є складною функцією від частоти, що залежить від діелектричної проникності та розмірів СДР (від співвідношення товщина/діаметр). Останній параметр може змінюватися в досить великих межах. З пониженням частоти крутизна $\Delta F/\Delta d$ зменшується для будь-яких значень ε , причому зі збільшенням ε це зниження повинно бути більш помітним. Дана особливість дещо обмежує застосовність запропонованого методу термокомпенсації з боку верхніх частот.

Співвідношення для визначення температурних коефіцієнтів частоти і добротності СДР можуть бути знайдені з виразу для повної похідної резонансної частоти і добротності по температурі:

$$TKf = S_{\varepsilon_1}^f \cdot TK\varepsilon_1 + S_{\varepsilon_2}^f \cdot TK\varepsilon_2 + S_{l_1}^f \cdot TKl_1 + S_{l_2}^f \cdot TKl_2;$$

$$TKQ_0 = S_{tg\delta_1}^{Q_0} TKtg\delta_1 + S_{tg\delta_2}^{Q_0} TKtg\delta_2 + S_{\delta_m}^{Q_0} TK\delta_m,$$

де $TK\alpha = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial T}$ – температурний коефіцієнт параметра;

$$S_{\beta}^{\gamma} = \frac{\beta}{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial \beta} \quad \text{– чутливість величини } \gamma \text{ до зміни параметра } \beta.$$

Позначимо чутливість зміни резонансної частоти СДР до зміни геометричних розмірів резонатора як величини $S_{l_1}^f$ і $S_{l_2}^f$, які визначаються за допомогою чутливості резонансної частоти до кожного з геометричних параметрів СДР і дорівнюють:

$$\text{для дискового СДР :} \quad S_{l_1}^f = S_R^f + S_h^f;$$

$$\text{для прямокутного СДР :} \quad S_{l_1}^f = S_a^f + S_h^f.$$

Чутливість $S_{l_2}^f$ для випадку $\varepsilon_2/\varepsilon_1 < 1$ і при малих розмірах області діелектричного включення в порівнянні з розмірами основної області визначається як $S_{l_2}^f = S_d^f$

Суть запропонованого нами методу термокомпенсації полягає в наступному: СДР з поперечним діелектричним включенням у вигляді повітряного зазору шириною d поміщається на підкладку з термостабільного в робочому діапазоні температур матеріалу з малими втратами, наприклад кварц (Рис. 5). При цьому краї СДР жорстко закріплені на підкладці. Зміна температури навколишнього середовища ΔT призводитиме лише до зміни ширини повітряного зазору Δ , а відповідно і зміненню резонансної частоти системи.

Знаючи коефіцієнти температурного та лінійного розширення матеріалів СДР і підкладки ($TK\varepsilon$, TKL), а також підбираючи значення Δ , можна домогтися мінімізації ТКЧ резонатора в заданому діапазоні температур.

У рамках нашої математичної моделі (затиснутий СДР з $\varepsilon_2=1$) чутливість визначається в основному тільки чутливістю резонансної частоти до зміни ширини області повітряного включення. Чутливість резонансної частоти до зміни відповідного параметра знаходилася шляхом чисельного диференціювання раніше отриманих залежностей власних частот резонаторів від його параметрів.

Застосування описаного вище методу термокомпенсації дозволяє мінімізувати ТКЧ системи. Експериментальна перевірка була проведена на багатьох зразках СДР. Були випробувані різні способи закріплення половинок резонатора, а також різні клеї, причому варіювалася площа, вкрита клеєм. За певних умов з матеріалу з позитивним ТКЧ можна отримати СДР з негативним ТКЧ.

На Рис. 6 наведено експериментальні характеристики залежності частоти від температури для: 1 – суцільного резонатора; криві 2...6 – СДР з різними способами та матеріалами фіксації СДР на кварцовій підкладці.

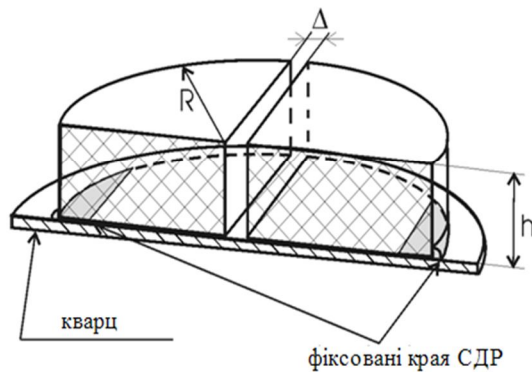


Рис. 5. Конструкція термостабільного СДР

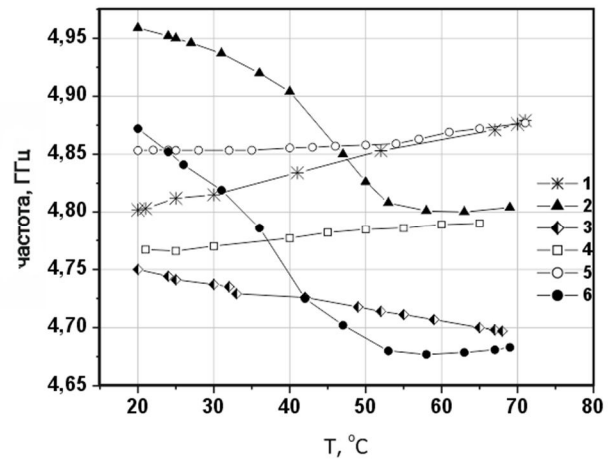


Рис. 6. Температурно-частотна залежність ДР (крива 1) і СДР (криві 2 - 6) з параметрами $\epsilon = 85$, $TK\epsilon = 660 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\alpha = 8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$

Висновки. Наведені в роботі розрахунки, так само як і експериментальні результати доводять ефективність даного методу термокомпенсації СДР. Запропонований спосіб дозволяє відносно просто термостабілізувати ДР з нетермостабільного матеріалу, причому добротність його перевершує відомі добротності звичайного ДР з такою ж проникністю. Використання різних способів закріплення зразка і матеріалу підкладки, дозволяє створити СДР з низьким ТКЧ, а також полегшити настройку резонатора на необхідну частоту.

Література

1. Allan W. Scott. Understanding microwaves. John Willey & Sons, 1993.
2. Y. M. Poplavko, "Microwave high dielectric constant ceramics", Proc. Intern. Conf. ELECTROCERAMICS-V, vol.1, pp. 51-60, Portugal, Sept.1996.
3. Патент US692727(A), США, МПК H01P 7/10 Dielectric resonator device / K. Wakino, H. Tamura, and Y. Ishikava. – 1987.09.8.
4. Y. M. Poplavko, Y. V. Prokopenko, V. I. Molchanov, A. Dogan. Frequency-tunable microwave dielectric resonator // IEEE Transactions on MTT. – Jun 2001. – Vol. 49. – PP. 1020-1026.
5. Shmigin D., Eremenko A., Pashkov V., Molchanov V. "Dielectric resonator with inhomogeneity simulations method". 14th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" CriMiCo-2004, September 13-17, 2004, Conf. Proc., pp. 457-459. Sevastopol, Crimea, Ukraine.
6. Григорьев А. Д. Методы вычислительной электродинамики / А. Д. Григорьев. – Москва : Физматлит, 2013. – 432 с.