УДК 621.372.22 https://doi.org/10.15407/itm2020.02.099

І. В. ГРИМАЛЮК, В. П. КАМКОВ

ВПЛИВ ДІЕЛКТРИЧНОГО ЗАПОВНЕННЯ НА РЕЗОНАНСНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРЯМОКУТНОГО ХВИЛЕВОДУ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: Irysjka@email.ua

Дослідження властивостей діелектриків мікрохвильовими методами представляє великий практичний інтерес, оскільки дозволяє отримувати інформацію про такі властивості, які важко отримати, використовуючи інші методи. При вимірюваннях з використанням відрізків прямокутних хвилевідних ліній оцінювання змін властивостей діелектриків засноване на визначенні зміни коефіцієнтів відбиття та передачі в прямокутному хвилевідному резонаторі. В даній статті розглядаються резонансні явища електромагнітних коливань на відрізку прямокутного хвилевода з діелектричним заповненням у вигляді циліндра, який розташований на центральній осі відрізка. Метою роботи є оцінка залежності резонансних властивостей відрізка прямокутного хвилевода від довжини вставки з хвилевідним прямокутним вікном, діаметра та діелектричних властивостей круглого циліндричного зразка, який розташований в центрі вставки. З використанням комп'ютерних моделей були досліджені залежності резонансних властивостей відрізка прямокутного хвилевода від товщини хвилевідного прямокутного вікна, діаметра та діелектричних властивостей круглого циліндричного зразка, що розташований в центрі вікна. В результаті досліджень було встановлено, що: збільшення довжини хвилевідної вставки та діелектричної проникності циліндра збільшують добротність розглянутої резонансної системи; при незмінному діаметрі зразка збільшення довжини вставки призводить до зменшення частотної чутливості та росту нелінійності в залежності резонансної частоти від діелектричної проникності зразка. Було показано, що при незмінних інших геометричних розмірах хвилевідного вікна, граничне максимальне значення діелектричної проникності, при якій хвиля H_{10} у відрізку хвилевода знаходиться в докритичному режимі, залежить від діаметра діелектричного циліндра. Результати даної роботи на практиці можуть використовуватися при проєктуванні датчиків контролю властивостей діелектриків та надвисокочастотних фільтрів.

Ключові слова: *прямокутний хвилевід, діелектрик, коефіцієнт відбиття, хвилевідна вставка, циліндричний зразок.*

Исследование свойств диэлектриков микроволновыми методами представляет большой практический интерес, поскольку позволяет получать информацию о таких их свойствах, которые сложно получить используя другие методы. При измерениях с использованием отрезков прямоугольных волноводных линий оценка изменений свойств диэлектриков основана на определении изменений коэффициентов отражения или передачи в прямоугольном волноводном резонаторе. В данной статье рассматриваются резонансные явления электромагнитных колебаний на отрезке прямоугольного волновода с диэлектрическим заполнением в виде цилиндра, который расположен на центральной оси отрезка. Целью работы является оценка зависимости резонансных свойств отрезка прямоугольного волновода от длины вставки с волноводным прямоугольным окном, диаметра и диэлектрических свойств круглого цилиндрического образца, расположенного в центре вставки. С использованием компьютерных моделей были исследованы зависимости резонансных свойств отрезка прямоугольного волновода от толщины волноводного прямоугольного окна, диаметра и диэлектрических свойств круглого цилиндрического образца, расположенного в центре окна. В результате исследований было установлено, что: увеличение длины волноводной вставки и диэлектрической проницаемости цилиндра увеличивают добротность рассматриваемой резонансной системы; при неизменном диаметре образца, увеличение длины вставки приводит к снижению частотной чувствительности и росту нелинейности в зависимости резонансной частоты от диэлектрической проницаемости образца. Было показано, что при неизменных прочих геометрических размерах волноводного окна, предельное максимальное значение диэлектрической проницаемости, при которой волна H_{10} в отрезке волновода находится в докритическом режиме, зависит от диаметра диэлектрического цилиндра. Результаты данной работы на практике могут использоваться при проектировании датчиков контроля свойств диэлектриков и сверхвысокочастотных фильтров.

Ключевые слова: *прямоугольный волновод, диэлектрик, коэффициент отражения, волноводная вставка, циллиндрический образец.*

The study of the properties of dielectrics by microwave methods is of great practical interest because it allows one to get information on such properties of theirs that can hardly be studied using other methods. In measurements with the use of lengths of rectangular waveguide lines, the dielectric properties are assessed based on the determination of the reflection or transmission coefficient in a rectangular waveguide resonator. This paper considers resonant phenomena in a rectangular waveguide length with dielectric filling in the form of a cylinder situated on the central axis of the waveguide length. The aim of the paper is to obtain the resonant properties of a rectangular waveguide length as a function of the length of an insert with a rectangular waveguide window and the diameter and dielectric properties of a specimen in the form of circular cylinder situated at the center of the insert. Using computer models, these resonant properties were studied as a function of the width of the rectangular waveguide window and the diameter and dielectric properties of the cylindrical specimen at the center of the window. It was found that increasing the length of the waveguide insert and the permittivity of the cylinder increases the quality factor of the resonant system considered; at a fixed specimen diameter, increasing the insert length decreases the frequency-dependent sensitivity and increases the nonlinearity of the resonance frequency vs. specimen permittivity relationship. It was shown that the maximum value of the permittivity at which the H10 wave in the waveguide length is subcritical depends on the diameter of the dielectric cylinder with the other dimensions of the waveguide window fixed. In practice, the results of this work may be in the design of dielectric parameter meters and microwave filters.

***Keywords**: rectangular waveguide, dielectric, reflection coefficient, waveguide insert, cylindrical specimen.*

Вступ. Дослідження властивостей діелектриків мікрохвильовими методами має практичну зацікавленість, оскільки дозволяє отримувати інформацію про такі властивості, які важко отримати, використовуючи інші методи. При вивченні чи моніторингу властивостей діелектричних зразків, які мають форму циліндрів різної висоти, можуть застосовуватися різноманітні мікрохвильові методи. До них відносяться вимірювання у вільному просторі, вимірювання із застосуванням об'ємних резонаторів або відрізків хвилевідних ліній тощо[1 – 3].

Під час вимірювань з використанням відрізків прямокутних хвилевідних ліній оцінка змін властивостей діелектриків заснована на визначенні змін коефіцієнтів відбиття або передачі [3 – 4] в прямокутному хвилевідному резонаторі. Діелектричний зразок (зазвичай у вигляді круглого циліндра) розташовано перпендикулярно або під кутом до широких стінок хвилевода. При застосуванні з рідкими діелектриками такі підходи дозволяють контролювати зміну діелектричних властивостей в достатньо великих об'ємах рідин. Однак ці методи не завжди забезпечують високу чутливість і можливість контролю при значних змінах діелектричних властивостей. Окрім того, під час контролю властивостей зразків діелектриків з розмірами набагато більшими за розміри хвилеводу, наприклад рідин в капілярній трубці, чутливість вищезазначених методів значно знижується.

Постановка задачі. В роботах [5 – 6] показано, що в товстих діафрагмах, які розташовані в прямокутному хвилеводі, виникають резонанси на запертих модах. Такі резонанси можуть бути використані в різних частотно-селективних пристроях [7]. Відповідно, розміри вікна діафрагми, його орієнтація відносно перерізу основного хвилеводу та товщина діафрагми є тими параметрами, за допомогою яких можна встановлювати кількість і тип резонансних коливань, а також інші властивості резонатора.

При орієнтації хвилевідного вікна тонкої діафрагми симетрично перерізу хвилеводу, у випадку розповсюдження в основному хвилеводі хвилі H_{10}, в регулярній частині діафрагми цей тип коливань теж зберігається. Появу інших типів коливань, в тому числі і на резонансних частотах, як вже було помічено, може бути передбачено за допомогою відомих аналітичних та числових методів [5, 7].

При розміщенні у вікні діафрагми діелектричної неоднорідності характер резонансних процесів у вікні діафрагми може значно змінюватися в залежності від форми неоднорідності, її діелектричних властивостей, розмірів та розташування відносно центральної осі хвилевода. Отримання аналітичних рішень, які описують ці процеси, ускладнено. Числовими методами це питання також досліджувалося недостатньо, особливо для діелектричних об'єктів з непрямокутними формами поперечного перерізу, які найбільш часто зустрічаються в практичних застосуваннях.

Оскільки частіше за все на практиці застосовуються діелектричні зразки в формі круглого циліндра, то в даній роботі будемо розглядати саме таку форму.

В якості діафрагми кінцевої товщини будемо розглядати область хвилеводу з прямокутним хвилевідним вікном. Довжина цієї області буде змінюватись в широкому діапазоні – від долей міліметрів до 9 мм. Відповідно, термін «діафрагма» буде некоректним. Частину хвилеводу з прямокутним вікном в розглянутій моделі будемо називати вставкою з хвилевідним вікном. Приймемо, що зовнішні розміри вставки співпадають з внутрішніми розмірами основного хвилевода. Прямокутне вікно вставки симетричне перерізу основного хвилевода. Вісь циліндричного зразка діелектрика перпендикулярна до центральної вісі хвилевода та проходить через центр вставки.

Метою даної роботи є оцінка залежності резонансних властивостей відрізка прямокутного хвилевода від довжини вставки з хвилевідним прямокутним вікном, діаметра та діелектричних властивостей круглого циліндричного зразка, який розташований в центрі вставки.

Для вирішення поставленої задачі було розглянуто модель відрізка прямокутного хвилевода з довжиною вставки l та встановленим в її центральній частині циліндричним зразком діаметром d. Розглянута модель зображена на рис. 1. Рис. 1, a) – загальний вид моделі, на рис. 1, b) зображено поперечний переріз по центру зразка.

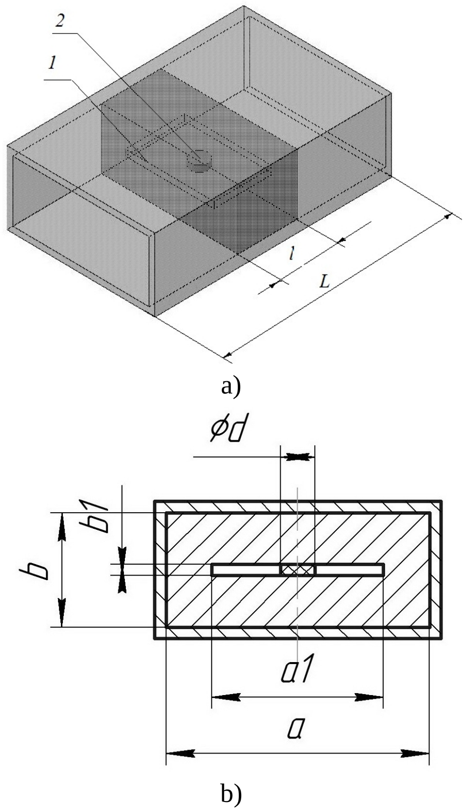


Рис. 1

Розрахунки проводились за допомогою комерційного пакета, який реалізує класичну схему методу скінченних елементів [8]. В дослідженнях розглядався відрізок хвилевідної лінії довжиною L=40 мм та розмірами поперечного перерізу a×b=23×10 мм. Розміри прямокутного хвилевідного вікна *1* у вставці були незмінними та приймались такими, що дорівнюють розмірам $a1$×$b1$ =12,8×1 мм. Довжина вставки змінювалась в діапазоні від 1 до 9 мм. Діаметр зразка d змінювався від 0,25 мм до 2 мм. Висота діелектричного зразка приймалась як незмінна і така, що дорівнює 1 мм (по висоті вікна).

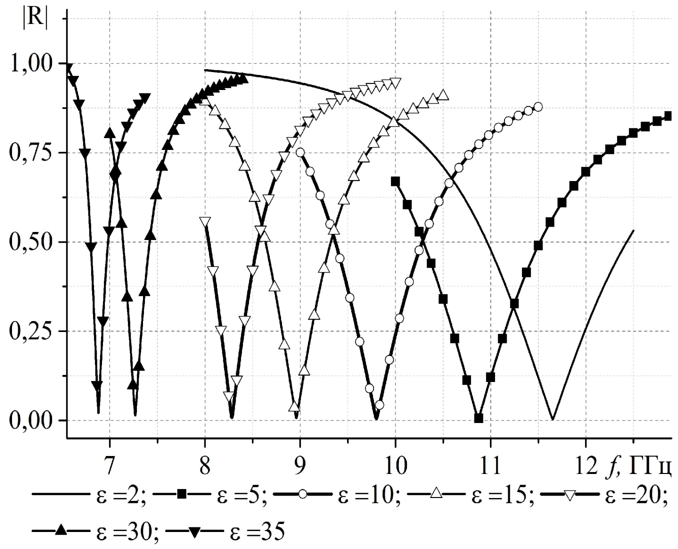
Передбачалось, що всі провідні елементи розглянутої конструкції виготовлені з міді, а внутрішній об’єм заповнений повітрям.

Оцінка впливу змін діелектричних властивостей зразка 2, його діаметра d та довжини вставки l на особливості розповсюдження електромагнітних коливань у відрізку хвилеводу проводилась шляхом числових розрахунків комплексних коефіцієнтів відбиття |R| та передачі |T| на вході і виході відрізка хвилевідної лінії відповідно.

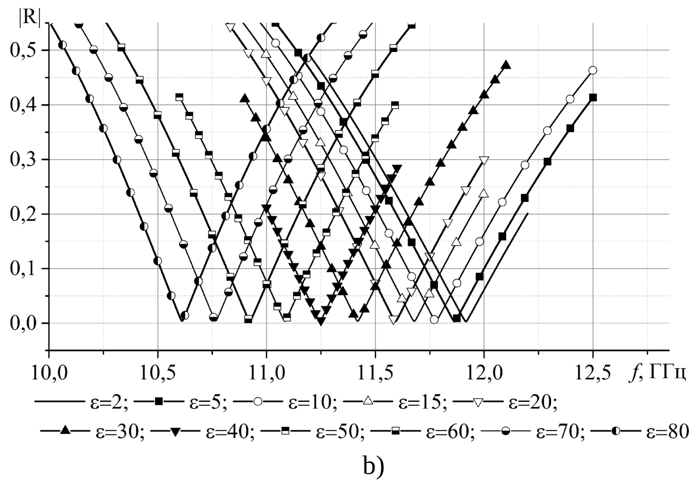
Моделювання змін діелектричних властивостей зразків проводилось шляхом варіювання значень ε – відносної діелектричної проникності в діапазоні від 1 до 80. Значення тангенса кута діелектричних втрат tgδ приймалось незмінним та дорівнювало 0,001.

Результати розрахунків. На графіках рис. 2 представлені результати числових досліджень частотної залежності модуля коефіцієнта відбиття на вході відрізка хвилевідної лінії з вставкою довжиною *l*=1 мм від значення діелектричної проникності циліндричних зразків діаметрами *d*=1 мм (рис. 2, а)) та *d* = 0,25 мм (рис. 2, b)).

Як видно з представлених результатів, частотні залежності коефіцієнтів відбиття (відповідно і коефіцієнтів передачі) від діелектричної проникності зразка мають резонансний характер. Аналіз представлених результатів показав, що при незмінних інших геометричних розмірах хвилевідного вікна, для



a)



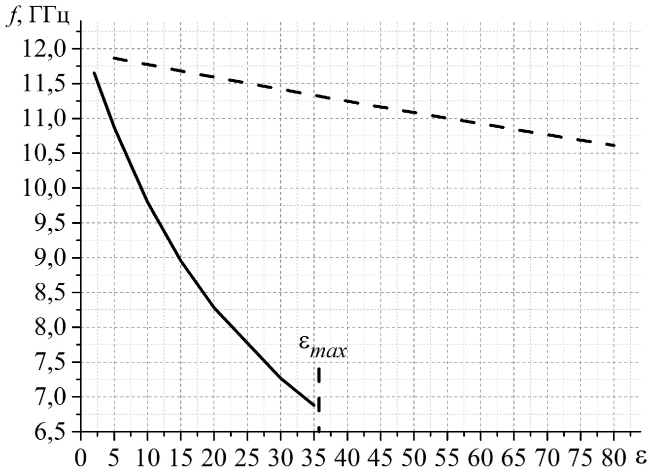
b)

Рис. 2

кожного діаметра діелектричного циліндра існує граничне максимальне значення діелектричної проникності ε_{max}, при яких хвиля H_{10} у відрізку хвилевода знаходиться в докритичному режимі. При значеннях $\varepsilon > \varepsilon_{max}$ режим роботи відрізка хвилевода для хвилі H_{10} коливань стає закритичним.

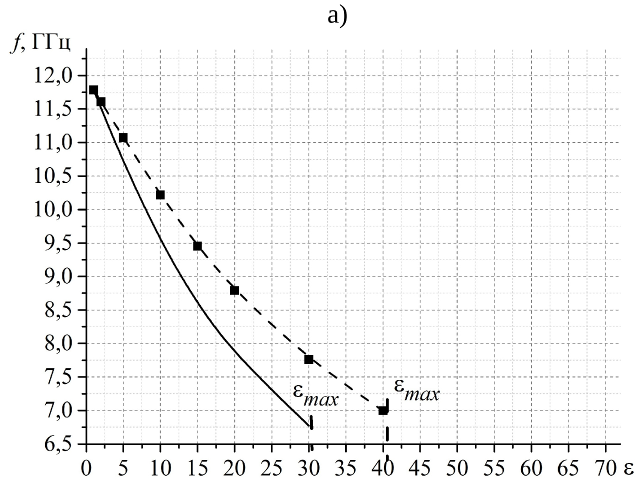
Для оцінки впливу діаметра зразка на чутливість до змін ε та визначення величини граничного значення ε_{max} були проведені розрахунки частотних залежностей коефіцієнта відбиття.

Результати цих розрахунків для діаметрів зразків 0,25 мм та 1,0 мм при *l*=1 мм представлені на рис. 3, а). Для зразків діаметром 1,6 та 2,0 мм при *l*=9 мм – на рис. 3, b).



l =1 мм : —— *d* =1,0 мм; – – *d* =0,25 мм

а)



L=9 мм: - ■ - *d*=1,6 мм —— *d*=2,0 мм;

b)

Рис. 3

З представлених даних видно, що збільшення діаметра зразка при незмінній довжині вставки з хвилевідним вікном призводить до зростання частотної чутливості від змін діелектричної проникності. При чому ця залежність характерна як для невеликих довжин хвилевідних вставок (до 1 мм), які значно коротші за довжину робочої хвилі, так і для більш довгих, довжина яких цілком сумісна з довжиною робочої хвилі в основному хвилеводі.

Для зразка з діаметром 1,0 мм (рис. 3, а)) зміна діелектричної проникності від 2 до 35 призводить до зменшення частоти від 11,96 ГГц до 6,88 ГГц, тобто на 5,08 ГГц.

В свою чергу, для зразка з діаметром 0,25 мм зміна діелектричної проникності в значно більш широкому діапазоні (від 2 до 80) викликає зміну частоти на 1,35 ГГц.

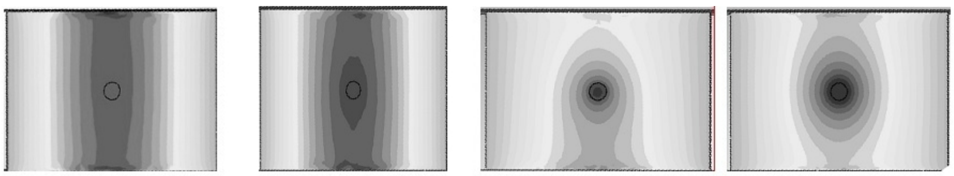
Збільшення довжини хвилевідного вікна до l = 9 мм та діаметра діелектрика до 1,6 мм і 2,0 мм несуттєво змінює частотну чутливість до змін ε в порівнянні з випадком l = 1 мм.

Відзначимо і зростання нелінійності функції $f(\varepsilon)$ при збільшенні діаметра d. Зокрема, при діаметрі d = 1,0 мм в якості апроксимуючої функції $f(\varepsilon)$ необхідно використовувати поліном 2-го ступеня. В той час як при діаметрі зразка d = 0,25 мм – лінійну функцію (див. рис. 3, а)). Величина середньої квадратичної похибки лінійної апроксимації не перевищує величину 0,09 %.

Особливо відзначимо факт зростання добротності розглянутої мікрохвильової структури при збільшенні діелектричної проникності зразка. В даному випадку це проявляється через зменшення ширини резонансної кривої коефіцієнта передачі на висоті, яка приблизно дорівнює половині амплітуди резонансних коливань (так звана 3 dB ширина смуги частот) [2].

Це явище пояснюється тим, що вплив діелектричного зразка з малими значеннями ε на структуру поля в хвилевідному вікні є несуттєвим. Тому область коливань, яка обмежена розмірами хвилевідної вставки, може розглядатися як низькодобротний резонатор. При збільшенні діелектричної проникності зразка відбувається «втягування» електромагнітного поля в діелектричний зразок. З певного моменту електромагнітні коливання, які виникають в діелектричному зразку, практично повністю зосереджуються всередині його об’єму, що зменшує їхній вплив на найнижчий тип коливань, які збуджуються в основному хвилеводі, та резонансні коливання в хвилевідній вставці.

Підтвердженням цього припущення можуть бути результати візуалізації розподілу напруженості електричного поля на резонансній частоті в поперечному перерізі (паралельному широкій стінці хвилевода) хвилевідної вставки довжиною 9 мм. Ці результати наведені на рис. 4 для зразків діаметром 1,0 мм із значеннями ε, які дорівнюють 2, 5, 40 та 60. Більш затемнені області відповідають більш високим значенням напруженості поля.

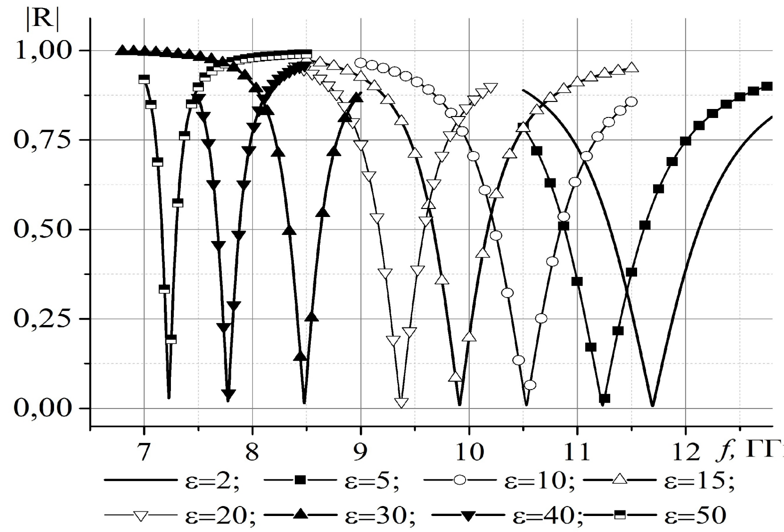


ε = 2 ε = 5 ε = 40 ε = 60

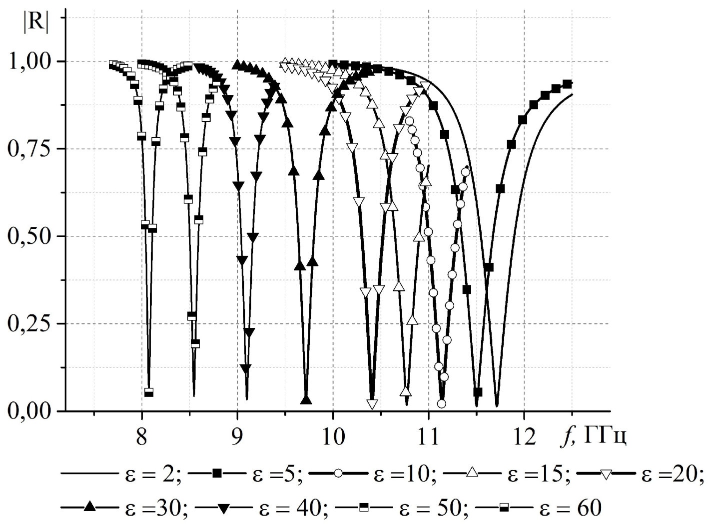
Рис. 4

З рис. 4 добре видно, що при невеликих значеннях діелектричної проникності, в даному випадку при ε = 2, області з максимальною напруженістю електричного поля розташовані вздовж центральної осі по всій довжині хвилевідного вікна.

При збільшенні ε зразка спостерігається поступова концентрація силових ліній навколо зразка та в його об'ємі.   При більшому значенні *ε* (в представленому випадку це – 60), силові лінії поля з максимальною напруженістю сконцентровані навколо зразка та в його об'ємі. Віддалення від центра діелектрика призводить до зменшення щільності силових ліній. Особливо яскраво це проявляється в повздовжньому напрямку – до вхідного та вихідного перерізів хвилевідного вікна. Все це свідчить про те, що при великих значеннях діелектричної проникності циліндричний зразок стає діелектричним резонатором, який підвищує добротність усієї розглянутої хвилевідної системи в цілому, але при цьому збільшує коефіцієнт відбиття розглянутого відрізка хвилевідної лінії. Тобто переводить режим роботи хвилеводу для хвилі H_{10} в критичний.



а)



b)

Рис. 5

На рис. 5 показані результати розрахунків частотної залежності модуля коефіцієнта відбиття на вході відрізка хвилевідної лінії з діафрагмами товщиною 3 мм (рис. 5, a)) та 9 мм (рис. 5, b)) від діелектричної проникності зразка діаметром d = 1 мм.

Під час аналізу представлених результатів можемо спостерігати, що збільшення довжини вставки призводить до зменшення ширини резонансної кривої при однакових значеннях ε. Це свідчить про зростання добротності представленої резонансної системи. Також підтверджуються результати, наведені вище, які показують зростання ε_{max} при збільшенні довжини хвилевідної вставки.

Результати, що представлені на рис. 6, відображають залежність резонансної частоти відрізка хвилевідної лінії від діелектричної проникності та довжини діафрагми при незмінному діаметрі (d = 1,0 мм) циліндричного зразка.

З результатів, що представлені на рис. 6, бачимо, що збільшення довжини хвилевідного вікна призводить до збільшення граничного значення ε_{max}.

Тобто $\varepsilon_{max3} < \varepsilon_{max6} < \varepsilon_{max9}$, де індекси 3, 6, 9 біля ε_{max} відповідають довжинам хвилевідного вікна 3, 6, 9 мм.

Варто відзначити, що відбувається зниження чутливості резонансної частоти та зменшення нелінійності залежності f(ε) при збільшенні довжини вставки від 3 до 9 мм.

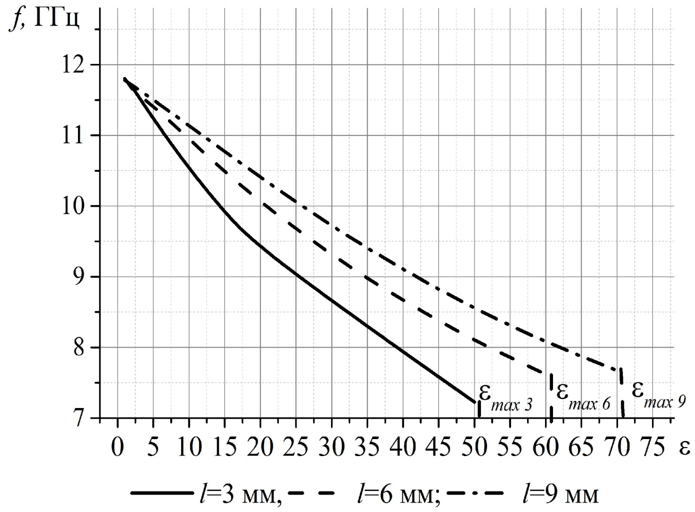


Рис. 6

Висновки. Проведені дослідження залежності резонансних властивостей відрізка прямокутного хвилевода від довжини вставки з прямокутним хвилевідним вікном, діаметра та діелектричних властивостей круглого циліндричного зразка, який розташований в центрі вставки, показали:

– збільшення діаметра зразка при незмінній довжині вставки з хвилевідним вікном призводить до зростання частотної чутливості до змін діелектричної проникності;

– при незмінюваних інших геометричних розмірах хвилевідного вікна граничне максимальне значення діелектричної проникності, при яких хвиля

H_{10} у відрізку хвилевода знаходиться в докритичному режимі, залежить від діаметра діелектричного циліндра;

– збільшення довжини вставки за фіксованих значень діелектричної проникності зразка призводить до росту добротності розглянутої резонансної системи;

– при незмінному діаметрі зразка збільшення довжини вставки призводить до зниження частотної чутливості та нелінійності в залежності резонансної частоти від діелектричної проникності зразка, а також до збільшення максимального значення діелектричної проникності, при якому хвиля H_{10} у відрізку хвилеводу знаходиться в докритичному режимі.

1. *Collier R. J., Skinner A. D.* Microwave Measurements: 3rd Edition. London: The Institution of Engineering and Technology, 2007. 484 p. https://doi.org/10.1049/PBEL012E
2. *Chen L., Ong C., Neo C., Varadan V. V. Varadan V. K.* Microwave electronics: Measurement and materials characterization. John Wiley and Sons, 2004. 537 p. https://doi.org/10.1002/0470020466
3. *Gesche R., Lochel N.* Scatter ing by a Lossy dielectric cylinder in a rectangular waveguide. Microwave theory and techniques. 1988. Vol. 36, №1. P. 137–144. https://doi.org/10.1109/22.3493
4. *Kapilevich B., Lipsky A., Litvak B.* Application of the cut-off resonator for microwave monitoring of transformer oil. Microwave and Optical Technology Letters. 2011. Vol. 53, № 1. P. 66–68. https://doi.org/10.1002/mop.25630
5. *Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Рудь Л. А.* Резонансное рассеяние волн. Волноводные неоднородности: в 2-х т. Київ: Наук. думка, 1986. Т. 2. 216 с.
6. *Stevanovic I., Pedro Crespo-Valero and Juan R.* Mosig Integral-Equation Technique for Solving Thick Irises in Rectangular Waveguides. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. Vol. 54, №1. P. 189–197. https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.860305
7. *Капилевич Б. Ю., Трубехин Е. Р.* Волноводно-диэлектрические фильтрующие структуры. М.: Радио и связь, 1990. 272 с.
8. *Сильвестер П., Феррари Р.* Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 229 с.

Отримано 21.04.2020,
в остаточному варіанті 24.06.2020