

І.Г. Скуратовський, О.І. Хазов, Г.С. Шахова

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна
E-mail: briz@ire.kharkov.ua

Використання резонансного короткозамикаючого поршня у перестроюваних хвилевідно-діелектричних та хвилевідно-коаксіальних резонаторах на циліндричних поза межних хвилеводах

Предмет та ціль роботи. Перестроювані резонансні структури служать основою багатьох надвисокочастотних приладів. Один з різновидів цих структур – хвилевідно-діелектричні та хвилевідно-коаксіальні резонатори (ХДР та ХКР) на циліндричних поза межних хвилеводах, перестроювані резонансним короткозамикаючим (РКЗ) поршнем. Мета роботи – дослідження особливостей застосування РКЗ-поршня у поза межному хвилеводі та оцінка його ефективності.

Метод та методологія роботи. Для наближеної оцінки ефективності РКЗ-поршня застосовано формули теорії довгих ліній. Порівняльну експериментальну перевірку підвищення добротності резонатора з РКЗ-поршнем виконано на прикладі ХДР трисантиметрового діапазону хвиль.

Результати роботи. Показано можливість використання формул теорії довгих ліній для оцінки ефективності РКЗ-поршня для ТЕМ- та H_{11} -коливань. Досліджено можливість перетворення типів коливань (ТЕМ- на H_{11} - та навпаки), якщо у діапазон перестроювання ХДР (ХКР) потрапляє заважаючий резонанс РКЗ-поршня.

Висновок. Показано незначний вплив невеликих відхилень розмірів РКЗ-поршня від розрахункових на його ефективність. Експериментально підтверджено ефективність РКЗ-поршня і можливість зміщення заважаючих резонансів з межі діапазону перестроювання резонатора. Іл. 6. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: хвилевідно-коаксіальний резонатор, хвилевідно-діелектричний резонатор, поза межний хвилевід, резонансна частота, добротність, короткозамикаючий поршень.

У зв'язку з широким застосуванням надвисокочастотних (НВЧ) пристроїв у різних галузях науки та техніки виникає потреба у перестроюваних за частотою резонаторах. Їх використовують у генераторах, фільтрах та різних вимірювальних пристроях. До числа таких резонаторів належать перестроювані за частотою хвилевідно-діелектричні та хвилевідно-коаксіальні резонатори на циліндричних поза межних хвилеводах (далі – перестроювані ХДР та ХКР).

У роботах [1–6] показано можливість використання резонансного короткозамикаючого (РКЗ) поршня для перестроювання ХДР та ХКР (РКЗ-поршень – це один з різновидів дросельних поршнів). Як впливає з цих робіт, його застосування дозволяє звести до мінімуму

вплив нестабільного контакту поршня зі стінками хвилеводу на добротність ХДР та ХКР при їх перестроюванні.

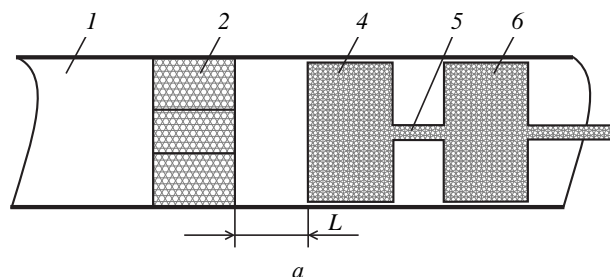
У цій роботі розглянуто характеристики РКЗ-поршнів для хвиль H_{11} та ТЕМ у поза межному хвилеводі, наведено обґрунтовані рекомендації щодо вибору їх розмірів, а також деякі обмеження, що накладаються на перестроювання ХДР та ХКР РКЗ-поршнями.

На рис. 1 зображені перестроювані РКЗ-поршнями ХДР та ХКР, які містять: циліндричний хвилевід 1, поза межний для робочої довжини хвилі; металодіелектричний елемент (МДЕ) 2 – для ХКР, або діелектричний елемент (ДЕ) 3 – для ХДР; РКЗ-поршень, що складається з головки 4, яка разом з хвилеводом утворює коак-

сіальну лінію № 2, шийки 5, яка разом з хвилеводом утворює коаксіальну лінію № 1, та контакт-напрямого циліндра 6.

Простіший варіант короткозамикаючого (КЗ) поршня – це суцільний циліндр з діаметром, дещо меншим за внутрішній діаметр хвилеводу (ковзна посадка). Його недолік – слабкий та нестійкий контакт «тіла» поршня зі стінками хвилеводу. Це призводить як до зменшення добротності резонатора, так і до її «стрибків» під час перестроювання частоти. Для послаблення впливу цих недоліків використовують різні варіанти дросельних КЗ-поршнів і, зокрема, РКЗ-поршень. Його перевага (порівняно з іншими дросельними КЗ-поршнями) – простота виготовлення. Вона набуває особливої актуальності з підвищенням частоти резонаторів, коли необхідно зменшувати діаметр хвилеводу та розміри поршня.

1. Особливості роботи КЗ-поршнів з ХДР та ХКР. На відміну від «звичайних» об'ємних резонаторів, у ХДР та ХКР КЗ-поршень працює у позамежному (для робочої довжини хвилі) хвилеводі. Це зумовлює експоненціальне зменшення електромагнітного поля зі зростанням відстані між КЗ-поршнем та ДЕ (МДЕ). Зона переміщення поршня – від точки дотику до ДЕ (або МДЕ) на відстань у 2–3 діаметри хвилеводу. У точці дотику поршень максимально впливає на частоту та добротність резонатора. Тому бажано, щоб він вносив мінімальні втрати в цій точці. З відведенням КЗ-поршня від ДЕ (МДЕ) його вплив на частоту та добротність резонатора зменшується і на відстані 2–3 діаметри хвилеводу практично не відчувається. Проектуючи РКЗ-поршень, слід мати на увазі, що перестроюваний ХДР та ХКР для H -коливачів матимуть максимальну частоту коливачів при дотику КЗ-поршня до ДЕ (МДЕ), а ХКР для TEM -коливачів – мінімальну.



2. Характеристики РКЗ-поршнів. Робота РКЗ-поршня базується на трансформуючих властивостях лінії передачі. Вхідний опір лінії без втрат довжиною l та навантаженої на кінці опором Z_H становитиме (див. [7]):

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_H + jZ_{\text{хв}} \operatorname{tg}\left(2\pi \frac{l}{\Lambda}\right)}{1 + j \frac{Z_H}{Z_{\text{хв}}} \operatorname{tg}\left(2\pi \frac{l}{\Lambda}\right)}, \quad (1)$$

де $Z_{\text{вх}}$ – вхідний опір лінії; Z_H – опір навантаження, підключеного до кінця лінії; $Z_{\text{хв}}$ – хвильовий опір лінії; l – довжина лінії; Λ – довжина хвилі у лінії.

Якщо послідовно з'єднати два чвертьхвильових (на частоті f_0) відрізки ліній № 1 та № 2 з різними хвильовими опорами, а лінію № 1 навантажити опором Z_H , то вхідний опір лінії № 2 становитиме (див. [8]):

$$Z_{\text{вх}} = \left(\frac{Z_{\text{хв1}}}{Z_{\text{хв2}}}\right)^2 Z_H, \quad (2)$$

де $Z_{\text{хв1}}$ та $Z_{\text{хв2}}$ – хвильові опори ліній № 1 та № 2.

Ця формула отримана шляхом послідовного застосування формули (1) до комбінації двох ліній. Якщо хвильовий опір лінії № 2 менше, ніж лінії № 1 (що має місце у РКЗ-поршні), то отримаємо зниження вхідного опору порівняно з опором навантаження. На частоті f_0 вхідний опір буде «суто» активним, як що Z_H не містить уявної складової. Для РКЗ-поршня Z_H – це опір втрат у зоні контакту контакт-напрямого циліндра і хвилеводу. Далі для спрощення викладу будемо вважати, що опір Z_H активний та дорівнює R_H .

Найбільш важливою характеристикою РКЗ-поршня є залежність відношення $\operatorname{Re} Z_{\text{вх}}$ до R_H від частоти. Для розрахунку цієї характеристи-

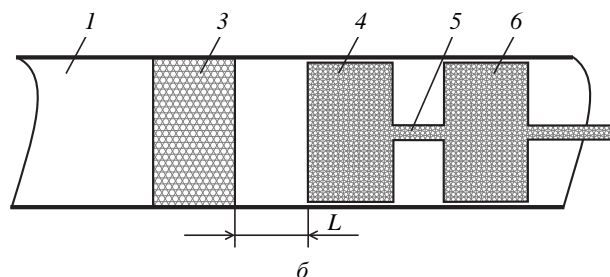


Рис. 1. Перестроювані резонатори з РКЗ-поршнями: а – ХКР; б – ХДР

ки задамо R_n (наприклад, 0,1 або 1 Ом). Використовуючи формулу (1), обчислимо вхідний опір лінії № 1 (вона утворена шийкою поршня і хвилеводом), навантаженої на R_n . Потім за допомогою тієї ж формули визначимо вхідний опір лінії № 2 (утвореної головкою поршня та хвилеводом), навантаженої на вхідний опір лінії № 1. Розрахувавши необхідну кількість точок у заданому інтервалі частот, отримаємо залежність $Z_{вх}$ лінії № 2 від частоти. Крім точки на частоті f_0 , $Z_{вх}$ буде комплексним. Використовуючи отримані дані, розрахуємо залежність відношення $\text{Re}Z_{вх}$ до R_n . Це дасть можливість оцінити ефективність РКЗ-поршня (як він послаблює вплив недосконалості контакту напрямного циліндра зі стінкою хвилеводу). Уявна складова $\text{Im}Z_{вх}$ не вносить втрат і впливає тільки на частоту.

Для розрахунків за формулою (1) необхідно знати (або обчислити) хвильовий опір коаксіальних ліній РКЗ-поршня. Для ліній, що працюють на *ТЕМ*-хвилях, він дорівнюватиме (формула широко відома; див., наприклад, [9]):

$$Z_{хв} = 60 \ln \frac{R}{r}, \quad (3)$$

де R – радіус зовнішнього провідника коаксіальної лінії (хвилеводу), а r – радіус внутрішнього провідника. Враховуючи те, що заповнюючий лінію діелектрик – повітря, беремо його діелектричну проникність, яка дорівнює 1.

Для лінії, що працює на хвилі H_{11} (це вже не коаксіальна лінія, а коаксіальний хвилевід), все складніше. Точної аналітичної формули не знайдено (можливо, вона занадто громіздка). Можна використовувати два способи розрахунку хвильового опору.

Перший – найбільш простий. У [9] наведено три формули розрахунку хвильового опору прямокутного хвилеводу для хвилі H_{10} . Можна скористатися, наприклад, формулою розрахунку хвильового опору прямокутного хвилеводу за відношенням напруги до струму:

$$Z_{хв(U,I)} = \frac{\pi b}{2 a} \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}}, \quad (4)$$

де b/a – відношення розміру вузької стінки хвилеводу до розміру широкої; $f_{кр}$ – критична

частота хвилеводу; f – частота, на котрій розраховується хвильовий опір.

Від типу та параметрів хвилеводу залежить тільки коефіцієнт $(\pi/2)(b/a)$. Якщо поставити у відповідність прямокутному хвилеводу з хвилею H_{10} коаксіальний хвилевід з хвилею H_{11} , то, з деяким спрощенням, одержимо: $b = 2(R - r)$, а $a = \pi(R + r)$, де R та r – радіуси зовнішнього та внутрішнього провідників коаксіального хвилеводу. Для нього формулу (4) можна записати таким чином:

$$Z_{хв(U,I)} = \frac{R - r}{R + r} \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}}. \quad (5)$$

Другий спосіб більш складний та громіздкий. Застосовуючи методи чисельного інтегрування, розрахуємо більш точне значення хвильового опору (отримаємо більш точне значення коефіцієнта при $120\pi/\sqrt{1 - (f_{кр}/f)^2}$). Якщо $R/r \leq 3$, то похибка розрахунку хвильового опору буде менше 9 %, а для $R/r \leq 4$ – менше 13,2 %. Цього досить для оцінки ефективності РКЗ-поршня.

Використання наведеного алгоритму для одержання характеристик РКЗ-поршнів для H_{11} -хвиль має деякі недоліки:

1) у результаті розрахунку ми отримуємо вхідний опір не поршня, а коаксіальної лінії № 2, яка складається з головки поршня та хвилеводу;

2) не враховуються втрати в «тілі» поршня;

3) не враховується стрибок діаметра внутрішнього провідника коаксіальних ліній, що призводить до деяких похибок обчислення характерних точок (наприклад, точок резонансів).

Не дивлячись на зазначені недоліки, цей спосіб розрахунку дає можливість «якісно» оцінити зменшення частини втрат резонатора, які визначаються струмами, що проходять через стик хвилеводу та поршня. Оцінка має «якісний» характер не тільки через особливості розрахунку, а і через невідому величину втрат у стику контактно-напрямного циліндра з хвилеводом.

Під час розрахунку характеристик РКЗ-поршня для *ТЕМ*-хвиль інших особливостей (крім наведених вище) не виникає. Розрахунок характеристик РКЗ-поршня для хвиль H_{11} має додаткові особливості. Критична частота коаксі-

альної лінії (для хвиль H_{11}), утвореної шийкою поршня, може припадати на робочий діапазон частот. На частотах нижче критичної хвильовий опір цієї лінії стане уявною величиною (матиме ємнісний характер). Довжина хвилі в лінії буде теж уявною від'ємною величиною. Це зумовлено тим, що хвильовий опір та довжина хвилі в лінії пропорційні $120\pi/\sqrt{1-(f_{кр}/f)^2}$. У зв'язку з цим у формулі (1) tg переходить у th (тангенс гіперболічний).

З використанням формули (1) були розраховані характеристики двох РКЗ-поршнів (рис. 2–5). Це $\lg(\operatorname{Re} Z_{\text{вх}}/R_{\text{н}})$ – рис. 2 та 4, $\operatorname{Im} Z_{\text{вх}}$ – рис. 3 та 5 у залежності від відносного значення частоти (f/f_0). Величина f – змінне значення частоти, f_0 – частота, за якої $\operatorname{Im} Z_{\text{вх}}$ дорівнює нулю (на цій частоті довжина головки та шийки РКЗ-поршня дорівнюють чверті довжини хвилі в утворених ними лініях).

На рис. 2 та 3 зображені характеристики РКЗ-поршня для хвилі H_{11} , розраховано для частоти $f_0 = 12,5$ ГГц і хвильоводу діаметром 13,05 мм. Розміри поршня: діаметр головки поршня $D_{\text{г}} = 12$ мм, а довжина головки $l_{\text{г}} = 7,561$ мм; діаметр шийки поршня $D_{\text{ш}} = 5$ мм, а її довжина $l_{\text{ш}} = 11,998$ мм. Крива 1 на рис. 2 відображує залежність $\lg(\operatorname{Re} Z_{\text{вх}}/R_{\text{н}})$ від відносного значення частоти (f/f_0) для хвилі H_{11} . На ній можна виділити декілька ділянок. В околі точки з відносною частотою 0,631 (7,888 ГГц) величина $\operatorname{Re} Z_{\text{вх}}/R_{\text{н}}$ набуває великого значення, а $\operatorname{Im} Z_{\text{вх}}$ змінює знак. Дещо вище від цієї точки знаходиться найнижкочастотніший резонанс H_{111} РКЗ-поршня (зміщення за частотою обумовлене впливом поза межного хвильоводу). Наступний резонанс знаходиться в околі відносної частоти 1,307 (16,338 ГГц), яка перевищує критичну частоту циліндричного хвильоводу (а отже, і коливання H_{111} у ХДР і ХКР), тому на графіках цю ділянку не відображено. Друга ділянка (яку слід виділити) знаходиться біля частоти 0,88 (11 ГГц). Дещо нижче цієї частоти знаходиться мінімум втрат РКЗ-поршня. Зміщення вниз від частоти 1,0 обумовлене залежністю хвильового опору від частоти. Він пропорційний $120\pi/\sqrt{1-(f_{кр}/f)^2}$. Оскільки критична частота ділянки шийки поршня вища, ніж головки, це призводить до зміщення мінімуму активної складової $Z_{\text{вх}}$ на

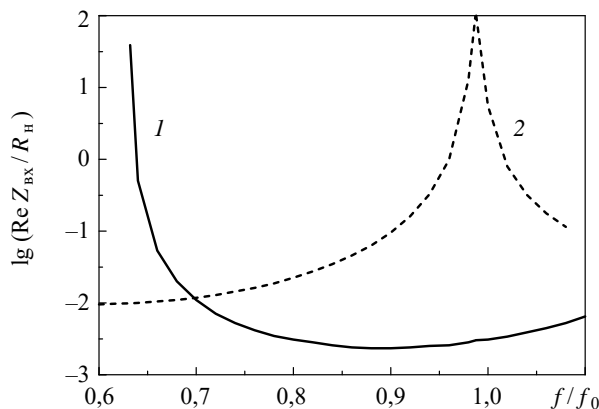


Рис. 2. Графіки залежності $\lg(\operatorname{Re} Z_{\text{вх}}/R_{\text{н}})$ для РКЗ-поршня, розрахованого для H_{11} -хвиль, від відносного значення частоти

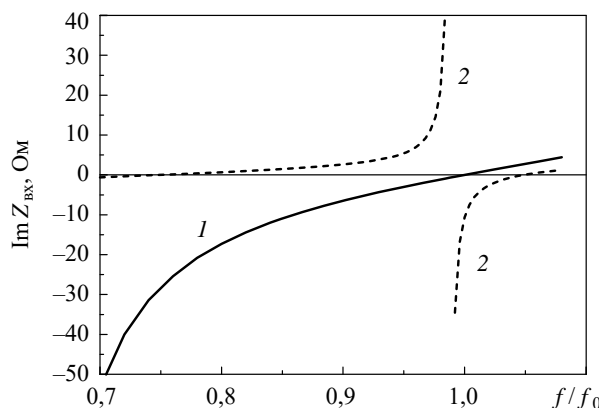


Рис. 3. Графіки залежності реактивної складової вхідного опору лінії РКЗ-поршня для H_{11} -хвиль від відносного значення частоти

більш низькі частоти (мінімум $\operatorname{Re} Z_{\text{вх}}$ знаходиться на відносній частоті < 1). Величина цього зміщення залежить, в основному, від діаметра шийки поршня. Нижня резонансна частота РКЗ-поршня не може «спуститися» по частоті нижче критичної частоти хвилі H_{11} для коаксимального хвильоводу, створеного головкою поршня та хвильоводом. Місцезнаходження цієї точки (на осі частот), в основному, залежить від діаметра та довжини головки поршня та мало залежить від довжини шийки. Крива 1 на рис. 3 показує залежність уявної (реактивної) складової $Z_{\text{вх}}$ від частоти. У точці $f/f_0 = 1$ величина $\operatorname{Im} Z_{\text{вх}} = 0$ та змінює знак.

Крива 2 на рис. 2 відображує залежність $\lg(\operatorname{Re} Z_{\text{вх}}/R_{\text{н}})$ від f/f_0 , а на рис. 3 – $\operatorname{Im} Z_{\text{вх}}$ того ж РКЗ-поршня для TEM -хвилі. Щоб точки кривих 1 та 2 відображували залежність від однакових частот, у розрахунку кривої 2 ви-

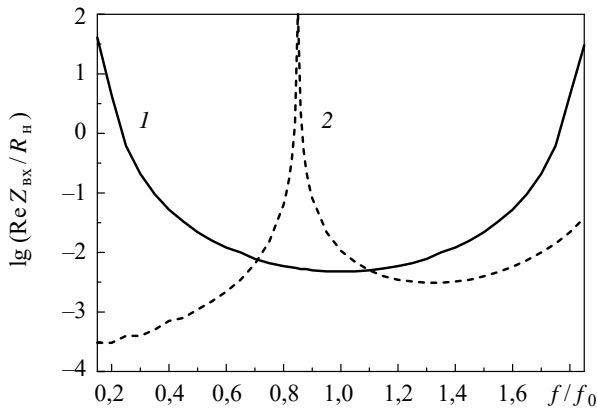


Рис. 4. Графіки залежності $\lg(\operatorname{Re} Z_{\text{вх}} / R_{\text{н}})$ від відносного значення частоти РКЗ-поршня, розрахованого для TEM -хвиль

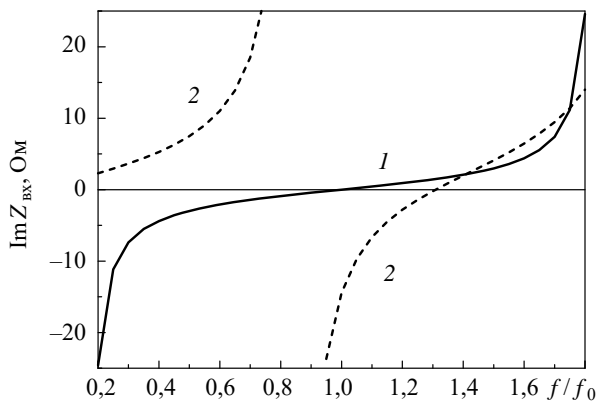


Рис. 5. Графіки залежності реактивної складової вхідного опору лінії РКЗ-поршня, розрахованого для TEM -хвиль, від відносного значення частоти

брана $f_0 = 12,5$ ГГц. На частоті $f / f_0 = 0,988$ $Z_{\text{н}} \lg(\operatorname{Re} Z_{\text{вх}} / R_{\text{н}})$ (крива 2) має різке підняття. Дещо нижче вказаної частоти цей РКЗ-поршень має резонанс на TEM -коливаннях. Якщо цей резонанс потрапить у діапазон перестроювання ХДР або ХКР, то в його околі буде виникати часткове перетворення типів хвиль (H -у TEM -). Це призведе до порушення плавності перестроювання частоти ХДР (ХКР) та зниження добротності на цій ділянці. Проектуючи перестроювані ХДР чи ХКР, слід уникати співпадіння TEM -резонансу поршня та H -резонансу резонатора. Цю проблему можна вирішити шляхом підвищення частоти f_0 поршня, що приведе до більшого зміщення (вгору) частоти TEM -резонансу, ніж f_0 . Другий спосіб вирішення проблеми – зменшити довжину шийки поршня при незмінній довжині головки (або збільшити довжину головки, щоб

f_0 залишилась незмінною). Частота TEM -резонансу поршня зростає, але довжина головки та шийки вже не будуть дорівнювати чверті довжини хвилі на своїх ділянках на частоті f_0 . Це припустимо, оскільки на ефективність РКЗ-поршня мало вплине, що буде експериментально підтверджено.

Резонансна частота коливань H_{111} ХДР завжди розташована вище від критичної частоти хвилі H_{11} у хвилеводі, заповненому діелектриком (ДЕ), та нижче критичної частоти «порожнього» хвилеводу, а для ХКР - «нижня» межа обмежується критичною частотою коаксіального хвилеводу, створеного МДЕ та циліндричним хвилеводом.

Резонансні частоти ХДР та ХКР на H_{111} -коливаннях мінімальні, якщо відстань між ДЕ (для ХДР) чи МДЕ (для ХКР) та КЗ-поршнем прямує до нескінченності (реально ця відстань дорівнює 2–3 діаметрам хвилеводу), і максимальні, якщо ця відстань прямує до нуля (КЗ-поршень торкається до ДЕ або МДЕ). Резонансна частота збільшується з наближенням КЗ-поршня до ДЕ (МДЕ). Чим менша відстань між ДЕ (МДЕ) та КЗ-поршнем, тим сильніший його вплив на частоту та добротність резонатора. Розміри РКЗ-поршня слід обирати так, щоб частота f_0 була близькою до максимальної резонансної частоти ХДР. Діапазон перестроювання ХКР звичайно ширший, ніж у ХДР, і тому, можливо, частоту f_0 необхідно обирати меншою за максимальну частоту резонатора. Це може призвести до зменшення добротності на частотах, близьких до максимальної.

Застосування РКЗ-поршня для перестроювання ХКР на H_{111} -коливаннях має певні недоліки. Нижня резонансна частота ХКР може бути нижча за можливу нижню резонансну частоту РКЗ-поршня, що зробить неможливим його використання для перестроювання частоти. Цієї ситуації можна уникнути, якщо головка поршня, вкрита діелектриком з діелектричною проникністю, яка перевищує чи дорівнює проникності діелектрика в МДЕ. Але це призведе до ускладнення конструкції РКЗ-поршня.

На рис. 4 та 5 зображені характеристики РКЗ-поршня для ХКР з TEM -коливаннями (далі будемо називати його TEM РКЗ-поршнем). Криві 1 – для TEM -хвиль, криві 2 – для H -хвиль. Поршень був розрахований для хвилеводу діаме-

тром 13,05 мм на частоту $f_0 = 9$ ГГц. Діаметр D_{Γ} поршня становив 12,5 мм, $D_{\text{ш}} = 7$ мм. Довжини l_{Γ} та $l_{\text{ш}}$ однакові, дорівнюють 8,325 мм, не залежать від діаметрів головки та шийки поршня.

На перший погляд, криві на рис. 4 та 5 схожі з кривими на рис. 2 та 3. Однак криві 1 відображують залежності для *ТЕМ*-хвиль, а криві 2 – для *Н*-хвиль. Треба зазначити відмінності кривої 1 на рис. 4 (залежність $\lg(\text{Re } Z_{\text{вх}} / R_{\text{н}})$ від частоти для *ТЕМ*-хвиль) від кривої 1 на рис. 2 (залежність $\lg(\text{Re } Z_{\text{вх}} / R_{\text{н}})$ від частоти для *Н*₁₁-хвиль):

1) залежність (на рис. 4) більш симетрична та мінімум співпадає з відносним значенням частоти, що дорівнює 1. Це пояснюється відсутністю частотної залежності довжини хвилі та хвильового опору у коаксіальній лінії для *ТЕМ*-хвиль;

2) відсутністю частотної залежності пояснюється й більше відношення частоти «верхнього» резонансу поршня до «нижнього». Для *ТЕМ*-поршня воно становить приблизно 11,2, а для *Н*-поршня – 2,1 (для розглянутих РКЗ-поршнів). Ці параметри залежать як від геометрії (розмірів) РКЗ-поршня та хвилеводу, так і від частотного діапазону його використання. Для інших поршнів ці параметри будуть іншими, хоча наведена тенденція зберігатиметься.

Резонансна частота ХКР з *ТЕМ*-коливаннями мінімальна, якщо відстань між МДЕ та КЗ-поршнем близька до нуля, і збільшується зі збільшенням цієї відстані (на відміну від ХКР з *Н*-коливаннями). Вплив поршня на резонансну частоту та добротність ХКР збільшується зі зменшенням відстані між КЗ-поршнем та МДЕ. Дозволяти контакт між стрижнем МДЕ та поршнем не треба, оскільки це призведе до різкого зниження добротності ХКР унаслідок значних втрат у зоні контакту (в цій зоні максимум струму). Враховуючи вищевказане, частоту f_0 РКЗ-поршня слід обирати рівною чи дещо вищою за мінімальну резонансну частоту ХКР. Розміри поршня та хвилеводу слід обирати такими, щоб *Н*-резонанси поршня не потрапляли у діапазон перестроювання резонатора (якщо це небажано).

3. Експериментальні дані. Для ілюстрації наведених міркувань та доведення теоретичних висновків автори виконали низку експериментів. Зокрема, було досліджено залежність

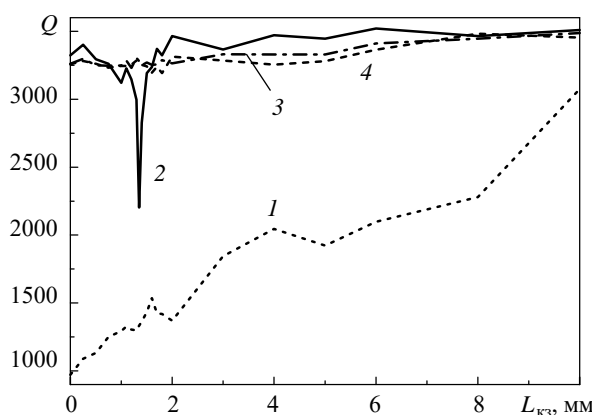


Рис. 6. Графіки залежності добротності ХДР від положення різних поршнів при його перестроюванні

добротності перестроюваного ХДР (коливання H_{111}) від відстані ($L_{\text{КЗ}}$) між ДЕ та КЗ-поршнем. Вимірювання проводилися з чотирма КЗ-поршнями: один найпростіший КЗ-поршень № 1 (циліндр діаметром на 0,05 мм менше внутрішнього діаметра хвилеводу) та три РКЗ-поршні різних розмірів (№ 2 – № 4). У експериментах використовувався хвилевід з внутрішнім діаметром 13,05 мм. Діелектричний елемент був виготовлений з фторопласту-4, його довжина становила 8,02 мм, діаметр – близький до діаметра хвилеводу. Діелектрична проникність матеріалу ДЕ – близько 2,041. КЗ-поршні та хвилевід були виготовлені з безкисневої міді. Розрахований діапазон перестроювання ХДР 11,170...12,502 ГГц. Результати вимірювань наведені на графіках (рис. 6).

Крива 1 (рис. 6) відображує зміну добротності ХДР при перестроюванні його резонансної частоти найпростішим КЗ-поршнем (поршень № 1). Графік показує, що при $L_{\text{КЗ}}$, близькому до нуля, добротність ХДР відчутно зменшується (більш ніж у 3,5 разу порівняно з максимумом). Це пояснюється основним недоліком «найпростішого» КЗ-поршня (поганий контакт зі стінками хвилеводу) та максимальним його впливом на добротність у цій ділянці. Зі збільшенням $L_{\text{КЗ}}$ добротність монотонно зростає. Зламність кривої викликають як похибки вимірювань, так і нестійкість контакту поршня зі стінкою хвилеводу. У результаті вимірювань було одержано діапазон перестроювання: 11,216 ГГц ($L_{\text{КЗ}} = 10$ мм)...12,505 ГГц ($L_{\text{КЗ}} = 0$). Розрахунок дає діапазон 11,217...12,502 ГГц (за таких самих значень $L_{\text{КЗ}}$).

Крива 2 (рис. 6) відображує зміну добротності ХДР, перестроюваного РКЗ-поршнем № 2. Враховуючи те, що резонансна частота ХДР при $L_{\text{КЗ}} = 0$ наближена до 12,5 ГГц, f_0 для цього поршня була вибрана 12,5 ГГц. У результаті розрахунку отримано такі розміри: $D_{\text{Г}} = 12$ мм; $l_{\text{Г}} = 7,561$ мм; $D_{\text{Ш}} = 5$ мм; $l_{\text{Ш}} = 11,998$ мм. Вони збігаються з розмірами РКЗ-поршня для H -коливаль, який було розглянуто раніше. Через похибки виготовлення реальний РКЗ-поршень мав такі розміри: $D_{\text{Г}} = 12,12$ мм; $l_{\text{Г}} = 7,59$ мм; $D_{\text{Ш}} = 4,92$ мм; $l_{\text{Ш}} = 12,2$ мм. Невеликі розбіжності у розрахункових і реальних розмірах на характеристики поршня мали незначний вплив. Із застосуванням виготовленого РКЗ-поршня отримали $f_0 = 12,456$ ГГц, а мінімум $\lg(\text{Re} Z_{\text{ВХ}} / R_{\text{Н}})$ став $-2,79$ (замість $-2,64$ при точних розмірах). Це поліпшення обумовлене більшим діаметром головки та меншим діаметром шийки виготовленого РКЗ-поршня. У найбільш важливій точці (на частоті 12,5 ГГц) $\lg(\text{Re} Z_{\text{ВХ}} / R_{\text{Н}}) = -2,65$ замість $-2,51$ (при «точних» розмірах).

Крива 2 (рис. 6) має особливість. За умови $L_{\text{КЗ}} = 1,35$ мм (частота 12,03 ГГц) добротність ХДР спадає до значення 2 100. Це спричинено впливом $ТЕМ$ -резонансу поршня. В околі цієї точки спостерігається часткове перетворення типів хвиль (H_{111} - у $ТЕМ$ -) та «відсмоктування» енергії H_{111} -коливаль [10]. $ТЕМ$ -резонанс поршня низькодобротний, тому відбувається сильне спадання добротності ХДР. У результаті розрахунків отримуємо частоту резонансу поршня дещо нижче 12,16 ГГц; вимірювання без ДЕ дають 12,09 ГГц.

Для зсуву заважаючого $ТЕМ$ -резонансу РКЗ-поршня за межі перестроювання ХКР були виготовлені два поршні (№ 3 та № 4). Розміри поршня № 3: $D_{\text{Г}} = 12,1$ мм; $l_{\text{Г}} = 7,08$ мм; $D_{\text{Ш}} = 4,92$ мм; $l_{\text{Ш}} = 10,25$ мм. У нього на частоті 13,03 ГГц довжини головки і шийки дорівнюють чверті довжини хвилі (для кожної на своїй ділянці хвилеводу). На цій частоті його $\text{Im} Z_{\text{ВХ}} = 0$. Розміри поршня № 4: $D_{\text{Г}} = 12,12$ мм;

$l_{\text{Г}} = 7,6$ мм; $D_{\text{Ш}} = 4,95$ мм; $l_{\text{Ш}} = 9$ мм. Для цього поршня на частоті 12,54 ГГц (де $\text{Im} Z_{\text{ВХ}} = 0$) не виконується умова рівності довжин головки та шийки чверті довжини хвилі. Для цих поршнів частоти $ТЕМ$ -резонансу зсунуті вгору відносно діапазону перестроювання досліджуваного ХДР та приблизно дорівнюють 14,2 ГГц (для поршня № 3) і 15,7 ГГц (для поршня № 4). На рис. 6 криві 3 та 4 показують зміну добротності ХДР при його перестроюванні поршнями № 3 та № 4, відповідно. Як помітно з графіків, криві 3 та 4 практично збігаються. Невелика їх зламність пояснюється похибками вимірювання. Експеримент показує, що обидва способи зміщення $ТЕМ$ -резонансу РКЗ-поршня за діапазон перестроювання ХДР рівноцінні.

Криві частот перестроювання мало відрізняються одна від одної (для різних використаних поршнів) та результатів розрахунку з «ідеальним» КЗ-поршнем. Похибка визначалась точністю вимірювання частоти та похибкою установлення відстані між ДЕ та КЗ-поршнем і не перевищувала 0,17 %. Тільки частота резонансу в околі точки $L_{\text{КЗ}} = 1,35$ мм (для РКЗ-поршня № 2) має особливість внаслідок перетворення типів хвиль, аналогічну наведеній у роботі [6].

Особливості роботи ХКР на $ТЕМ$ -коливаннях, перестроюваного РКЗ-поршнем, достатньо повно експериментально досліджені у роботі [6].

Висновки. Наведені у роботі розрахункові характеристики РКЗ-поршнів дозволяють обрати оптимальні розміри поршнів як для ХДР та ХКР з коливаннями H_{111} , так і для ХКР з $ТЕМ$ -коливаннями. Показано можливість оцінки ефективності РКЗ-поршня з достатньою для застосування точністю, при використанні досить простих формул. Надано рекомендації щодо зміщення $ТЕМ$ -резонансу поршня з діапазону перестроювання ХКР та ХДР на коливаннях H_{111} . Експериментально підтверджено високу ефективність РКЗ-поршня та малий вплив похибок виготовлення поршня на його ефективність.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Белоус Р.И., Мартынюк С.П., Моторненко А.П., Скуратовский И.Г. Свойства перестраиваемого волноводно-диэлектрического резонатора миллиметрового диапазона с повышенной добротностью. *Радиофизика и электрон.* 2015. Т. 6(20), № 1. С. 81–84.
2. Белоус Р.И., Моторненко А.П., Скуратовский И.Г., Хазов О.И. Особенности волноводно-диэлектрического резонатора с резонансным короткозамыкающим поршнем. *Радиофизика и электрон.* 2014. Т. 5(19), № 2. С. 90–93.

3. Белоус Р.И., Мартынюк С.П., Моторненко А.П., Скуратовский И.Г., Хазов О.И. Свойства волноводно-диэлектрического резонатора с резонансным короткозамыкающим поршнем. *Радиотехника: науч.-техн. сб. Харьк. нац. ун-т радиоэлектрон.* Харьков, 2013. Вып. 174. С. 55–57.
4. Моторненко А.П., Скуратовский И.Г., Хазов О.И. Волноводно-диэлектрический резонатор с резонансным короткозамыкающим поршнем. *Радиофизика и электрон.* 2012. Т. 3(17), № 4. С. 14–17.
5. Bilous R.I., Motornenko A.P., Khazov O.I., Skuratovskiy I.G. Waveguide-coaxial resonator with wide-range frequency tuning and increased Q-factor. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2016. Vol. 75, Iss. 10. P. 887–894.
6. Белоус Р.И., Скуратовский И.Г., Хазов О.И., Шахова А.С. Особенности перестройки волноводно-коаксиального резонатора на *TEM*-колебаниях резонансным короткозамыкающим поршнем. *Радиофизика и электрон.* 2017. Т. 22, № 4. С. 82–87.
7. Мейнке Х., Гундлах Ф.В. *Радиотехнический справочник.* Москва–Ленинград: Госэнергоиздат, 1960. Т. 1. 416 с.
8. Лебедев И.В. *Техника и приборы сверхвысоких частот.* Москва–Ленинград: Госэнергоиздат, 1961. Т. 1. 512 с.
9. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. *Справочник по элементам волноводной техники.* Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Советское радио, 1967. 651 с.
10. Шестопапов В.П. *Морсовские критические точки дисперсионных уравнений.* Киев: Наукова думка, 1992. 240 с.

Стаття надійшла 28.12.2020

REFERENCES

1. Belous, R.I., Martyniuk, S.P., Motornenko, A.P., Skuratovskiy, I.G., 2015. Properties of tunable waveguide-dielectric resonator of millimeter range with high Q-factor. *Radiofiz. Elektron.*, **6(20)**(1), pp. 81–84 (in Russian).
2. Belous, R.I., Motornenko, A.P., Skuratovskiy, I.G., Khazov, O.I., 2014. Peculiarities of waveguide-dielectric resonator with short-circuit plunger. *Radiofiz. Elektron.*, **5(19)**(2), pp. 90–93 (in Russian).
3. Bilous, R.I., Martyniuk, S.P., Motornenko, A.P., Skuratovskiy, I.G., Khazov, O.I., 2013. Properties of waveguide dielectric resonator with resonant short-circuit plunger. In: N.I. Slipchenko, ed. 2013. *Radiotekhnika.* Kharkiv: NURE Publ. **174**, pp. 55–57 (in Russian).
4. Motornenko, A.P., Skuratovskiy, I.G., Khazov, O.I., 2012. Waveguide-dielectric resonator with resonance short-circuit plunger. *Radiofiz. Elektron.*, **3(17)**(4), pp. 14–17 (in Russian).
5. Belous, R.I., Motornenko, A.P., Khazov, O.I., Skuratovskiy, I.G., 2016. Waveguide-coaxial resonator with wide-range frequency tuning and increased Q-factor. *Telecommunications and Radio Engineering*, **75**(10), pp. 887–894.
6. Belous, R.I., Skuratovskiy, I.G., Khazov, O.I., Shakhova, A.S., 2017. Peculiarities of waveguide-coaxial resonator on the *TEM*-oscillations with resonance short-circuit plunger. *Radiophys. Electron.*, **22**(4), pp. 82–87 (in Russian).
7. Meinke, X., Gundlach, F.V., 1960. *Radio engineering handbook.* Moscow–Leningrad: Gosenergoizdat Publ. Vol. 1. (in Russian).
8. Lebedev, I.V., 1961. *Equipment and devices at microwave frequencies.* Moscow–Leningrad: Gosenergoizdat Publ. Vol. 1. (in Russian).
9. Feldshtein, A.L., Yavich, L.R., Snirnov, V.P., 1967. *Handbook to the elements of waveguide technology.* 2nd ed. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).
10. Shestopalov, V.P., 1992. *Morse critical points of dispersion equations.* Kiev: Naukova Dumka Publ. (in Russian).

Received 28.12.2020

I.G. Skuratovskiy, O.I. Khazov, A.S. Shakhova

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

A RESONANT SHORT-CIRCUIT PLUNGER AS PART OF TUNABLE WAVEGUIDE-DIELECTRIC AND WAVEGUIDE-COAXIAL RESONATORS BUILT AROUND CYLINDRICAL EVANESCENT WAVEGUIDES

Subject and Purpose. Tunable resonant structures make numerous microwave devices, among which are waveguide-dielectric and waveguide-coaxial resonators (WDR and WCR) built around cylindrical evanescent waveguides and involving a resonant short-circuit (RSC) plunger for tuning purposes. The present paper seeks to study specific features of the RSC-plunger operation in the evanescent waveguide and estimate the RSC-plunger efficiency.

Method and Methodology. The RSC-plunger efficiency is approximately estimated in terms of the transmission line theory. Comparative experimental verification of the Q-factor increase is provided by an example of a 3 cm WDR resonator equipped with a RSC-plunger.

Results. It has been shown that relevant formulae of the transmission line theory can be extended for the RSC-plunger efficiency estimation on the *TEM* and H_{11} oscillations. A possibility has been studied of the *TEM* type transformation to the H_{11} oscillation and back when the spurious resonance of the RSC-plunger falls within the WDR (WCR) tuning range.

Conclusion. Insignificance of the effect that small deviations from the numerically predicted dimensions of the RSC-plunger exert on the RSC-plunger operation efficiency has been demonstrated. The RSC-plunger efficiency and a possibility to remove the spurious resonances from the resonator tuning range have been experimentally confirmed.

Key words: waveguide-coaxial resonator; waveguide-dielectric resonator; evanescent waveguide, resonant frequency, Q-factor, short-circuit plunger.