

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова

НАТАРОВ МИХАЙЛО ПЕТРОВИЧ

УДК 621.372:53.08

**РАДІАЦІЙНІ ВТРАТИ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ
ЗВ'ЯЗКУ І ДЖЕРЕЛ ЗБУДЖЕННЯ КВАЗІОПТИЧНИХ
ВІДКРИТИХ РЕЗОНАТОРІВ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2018

Дисертація на правах рукопису

Роботу виконано в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
Національної академії наук України, м. Харків

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Кириленко Анатолій Опанасович
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
НАН України (м. Харків),
головний науковий співробітник
лабораторії обчислювальної електродинаміки
відділу теорії дифракції та дифракційної електроніки

Офіційні опоненти – доктор фізико-математичних наук, професор
Маслов Вячеслав Олександрович
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
завідувач кафедри квантової радіофізики

– доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Грибовський Олександр Володимирович
Радіоастрономічний інститут НАН України,
провідний науковий співробітник відділу
теоретичної радіофізики

Захист відбудеться «29» березня 2018 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: вул. Ак. Проскури 12, м. Харків, 61085.

Автореферат розісланий «27» лютого 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ І.В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Роботу присвячено дослідженню радіаційних втрат енергії у відкритих резонаторах (ВР), зумовлених наявністю у ВР елементів зв'язку (ЕЗ) із зовнішніми трактами і (або) джерел електромагнітної енергії.

Актуальність теми зумовлена тим, що ВР застосовуються в електровакуумних і напівпровідникових генераторах і перетворювачах частоти, в спектроскопії і діелектрометрії, однак до сих пір не були вивчені в повній мірі закономірності, пов'язані з випромінюванням і розсіюванням хвиль у зовнішній простір при збудженні ВР пристроями зв'язку. Відомо, що при збудженні відкритих структур ниткою струму, елементарним диполем або зосередженими (тобто малими або порівняними з довжиною хвилі) ЕЗ, крім резонансних коливань збуджуються ще й хвилі, які прямо випромінюються у вільний простір, не беручи участь в підживленні резонансного коливання (так зване нерезонансне випромінювання). У ВР існують також радіаційні втрати через розсіювання поля резонансних коливань на ЕЗ, які знижують добротність ВР. Обидва види цих радіаційних втрат знижують ефективність використання резонансної системи у вигляді ВР в пристроях і приладах і погіршують їхні характеристики в цілому. Підвищення к.к.д. генераторів і чутливості спектрометрів і діелектрометрів прямо пов'язано з втратами в їх резонансних системах, з ефективністю збудження коливань в них, ефективністю виведення енергії з резонансної системи. До останнього часу дослідження цих явищ проводились епізодично. Не існувало ні теоретичних, ні експериментальних досліджень, які б давали повну картину фізичних явищ при збудженні ВР або виведенні енергії з ВР. Тому є актуальним створення нових експериментальних і теоретичних підходів до вивчення радіаційних втрат ЕЗ.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. В дисертаційну роботу увійшли результати досліджень і розробок, виконаних автором в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України у відділі твердотільної електроніки за період з 1986 по 2016 рр. в рамках держбюджетних НДР:

- «Дослідження взаємодії електромагнітних полів короткохвильової частини міліметрового діапазону хвиль з напівпровідниковими структурами в квазіоптичних коливальних системах з метою створення твердотільних генераторів» (шифр «Резонатор 4», номер держ. реєстрації 01.86.0086550, виконавець);
- «Розробка і дослідження високостабільних напівпровідникових квазіоптичних генераторів міліметрового і субміліметрового діапазону довжин хвиль і систем амплітудної, фазової та частотної модуляції» (шифр «Лінія УН» номер держ. реєстрації 01.9.20.000605, виконавець);
- «Дослідження збудження відкритих коливальних систем ансамблем автогенераторів» (шифр «Табір», номер держ. реєстрації 0196V006120, виконавець);

- «Теоретичне й експериментальне дослідження хвильових процесів в пристроях і системах мікрохвильового і міліметрового діапазонів хвиль», (шифр «Буксир», номер держ. реєстрації 0100U006441, виконавець);
- «Теоретичне й експериментальне дослідження хвильових процесів у системах мікрохвильового діапазону», (шифр «Буксир 2» номер держ. реєстрації 0103U002267, виконавець);
- «Розробка та впровадження нових методів обчислювальної радіофізики, теоретичне та експериментальне дослідження трансформації електромагнітних полів гіга- і терагерцового діапазонів в об'єктах і середовищах антропогенного та природного походження», (шифр «Буксир 3», номер держ. реєстрації 0106U011975, виконавець);
- «Розробка та впровадження нових методів обчислювальної радіофізики; теоретичне та експериментальне дослідження трансформації електромагнітних полів гіга-, терагерцового та оптичного діапазонів в об'єктах й середовищах антропогенного та природного походження; аналіз та синтез нових вузлів й пристроїв резонансної квазіоптики, твердотільної електроніки, імпульсної й антенної техніки; розробка й тестування нових вимірювальних схем рефлекто- й діелектрометрії», (шифр «Буксир 4», номер держ. реєстрації 0112U000210, виконавець);
- в конкурсній НДР в рамках спільного проекту Державного фонду фундаментальних досліджень та Білоруського республіканського фонду фундаментальних досліджень «ДФФД – БРФФД – 2005» «Нові пристрої зв'язку високодобротних НДВЧ резонаторів з хвилеводами: теорія, проектування, експеримент», виконавець.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження дисертаційної роботи - експериментальними і теоретичними методами встановити закономірності, яким підкоряються радіаційні втрати елементів зв'язку та джерел збудження в квазіоптичних відкритих резонаторах. Для досягнення мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

- розробити нові методи вимірювання радіаційних втрат елементів зв'язку відкритих резонаторів;
- за допомогою розроблених методів провести експериментальні дослідження характеристик радіаційних втрат, ефективності збудження і виведення енергії відкритих резонаторів з різними елементами зв'язку;
- побудувати математичну модель взаємодії поля резонансної моди з елементами зв'язку або джерелами збудження відкритого резонатора, що враховує радіаційні втрати джерел і елементів зв'язку;
- провести чисельне моделювання процесів вимушених коливань для різних конфігурацій відкритих резонаторів з елементами зв'язку, дати фізичну інтерпретацію отриманих результатів;
- провести порівняння отриманих експериментальних і теоретичних залежностей, зробити висновки про межі застосування розробленої моделі взаємодії поля резонансної моди з елементами зв'язку або джерелами збудження відкритого резонатора.

Об'єкт дослідження - явища збудження, випромінювання і розсіювання електромагнітних коливань і хвиль елементами зв'язку і сторонніми джерелами у відкритих резонансних системах та в оточуючому їх просторі.

Предмет дослідження - радіаційні втрати енергії, які супроводжують резонансні коливання електромагнітних полів у відкритих резонаторах через наявність в них елементів зв'язку та джерел збудження.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої в дисертаційній роботі мети використано методи експериментальної і теоретичної радіофізики: методи експериментальних досліджень, що включають методи вимірювань, такі як метод пробного тіла для дослідження структури полів у відкритих резонаторах, метод каліброваної антени і метод трьох антен для дослідження випромінювання з відкритих резонаторів і вимірювання напруженості поля резонансних мод, методи експериментального моделювання мікрохвильових пристроїв - метод еквівалентних схем і метод імпеданса; для побудови та аналізу теоретичної моделі квазіоптичного відкритого резонатора використані методи теорії дифракції та розсіювання хвиль, такі як метод заданого поля, метод заданих струмів, метод часткових областей, а також чисельні методи вирішення систем лінійних рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів

- Розроблено новий метод вимірювання радіаційних втрат елемента зв'язку квазіоптичного відкритого резонатора, заснований на вимірюванні енергії всіх видів втрат і енергії, яку запасено в резонаторі. Для коректного вимірювання запасеної енергії вперше запропоновано використовувати елемент зв'язку, що прокалібрований за спеціальною методикою.
- Модифіковано еквівалентну схему відкритого резонатора з елементом зв'язку. Методом імпеданса вперше проведено вимірювання величин кожного виду втрат відкритого резонатора та елемента зв'язку в околі резонансної частоти.
- Побудовано оригінальну феноменологічну модель збудження квазіоптичного відкритого резонатора з хвилеводу, яка вперше дозволила провести чисельне моделювання радіаційних втрат пристрою зв'язку. Модифікація моделі за допомогою метода заданих струмів дозволила вперше провести чисельне моделювання збудження квазіоптичного резонатора різними конфігураціями елементарних диполів.
- Вперше показано, що на частоті власного резонансу поле нерезонансного випромінювання елемента зв'язку протифазне розсіяному на елементі зв'язку полю резонансної моди. Встановлено, що поле хвилі, яка проходить через елемент зв'язку та компенсує втрати резонансної моди, синфазне з полем резонансної моди. Показано, що залежність ефективності збудження від розстройки резонатора має резонансний вигляд з максимумом на частоті власного резонансу, а умовою досягнення максимальної ефективності збудження, наближеної до 100%, є рівність амплітуд полів нерезонансного випромінювання та розсіювання.

- Вперше теоретично і експериментально показано, що до зниження ефективності збудження резонатора на частоті навантаженого резонансу призводить невиконання фазових і/або амплітудних умов, яке може бути зумовлене: а) зміщенням частоти навантаженого резонансу відносно частоти власного резонансу через реактивність елемента зв'язку; б) зростанням власних втрат відкритого резонатора; в) розміщенням елемента зв'язку на периферії плями поля резонатора.
- Вперше теоретично і експериментально показано, що ефективність виведення енергії з відкритого резонатора не має резонансної залежності і визначається, головним чином, розсіювальними властивостями самого елемента зв'язку.
- Вперше експериментально доведено, що при однаковому коефіцієнті зв'язку щільні елементи мають завжди більш високу ефективність, ніж отвори в діафрагмі, як при збудженні, так і при виведенні енергії.

Практичне значення одержаних результатів. Результати, які одержано у дисертаційній роботі, можуть бути застосовані при розробці квазіоптичних пристроїв. Отримані знання про фізичні причини додаткових радіаційних втрат елементів зв'язку у відкритих резонаторах і загальні порівняльні характеристики елементів зв'язку різних типів допоможуть оптимально застосовувати ті чи інші конструкції елементів зв'язку. Розроблені методи вимірювання ефективності збудження та виведення енергії коливань елементами зв'язку дають можливість практично оптимізувати енергетичні характеристики коливальних систем при створенні твердотільних та електровакуумних приладів.

Теоретичну модель збудження відкритих резонаторів можливо застосовувати для швидких попередніх розрахунків при проектуванні резонансних систем різних квазіоптичних приладів або вимірювальних пристроїв.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі узагальнено матеріали досліджень [1-16], отримані в співавторстві за особистої участі автора. Зі спільних публікацій використано ті матеріали, в які автор вніс свій особистий внесок. Це розробка метода балансу потужностей для вимірювання ефективності збудження і виведення енергії коливань відкритого резонатора та дослідження радіаційних втрат щільних елементів зв'язку методом балансу потужностей [1-3, 5, 9-13, 15-16]. Модифікація методу імпеданса в частині модифікації еквівалентної схеми заміщення відкритого резонатора для експериментального дослідження елементів зв'язку квазіоптичних двохдзеркальних і дзеркальних дискових діелектричних резонаторів та узагальнення отриманих результатів [8, 10, 11, 16]. Створення феноменологічних моделей збудження відкритого резонатора з хвилевода елементом зв'язку або системою заданих струмів, виведення основних рівнянь, аналіз і узагальнення результатів чисельного моделювання [4-9, 14].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися й обговорювалися на наступних семінарах, конференціях та симпозиумах:

- наукові семінари ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України «Теорія дифракції та дифракційна електроніка», «Радіофізика і електроніка міліметрових та субміліметрових хвиль»;
- 11-а Міжнародна Конференція "ММЕТ'06", 26-29 червня 2006 р., м. Харків, Україна;
- 16-а Міжнародна Кримська конференція «СВЧ техніка і телекомунікаційні технології», 11-15 вересня 2006 р., м Севастополь, Україна;
- 6-й Міжнародний симпозіум «Фізика і техніка міліметрових і субміліметрових хвиль» "MSMW'07", 25-30 червня 2007 р., м. Харків, Україна;
- 7-й Міжнародний симпозіум «Фізика і техніка міліметрових і субміліметрових хвиль» "MSMW'10", 21-26 червня 2010 р., м. Харків, Україна.

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковані в 16 наукових працях, з яких 11 статей у фахових наукових журналах та збірниках наукових праць, 1 авторське свідоцтво на винахід, 4 доповіді в працях міжнародних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, переліку умовних скорочень і позначень, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг дисертації 175 сторінок. Дисертація містить 43 рисунки та 2 таблиці. Список використаних джерел на 12 сторінках включає 114 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми представленої роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, наведено основні методи вирішення поставлених задач, приведено основні дані роботи.

Розділ 1 присвячено аналізу стану питання та огляду літератури за темою дисертації. Зроблено огляд робіт, в яких вивчалась теоретично і експериментально проблема радіаційних втрат при збудженні ВР, проаналізовано недоліки застосованих для вирішення проблеми методів та труднощі поставленої задачі. Показано, що відсутня чітка фізична картина процесів збудження ВР зосередженими джерелами, в зв'язку з чим існують протилежні погляди на можливість ефективного збудження відкритих резонансних систем такими джерелами.

Виявлено, що теоретичні дослідження радіаційних втрат за допомогою строгих електродинамічних методів стикаються з серйозними математичними труднощами, особливо для квазіоптичних ВР, коли розміри резонатора значно перевищують довжину хвилі. Непрямі оцінки показують, що можливе збудження резонансного коливання у ВР з високою ефективністю. Оцінки ефективності збудження ВР, засновані на різних евристичних підходах, дають великий розкид значень навіть при схожих параметрах досліджених ВР.

У розділі 2 розглянуто електромагнітні коливання і хвилі в квазіоптичних ВР, зв'язаних з хвилеводами за допомогою зосереджених ЕЗ. **У підрозділі 2.1**

детально розглянуто схему хвильових процесів і коливань у ВР в режимах вільних і вимушених коливань, отримано вирази, що описують радіаційні втрати, викликані наявністю пристрою зв'язку. Введено величини: ефективність збудження ВР і ефективність виведення енергії з ВР, які характеризують радіаційні втрати пристроїв зв'язку. Ефективність збудження – відношення потужності власних втрат ВР P_0 до потужності, яка вийшла з хвилевода через ЕЗ: $\eta = P_0/P_t$. Ефективність виведення енергії з ВР - відношення потужності втрат в зовнішньому хвилеводі P_{ext} до загальної потужності втрат P_{coupl} , що спричиняє ЕЗ у резонаторі: $\eta_{out} = P_{ext}/P_{coupl}$. У **підрозділі 2.2** розроблено ідею оригінального метода знаходження цих величин шляхом вимірювання запасеної енергії в резонансній моді ВР і потужності всіх видів втрат, що дозволяє визначити ефективність збудження і ефективність виведення енергії через ЕЗ резонатора: $\eta = \frac{\pi \alpha w_c^2 L T}{120 \lambda Q_0 (1 - R)}$, $\eta_{out} = \frac{120 \lambda P_{ext} Q_0 Q_L}{\pi \alpha w_c^2 L P_{tr} (Q_0 - Q_L)}$, де R - коефіцієнт відбиття ВР за потужністю, вимірюваний у хвилеводі, який підключений до ЕЗ; T - коефіцієнт передачі ВР за потужністю у додатковий ЕЗ; P_{tr} - потужність у додатковому ЕЗ; P_{ext} - потужність у ЕЗ що досліджується; w_c - радіус хвильового пучка на дзеркалі з додатковим ЕЗ; α - розмірний калібрувальний коефіцієнт, що залежить від конструкції і геометричних розмірів додаткового ЕЗ, який пов'язує напруженість поля хвилі, що падає на дзеркало з ЕЗ, і потужність, що пройшла крізь ЕЗ у хвилевід, співвідношенням $\alpha = E^2/P_{tr}$; L - відстань між дзеркалами ВР. У **підрозділі 2.3** описано експериментальну установку, що реалізує методику калібрування ЕЗ, вимірювань потужностей і добротностей ВР, наведено результати досліджень декількох типових ЕЗ міліметрового діапазону хвиль (рис. 1): щілина на дзеркалі ВР з розмірами $b \times 7,2$ мм, яка плавно переходить у хвилевід стандартного перерізу. Розмір b був від 0,1 мм до 1 мм.

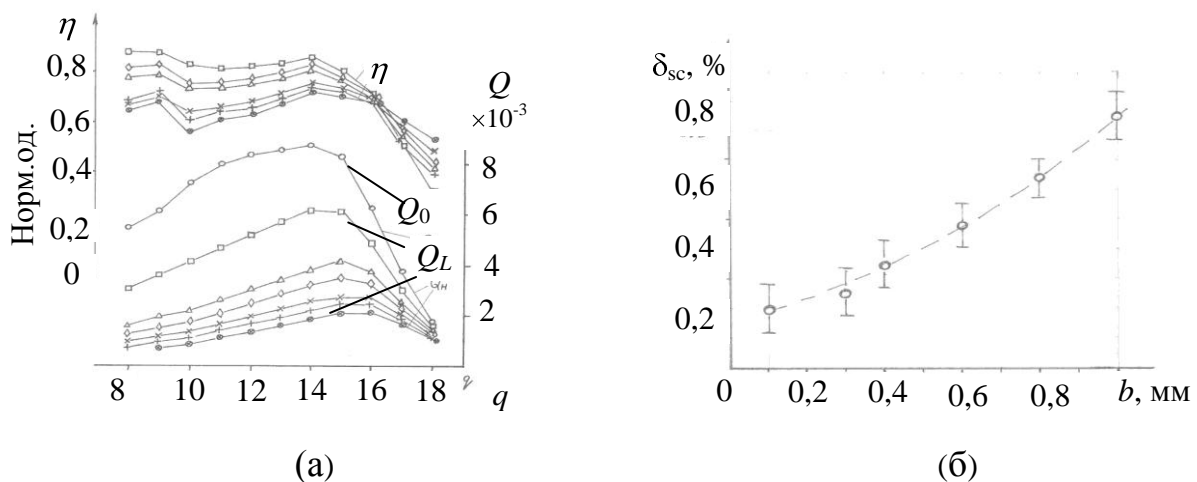


Рисунок 1 – Результати вимірювання ефективності збудження (а) і втрат на розсіювання (б) для серії щілинних ЕЗ

Показано, що ефективність збудження ВР зосередженими ЕЗ може досягати величин 0,9-0,95. Це означає, що радіаційні втрати елемента зв'язку можуть не перевищувати 0,1-0,05 від частки потужності генератора, що проходить через ЕЗ, і цього можна досягати при різних довжинах ВР і при різних кутових розмірах протилежного дзеркала (рис. 1а). Вперше визначено ефективність виведення енергії з ВР і за цими даними розраховано частку відносних втрат енергії ВР через розсіювання на елементі зв'язку за формулою $\delta_{sc} = 2kl(1 - \eta_{out})(1/Q_L - 1/Q_0)$, (рис. 1б). Експериментально показано, що ефективність виведення енергії слабо залежить від поздовжнього індексу коливань q . Також досліджено вплив зміщення ЕЗ від осі ВР, експериментально отримано характеристики ВР в залежності від зміщення.

У розділі 3 розроблено феноменологічні моделі збудження ВР елементами зв'язку або сторонніми джерелами. У підрозділі 3.1 запропоновано феноменологічну двовимірну модель зв'язку з хвилеводом квазіоптичного ВР, за допомогою якої можна описати процес збудження ВР і виведення з ВР енергії. Модель побудовано на основі розв'язку двовимірної задачі дифракції хвилеводних хвиль і Гаусових пучків на відкритому кінці плоского хвилеводу з нескінченним фланцем в разі H -поляризації. При побудові моделі використовувався ряд фізичних припущень, що спрощують опис квазіоптичного ВР і нехтують несуттєвими факторами.

Поле резонансної моди представлено суперпозицією двох хвильових пучків, що поширюються назустріч один одному, причому один з пучків - падаючий на плоске дзеркало з ЕЗ, а інший - відбитий від цього дзеркала. Якщо поперечні розміри відбивача значно більше діаметра пучка, то дифракцією на краях відбивача можна знехтувати. Таке представлення поля моделює резонансну моду квазіоптичного ВР в області одного з дзеркал, коли ВР має дифракційні втрати значно менше теплових, обумовлених скінченною провідністю відбиваючої поверхні дзеркал.

Головна мета, з якою запропоновано модель - описати перерозподіл енергії, яку переносять хвилевідна хвиля і хвильовий пучок, при їх взаємодії на елементі зв'язку і виявити чинники, які впливають на цей процес. Тому, властивості ВР, не пов'язані з наявністю елемента зв'язку, наприклад, такі як омичні і дифракційні втрати, взаємодія мод на краях дзеркал, вважаємо відомими або дуже малими. Найбільш адекватні такій моделі реальні ВР, у яких апертури дзеркал значно перевищують розміри плями резонансного поля на дзеркалах і, отже, дифракційні втрати набагато менше омичних. Конкретний механізм втрат (поглинання в дзеркалах, дифракція на краях дзеркал, розсіювання на неоднорідностях) не впливає на розподіл поля резонансної моди до тих пір,

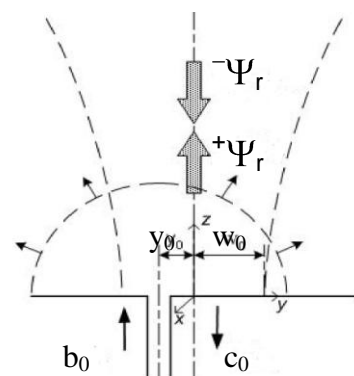


Рисунок 2—Модель збудження ВР, пов'язаного з хвилеводом

поки добротність ВР залишається досить високою (в мм діапазоні порядку $Q \approx 10^3$, при втратах за подвійний прохід $\sigma \approx 10\%$), тому дифракційні явища виключені з розгляду. Втрати ВР, без конкретизації фізичного механізму, задано виходячи з розумних фізичних міркувань, відповідно до відомих даних для двохдзеркальних квазіоптичних ВР. Вважається, що ці властивості ВР визначаються другим дзеркалом, яке в нашій моделі є ідеалізованим об'єктом.

Попередньо треба знайти амплітуди хвилевідних мод, відбитих від відкритого кінця хвилеводу при падінні на нього хвилевідної моди і хвильового пучка із заданими амплітудами b_l і a_r . Розв'язання проведено процедурами відомого строгого метода, але при деяких спрощеннях, виправданих для квазіоптичного наближення, отримано систему лінійних рівнянь, яка описує дифракцію хвилевідної моди з індексом l на відкритому кінці хвилеводу з нескінченним фланцем і дифракцію Гаусова пучка з індексом r , що нормально падає на той же відкритий кінець хвилеводу з півпростору

$$\sum_{m=0}^{\infty} A_{nm} c_m = \sum_l^{l_{\max}} {}^1 B_{nl} b_l + \sum_r^R {}^2 B_{nr} a_r. \quad (1)$$

Розв'язання нескінченної системи лінійних рівнянь (1) проведено методом редукції, точність розв'язання контролюється чисельно. Порівняння отриманого розв'язка для випадку падіння пучка нульового порядку з шириною $w_0 \geq 2\lambda$ на відкритий кінець хвилеводу з шириною $d < \lambda/4$ з розв'язком математично строго поставленої задачі про падіння плоскої хвилі на відкритий кінець хвилеводу тієї ж ширини з нескінченним фланцем дає розбіжність величин коефіцієнта c_0 в одиниці відсотка, яка зменшується із зростанням w_0 / λ та із зменшенням d / λ .

Компоненту H_x повного поля моделі ВР представлено у вигляді:

$$H_x(y, z) = \begin{cases} \sum_{r=0}^R {}^- a_r {}^- \Psi_r(y, z) + \sum_{p=0}^{\infty} {}^+ a_p {}^+ \Psi_p(y, z), & z > 0 \\ \sum_{l=0}^{l_{\max}} b_l \cos\left(\frac{\pi l}{2d} (y - y_0 + d \exp j\gamma_l z)\right) + \\ + \sum_{m=0}^{\infty} c_m \cos\left(\frac{\pi m}{2d} (y - y_0 + d \exp -j\gamma_m z)\right), & z < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Вважаємо, що коефіцієнти c_m є відомими з розв'язку системи (1). Підкорюючи повне поле (2) граничним умовам на ідеальному металі і умовам безперервності на апертурі в площині $z = 0$, отримуємо вираз для амплітуд хвильових пучків, відбитих від металевого фланця, в площині $z = 0$:

$${}^+ a_p = \sum_l^{l_{\max}} b_l \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\gamma_n}{k} G_{pn} \delta_{nl} - {}^1 c_{nl} + \sum_r^R {}^- a_r \left(\delta_{pr} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\gamma_n}{k} G_{pn} {}^2 c_{nr} \right) \quad (3)$$

де ${}^1 c_{nl}$ і ${}^2 c_{nr}$ - коефіцієнти, знайдені з розв'язку системи рівнянь (2), δ_{nl} і δ_{nr} - символи Кронекера, G_{pn} - інтеграл, який легко береться чисельно.

Модель ВР: у верхньому півпросторі на деякій відстані $z = L$ розташований відбивач хвильових пучків, що є другим дзеркалом ВР. Це друге дзеркало має деякі властивості, які сформулюємо наступним чином: (а) - на цьому дзеркалі відсутня взаємодія мод з різними індексами, тобто відсутнє перетворення хвильового пучка з одним індексом в хвильовий пучок з іншим індексом; (б) - коефіцієнти відбиття від дзеркала для кожного падаючого на нього хвильового пучка задаються і можуть набувати значень від 0 до 1; (в) - форма хвильового фронту і ширина кожного відбитого пучка такі ж, як і у кожного падаючого пучка з відповідним індексом.

Оскільки друге дзеркало розташоване на відстані L від плоского дзеркала, то хвильовий пучок з індексом r , проходячи від плоского дзеркала до другого і назад, отримує фазовий набіг $2 \arg \Psi_r$, у, L . Тоді амплітуди хвильових пучків одного порядку, один з яких падає на друге дзеркало, а інший відбивається від нього, в площині $z=0$ можна пов'язати співвідношенням $\bar{a}_r = \mu_r^+ a_r$, де $r = 0, 1, 2, \dots$. Коефіцієнт μ_r визначає зміни амплітуди і фази при проходженні пучка від площини $z=0$ до другого дзеркала, відбитті від нього і проходженні назад до плоского дзеркала. Представимо μ_r у вигляді:

$$\mu_r = (1 - \delta_r) \exp \left[j 2 \left(kL - (r+1) \arctg \left(\frac{\lambda L}{\pi w_0^2} \right) \right) \right], \text{ де } (1 - \delta_r) - \text{модуль коефіцієнта}$$

відбиття, а δ_r - величина, пов'язана з втратами потужності r -го пучка σ_r при відбитті від другого дзеркала співвідношенням $\sigma_r = 2\delta_r - \delta_r^2$. Величина σ_r еквівалентна відносним власним втратам ВР за подвійний прохід. За умови $\delta_r \ll 1$, втрати $\sigma_r \approx 2\delta_r$. Будемо називати δ_r відносними втратами пучка з індексом r за прохід. Як видно, умову резонансу амплітуди пучка з індексом r визначає фазовий множник коефіцієнта μ_r , причому параметром розстройки можуть бути дві величини: зміна довжини хвилі λ і зміна довжини ВР L . Оскільки λ входить в усі постійні поширення в ключових задачах моделі, то значно зручніше варіювати довжину ВР L для знаходження резонансу. У разі добротних коливань відносні розстройки завжди виявляються малими і зміни по λ і по L еквівалентні одна одній.

Із розв'язку системи (1) і маючи вираз (3), зробивши деякі перетворення з урахуванням вище вказаних співвідношень $\bar{a}_r = \mu_r^+ a_r$, отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно \bar{a}_r :

$$\sum_r^R \delta_{pr} - \mu_p^2 s_{pr} \bar{a}_r = \mu_p^1 s_{pl} b_l, \quad (4)$$

де індекс $p = 0, 1, 2, \dots, R$. Розмір системи рівнянь (4) визначається заданою кількістю хвильових пучків з ненульовим коефіцієнтом відбиття від другого дзеркала. Коефіцієнт відбиття, ефективність збудження та ефективність виведення енергії нескладно виразити через знайдені величини c_m , \bar{a}_r , параметри пучка та обрану величину втрат за прохід δ_r .

Зв'язок між амплітудами падаючих та відбитих хвиль у ВР можна представити у матричній формі

$$\begin{bmatrix} \left[\begin{smallmatrix} + \\ a_p \end{smallmatrix} \right] \\ \left[\begin{smallmatrix} c_m \end{smallmatrix} \right] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\begin{smallmatrix} 1 \\ s_{pl} \end{smallmatrix} \right] & \left[\begin{smallmatrix} 2 \\ s_{pr} \end{smallmatrix} \right] \\ \left[\begin{smallmatrix} 1 \\ c_{ml} \end{smallmatrix} \right] & \left[\begin{smallmatrix} 2 \\ c_{mr} \end{smallmatrix} \right] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \left[\begin{smallmatrix} b_l \end{smallmatrix} \right] \\ \left[\begin{smallmatrix} - \\ a_r \end{smallmatrix} \right] \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\left[\begin{smallmatrix} - \\ a_p \end{smallmatrix} \right] = \left[\begin{smallmatrix} \mu_{pp} \end{smallmatrix} \right] \times \left[\begin{smallmatrix} + \\ a_p \end{smallmatrix} \right], \quad (6)$$

яка наочно демонструє зв'язок між амплітудами падаючих та відбитих хвиль.

На рис. 3 наведено приклад розрахунку амплітуд пучків у моделі ВР, збуджуваних у ВР вузьким плоско-паралельним хвилеводом (TEM – хвиля, $b_0 = 1$), обчислених залежно від довжини ВР, обраної в області $L/\lambda \approx 6$. ЕЗ зміщений від осі ВР на величину $y_0 = \lambda$. При розв'язанні систем (1) і (4) враховувалося 60 хвилевідних мод і 90 пучків. Втрати пучків з номерами $p = 0, 1, 2, \dots, 6$ задано рівними $\delta_p = 0,01$, для всіх інших пучків з номерами $p > 6$ втрати задані рівними $\delta_p = 1$.

На графіку спостерігаються резонансні максимуми амплітуд пучків при довжинах ВР, відповідних умові $\arg(\mu_p) \approx 2\pi n$, $n = 0, 1, 2, \dots$. У точках значень довжини ВР L_r/λ , де амплітуди пучків з індексами r набувають резонансного максимуму, амплітуди інших пучків мають резонансні мінімуми. Назвемо ці значення L_r/λ точками резонансу. Зміщений ЕЗ ефективно збуджує як симетричні, так і несиметричні пучки, крім пучка з номером $p = 2$, у якого амплітудний розподіл має нуль поблизу координати ЕЗ $y_0 = \lambda$. На рис. 4 показано результати розрахунків для резонансу пучка з індексом 0 амплітуди a_0 , коефіцієнта відбиття $|\Gamma|$ та ефективності збудження η в залежності від параметра розстройки $t = 2(f - f_0)/f_0 = 2(L - L_0)/L_0$ для декількох значень d/λ . Усі величини мають резонансну залежність від частоти. Із збільшенням ширини хвилеводу частота навантаженого резонансу зміщується відносно початкового значення – частоти власного резонансу. Це пояснюється фазовою неоднорідністю, яку вносить ЕЗ та яка зростає із збільшенням ширини відкритого кінця хвилеводу. Максимум ефективності збудження залишається на частоті власного резонансу. Це спричиняє зниження η на резонансній частоті навантаженого ВР.

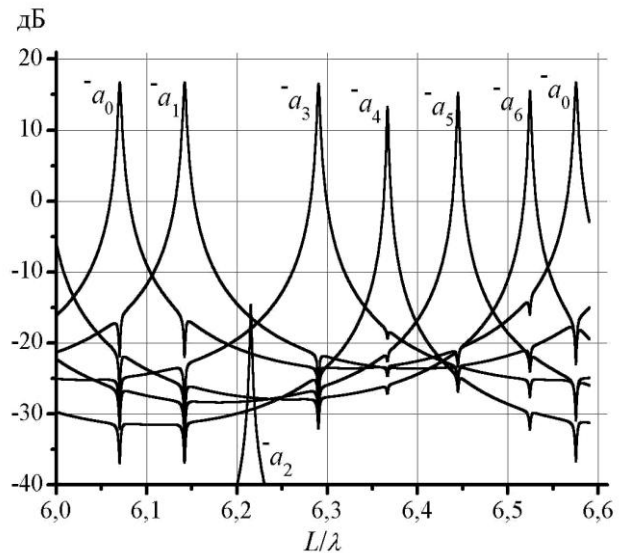


Рисунок 3– Амплітуди пучків у ВР:
 $w_0/\lambda = 2,02$, $d/\lambda = 0,01$, $y_0/\lambda = 1$;
 $\delta_p = 0,01$, $p = 0 \dots 6$, $\delta_p = 1$, $p = 7 \dots 90$

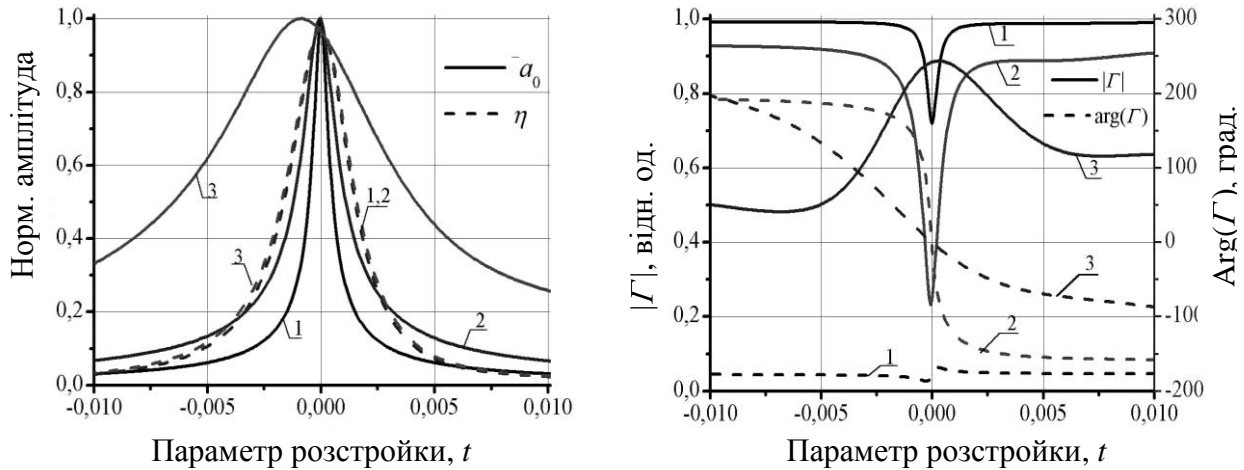


Рисунок 4– Резонанс нульового порядку. $L/\lambda \approx 6$, $y_0/\lambda=0$, $\delta_0=0,01$;
цифрами позначено: 1- $d/\lambda=0,001$, 2- $d/\lambda=0,01$, 3- $d/\lambda=0,1$

Розглянемо складові поля в області $z > 0$, які відповідні хвилям, що йдуть від плоского дзеркала:

$${}^+H_x(y, +0) = {}^1s_{0,0}b_0 + {}^2s_{0,0}^-a_0 + \Psi_0 + \sum_{p=1}^{\infty} {}^1s_{p,0}b_0 + {}^2s_{p,0}^-a_0 + \Psi_p. \quad (7)$$

Коефіцієнти при функціях ${}^+\Psi_p$ є комплексні амплітуди, що складаються з двох доданків. Перший обумовлений збудженням з хвилеводу, другий - розсіюванням поля падаючого резонансного пучка на ЕЗ. Аналіз складових виразу (7) показав, що величини $\arg {}^1s_{0,0}b_0$ і $\arg {}^2s_{0,0}^-a_0$, які є фазами складових резонансної амплітуди, рівні між собою на частоті навантаженого резонансу, а величини $\arg {}^1s_{p,0}b_0$ і $\arg {}^2s_{p,0}^-a_0$, які є фазами складових амплітуд тих хвиль, що знаходяться поза резонансом, на частоті власного резонансу відрізняються на π і тому ці амплітуди відчувають інтерференційне гасіння. Це пояснює досягнення максимуму ефективності збудження на частоті власного резонансу і її зниження на частоті навантаженого резонансу.

Проведено розрахунки впливу зміщення ЕЗ від осі ВР (рис. 5, лінії 1-5). Показано, що при зміщенні ЕЗ із області поля з максимальною амплітудою ефективність збудження може суттєво зростати за рахунок зменшення коефіцієнта зв'язку (якщо зв'язок сильний), а значить і зменшення різниці між частотами навантаженого і власного резонансу. При зміщенні ЕЗ на край плями поля резонансного пучка ефективність збудження зменшується по причині невиконання рівності амплітуд поля нерезонансного випромінювання і поля розсіювання. Результати експерименту зі зміщеним ЕЗ (лінії 6-7) по характеру змінення добре співпадають з результатами розрахунків.

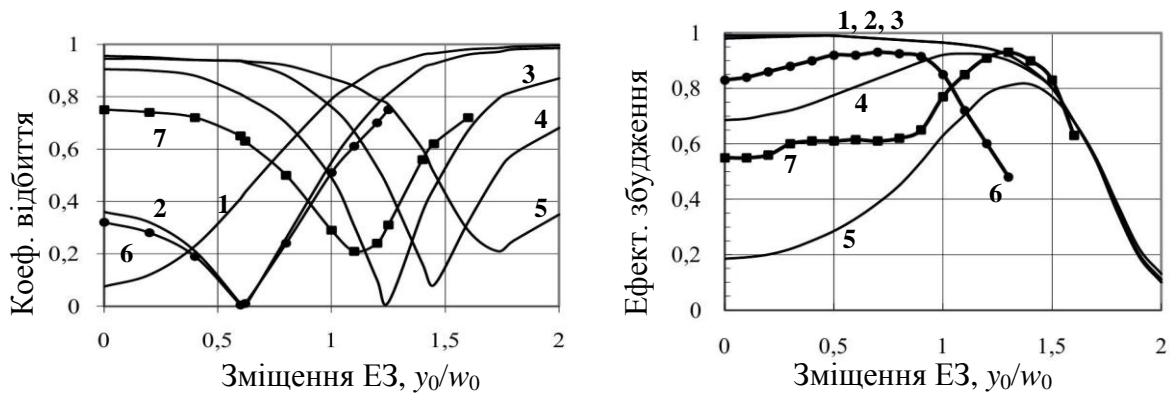


Рисунок 5 – Коефіцієнт відбиття і ефективність збудження при зміщенні ЕЗ від осі ВР. Розрахунок: d / λ : 1 – 0,0004; 2 – 0,001; 3 – 0,01; 4 – 0,03; 5 – 0,1; експеримент: 6 – щілина $0,1 \times 7,2$ мм; 7 – щілина $0,25 \times 11$ мм

У підрозділі 3.2 запропоновано феноменологічну модель збудження квазіоптичного ВР системою електричних диполів, яка враховує нерезонансне випромінювання джерела збудження. Модель побудована на основі розв'язку електродинамічної задачі збудження методом заданих струмів і також, як двовимірна модель зв'язку з хвилеводом, використовує ряд припущень і апріорних знань про характеристики ВР. Новизна полягає в урахуванні нерезонансного випромінювання джерел у вигляді суми потужностей, що живить нерезонансні моди на частоті збудження. В даному наближенні ефективність збудження ВР - це відношення потужності, що живить резонансну моду, до загальної потужності, яку віддають диполі на резонансній частоті.

Показано, що система диполів збуджує резонансну моду з більшою ефективністю, ніж одиночний диполь (рис. 6). Показано, що невідповідність решітки диполів структурі резонансної моди, а також відмінність фази Φ одного з диполів призводить до зниження ефективності збудження ВР (рис. 7).

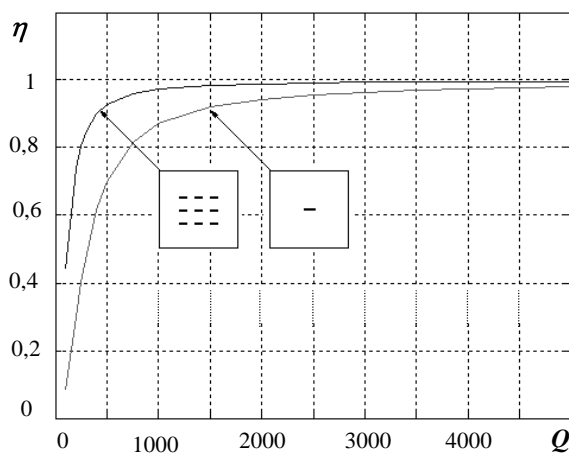


Рисунок 6 – Ефективність збудження ВР одним і системою диполів

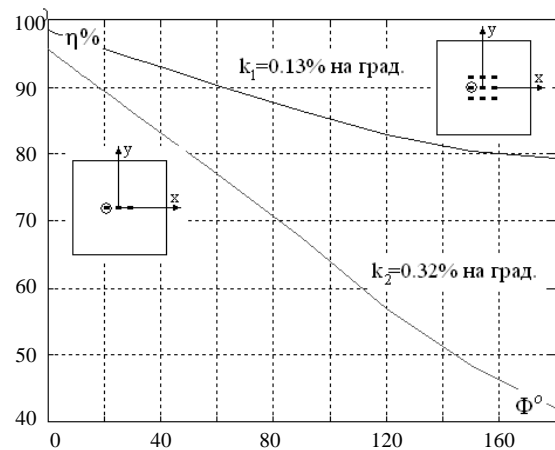


Рисунок 7 – Вплив несинфазності одного з диполів на ефективність збудження

У розділі 4 наведено результати експериментального дослідження радіаційних втрат двох видів зосереджених ЕЗ, що найчастіше застосовуються у ВР. Були досліджені ЕЗ у вигляді щілини і у вигляді отвору в діафрагмі. Досліджені ЕЗ були виконані на плоских дзеркалах і застосовувалися в двох типах квазіоптичних ВР: в дводзеркальних відкритих резонаторах (ДВР) і в дзеркальних дискових діелектричних резонаторах (ДДДР) з модами шепочучої галереї. ДДДР є півдиском, утвореним з дискового діелектричного резонатора діаметральним розсіченням площиною, яка перпендикулярна до основи диска. Півдиск розташовано на плоскому металевому дзеркалі, поверхня якого збігається з січною площиною. Така «дзеркальна» конструкція є привабливою для практичного використання: в ній зручно встановлювати ЕЗ в металевому дзеркалі під півдиском, а також розміщувати в відрізках хвильоводів напівпровідникові елементи.

Результати дослідження частотних характеристик радіаційних втрат ЕЗ отримано двома експериментальними методами в Ка-діапазоні. Метод балансу потужностей, що був представлений у розділі 2, набув розвитку для вимірювання радіаційних втрат ЕЗ і у ДВР, і у ДДДР. Запропоновано модифіковану еквівалентну схему ВР з ЕЗ. На відміну від традиційної схеми для ЕЗ з втратами (рис. 8а), модифікована схема в явному вигляді враховує втрати на нерезонансне випромінювання і втрати на розсіювання, що вносяться ЕЗ (рис. 8б). Для традиційної схеми вимірювалась добротність еквівалентного контуру Q_z та її номінали і далі, за допомогою модифікованої схеми, радіаційні втрати на розсіювання та на нерезонансне випромінювання. Введені та виміряні коефіцієнт нерезонансного випромінювання $\eta_{rad} = \eta Q_0 / Q_z$ та ефективність виведення енергії $\eta_{out} = (Q_z - Q_L) Q_0 / ((Q_0 - Q_L) Q_z)$. Результати дослідження радіаційних втрат обома методами мають добру кількісну і якісну відповідність (рис. 8).

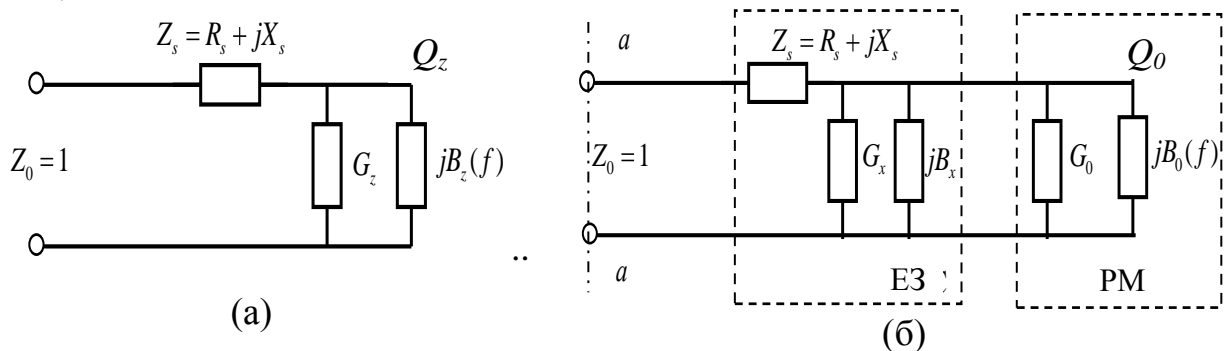


Рисунок 8—Традиційна (а) і модифікована (б) еквівалентна схема ВР з ЕЗ

У ДВР збуджувалася резонансна мода $TEM_{0,0,13}$, а у ДДДР мода шепочучої галереї $EH_{39,1,1}$, ЕЗ мали вид плавного переходу від хвильовидного перерізу $7,2 \times 3,4$ мм до щілини на плоскому дзеркалі з розмірами $b \times 7,2$ мм, або вид отвору діаметром d в діафрагмі товщиною 0,2 мм, що розташована в торці хвильоводу $7,2 \times 3,4$ мм врівень з площиною дзеркала. Було проведено

вимірювання коефіцієнта відбиття R , коефіцієнта передачі T , величин η , η_{rad} , η_{out} ДВР і ДДДР з ЕЗ і щілинами, і отворами. На рис. 9 наведено результати для ЕЗ з найбільшим зв'язком: щілини з $b=0,6$ мм та отвору з $d=3,1$ мм.

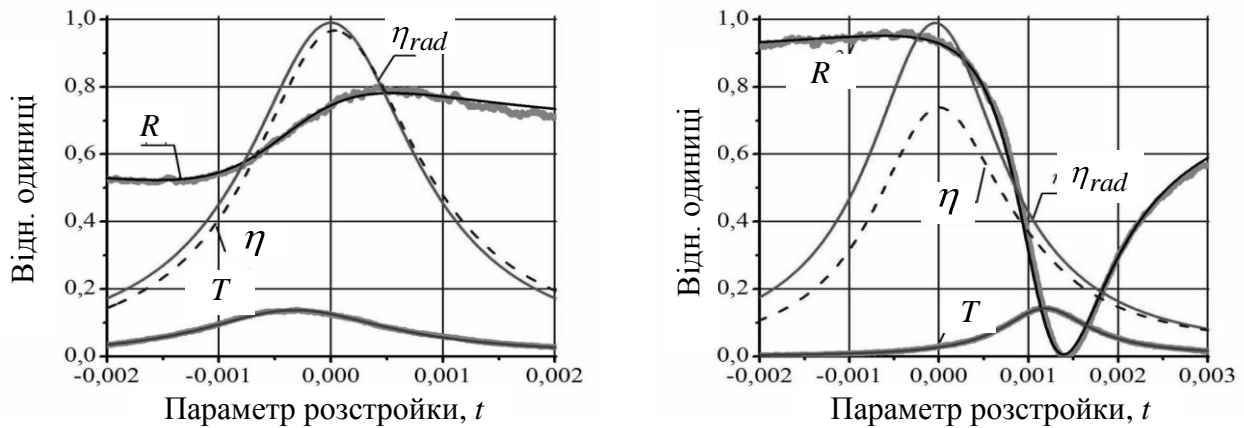


Рисунок 9—(а) ЕЗ – щілина: $b=0,6$ мм; (б) ЕЗ – отвір: $d=3,1$ мм

В експериментах спостерігалось зміщення резонансної частоти навантаженого ВР відносно частоти власного резонансу. Аналіз еквівалентної схеми ВР методом імпедансу показав, що максимальна ефективність збудження резонансної моди досягається на власній резонансній частоті еквівалентного контуру ВР з ЕЗ, що співпадає з результатом моделювання у розділі 3, а також спостерігається в експериментах. Зміщення резонансної частоти навантаженого ВР від власної резонансної частоти визначається величиною і характером реактивності ЕЗ. Для отворів зміщення, а значить і реактивність завжди більше, ніж для щілин, при однаковому коефіцієнті зв'язку з хвилеводом. Це призводить до зниження як ефективності збудження, так і ефективності виведення енергії через отвори, в порівнянні зі щілинами (рис. 10, 11).

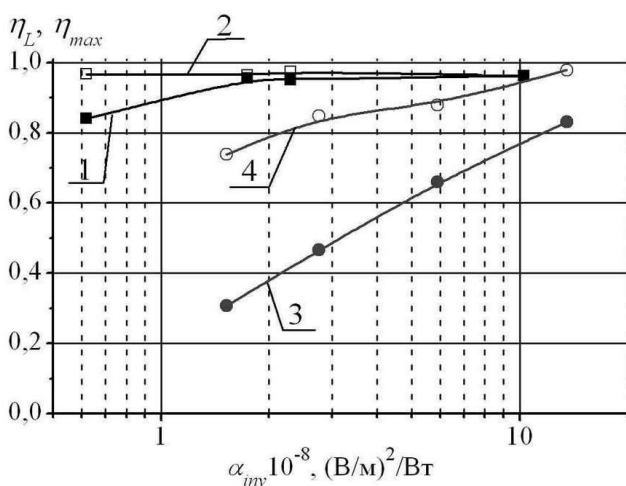


Рисунок 10—Ефективність збудження ДВР: на частоті навантаженого резонансу: 1 - щілини, 3 – отвори; максимальна: 2 – щілини, 4 - отвори

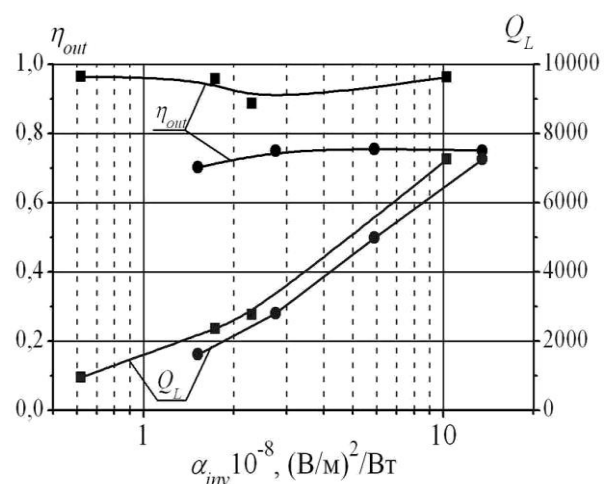


Рисунок 11—Ефективність виведення енергії і навантажена добротність ДВР. Квадрати - щілини, круги - отвори

Усі досліджені ЕЗ – щілини з розміром b (мм) 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 та отвори з діаметром d (мм) 2,2; 2,6; 2,85; 3,1 - були прокалібровані, тобто визначені їхні калібрувальні коефіцієнти α_{inv} , що дозволило порівнювати різні ЕЗ у ДВР, незважаючи на відмінності конструкцій і похибки виготовлення. У ДДР виміряні значення ефективності збудження склали 0,95...0,75 для щілин, а для отворів з діаметрами 2,6 та 3,1 ефективність складала від 0,55 до 0,45.

Знайдено втрати ВР через розсіювання резонансного поля на ЕЗ, показано, що відносні втрати на розсіювання для отворів більше, ніж для щілин, і, відповідно, ефективність виведення енергії у отвору менша, ніж у щілини. Для ДВР ефективності виведення енергії через ЕЗ - щілини і ЕЗ - отвори співвідносяться як 0,9 - 0,95 до 0,7 - 0,75, а для ДДР відповідно, як 0,8 - 0,9 до 0,4 - 0,5.

За даними вимірювань методом імпеданса були отримані значення коефіцієнта зв'язку ДДР з хвилеводом (рис. 12, рис. 13), визначеного як $\beta = Q_z / Q_{ext}$, де Q_{ext} - зовнішня добротність. Отримано залежності цих величин від положення ЕЗ d_2 відносно півдиска ДДР. Показано, що в досліджених ДДР коефіцієнт зв'язку не перевищує одиницю для отворів в діафрагмі при будь-яких положеннях ЕЗ і може бути в кілька разів більше одиниці для щілин.

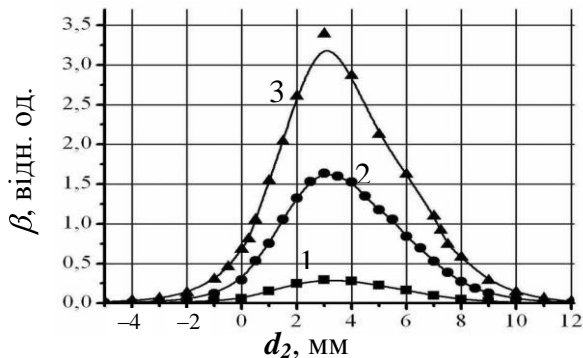


Рисунок 12—Зв'язок ДДР через щілину з b , мм: 1 - 0,1; 2 - 0,3; 3 - 0,6

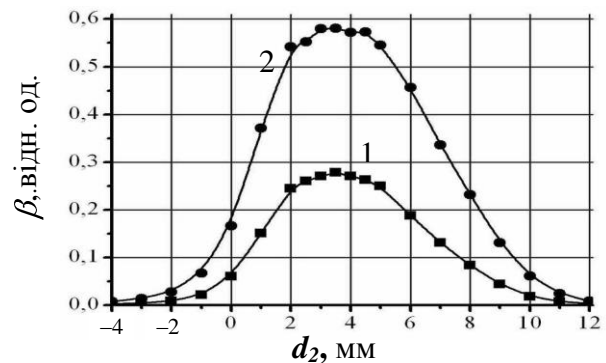


Рисунок 13—Зв'язок ДДР через отвір в діафрагмі з d , мм: 1 - 2,6; 2 - 3,1

На основі отриманих результатів можна зробити загальні рекомендації щодо застосування розглянутих ЕЗ в ВР мм діапазону. Так, якщо необхідно забезпечити малі коефіцієнти зв'язку, то краще застосувати ЕЗ у вигляді отвору малого діаметра, оскільки така конструкція технологічно простіше, ніж дуже вузька щілина, яка плавно переходить в хвилевід стандартного перетину, а ефективність збудження сягатиме максимально можливих значень. Якщо ж необхідно забезпечити великі коефіцієнти зв'язку ($\beta > 1$), то доцільніше використовувати звужений хвилевід, який при ширині щілини на дзеркалі більше 0,1 мм ($\beta \geq 1$ у 8-мм діапазоні хвиль) не є технологічно складним виробом, маючи, в порівнянні з отвором, більш високі ефективності збудження і виведення енергії.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі експериментально і теоретично досліджено радіаційні втрати енергії і ефективність елементів зв'язку та джерел збудження квазіоптичних відкритих резонаторів. Експериментально досліджено два види широко використовуваних зосереджених елементів зв'язку з порожнистими хвилеводами: щілина на дзеркалі, яка плавно переходить в хвилевід, і отвір в діафрагмі на дзеркалі. Елементи зв'язку застосовувалися в двох типах квазіоптичних резонаторів: в дводзеркальних і в дзеркальних дискових діелектричних.

В роботі запропоновано два нових методи вимірювання радіаційних втрат та ефективності елементів зв'язку. Один з методів засновано на вимірюваннях запасеної енергії резонансної моди і потужності всіх видів втрат. Другий використовує модифіковану еквівалентну схему відкритого резонатора з елементом зв'язку, що враховує як нерезонансне випромінювання, так і розсіювання на елементі зв'язку поля резонансної моди. Результати вимірювань ефективності збудження і виведення енергії, які отримано в експериментах обома методами, знаходяться в добрій відповідності між собою.

Експериментально показано, що можливо збуджувати резонансні коливання з ефективністю, що наближається до 100%, застосовуючи обидва види елементів зв'язку, але при виконанні певних умов за величиною коефіцієнта зв'язку, за величиною власних втрат резонатора, за місцем розташування щодо плями поля резонансної моди. В цілому ж, щілини мають більш високу ефективність збудження, ніж отвори.

З метою пояснення отриманих закономірностей створено феноменологічну модель збудження квазіоптичного відкритого резонатора зосередженим елементом зв'язку у вигляді відкритого кінця хвилеводу. Показано, що ефективність збудження має резонансний характер і досягає максимуму на частоті власного резонансу, величина максимуму ефективності збудження і ширина резонансної кривої ефективності залежать від власних втрат резонатора, місця розташування і геометричних параметрів елемента зв'язку. Вперше показано, що висока ефективність збудження зумовлена тим, що поле резонансного пучка, розсіяне на елементі зв'язку, і поле випромінювання з елемента зв'язку мають протилежні фази, а поле яке живить резонансний пучок, синфазне з полем резонансного пучка.

Показано, що факторами, що призводять до зниження ефективності збудження резонансної моди, а відповідно і до збільшення радіаційних втрат, є:

- зміщення частоти навантаженого резонансу щодо частоти власного резонансу, яке зумовлене фазовою неоднорідністю, що вносить елемент зв'язку;
- зростання власних втрат відкритого резонатора або зміщення елемента зв'язку від максимуму розподілу поля резонансної моди в область менших амплітуд, що викликає порушення балансу амплітуд протифазних полів;

Вперше запропоновано феноменологічну модель збудження квазіоптичного відкритого резонатора системою електричних диполів, яка враховує нерезонансне випромінювання джерела збудження. Модель побудована на основі розв'язку електродинамічної задачі збудження методом заданих струмів і використовує ряд припущень і апріорних знань про характеристики відкритого резонатора. Вивчено закономірності збудження відкритого резонатора різними конфігураціями елементарних диполів. Показано, що несинфазність джерел і невідповідність решітки джерел структурі резонансної моди призводить до зниження ефективності збудження ВР.

Теоретично і експериментально показано, що ефективність виведення енергії через зосереджений елемент зв'язку головним чином визначається його розсіювальними властивостями, як неоднорідності на дзеркалі. Показано, що щілини мають вищу ефективність виведення енергії, ніж отвори.

Список основних публікацій за темою дисертації

1. Булгаков Б.М., Натаров М.П., Скрасанов В.Н. Метод измерения эффективности возбуждения и вывода энергии в открытых резонаторах // Приборы и техника эксперимента. – 1988, № 4. – С. 118-120.
2. Булгаков Б.М., Натаров М.П., Скрасанов В.Н. Эффективность возбуждения сигнального резонатора квазиоптического смесителя щелью связи // В кн.: Твердотельные генераторы и преобразователи миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: сб. науч. тр. / Харьков, ИРЭ АН УССР, 1989. – С. 73–77.
3. Kuraev A.A., Natarov M.P., Rodionova V.N., Slepyan G.Ya., Slepyan A.Ya. Skresanov V.N. Coupling of open resonator and rectangular waveguide through a smooth waveguide transition / Int. J. Electronics, 1991, N5. – P. 1005-1014.
4. Булгаков Б.М., Гламаздин В.В., Натаров М.П., Скрасанов В.Н. Свойства квазиоптического резонатора с сосредоточенным элементом связи. I Феноменологическая модель / Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 1996. – Т. 1, № 1. – С. 46-53.
5. Булгаков Б.М., Гламаздин В.В., Натаров М.П., Скрасанов В.Н. Свойства квазиоптического резонатора с сосредоточенным элементом связи. II Расчет характеристик, эксперимент и обсуждение результатов / Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 1998. – Т. 3, №1. – С. 11-14.
6. Булгаков Б.М., Натаров М.П., Исследование эффективности возбуждения открытых резонансных систем / Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2003. – Т. 8, № 2. – С. 175-179.
7. Булгаков Б.М., Натаров М.П., Скрасанов В.Н. Характеристики возбуждения открытого резонатора системой электрических диполей /

Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2006. – Т. 11, №3. – С. 366-371.

8. Скрасанов В.М., Гламаздин В.В., Натаров М.П., Шубный О.І. Нові пристрої зв'язку високодобротних НДВЧ резонаторів з хвилеводами: теорія, проектування, експеримент. В кн.: Пріоритети наукової співпраці ДФФД і БРФФД: Матеріали спільних конкурсних проектів Державного фонду фундаментальних досліджень і Білоруського республіканського фонду фундаментальних досліджень. – К.: ДІА, 2007. – С. 177-190. – ISBN 966-8311-26-4.
9. Гламаздин В.В., Натаров М.П., Скрасанов В.Н., Шубный А.И. Эффективность возбуждения квазиоптического открытого резонатора из волновода // Изв. вузов. Радиофизика. – 2009. – Т. 52, № 3. – С. 231-249.
10. Гламаздин В.В., Натаров М.П., Скрасанов В.Н., Шубный А.И. Радиационные потери сосредоточенных элементов связи открытых резонаторов // Радиофизика и электроника. – 2011. – Т. 2(16), №3. – С. 12-25.
11. Гламаздин В.В., Натаров М.П., Скрасанов В.Н., Шубный А.И. Радиационные потери элементов связи зеркального дискового диэлектрического резонатора. Часть 1. Связь с согласованными волноводами / Радиофизика и электроника. – 2015. – Т. 6(20), №4. – С. 70-79.
12. Булгаков Б.М., Натаров М.П., Скрасанов В.Н. Способ измерения КПД возбуждения открытого резонатора / А.с. № 1425562, Б.И. № 35, 1989.
13. Slepyan G., Skresanov V., Rodionova V., Karpovich V., Natarov M. Electrodynamical modeling of broadband coupling elements between high-Q resonators and single mode waveguides / Proceedings of the 11-th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, June 26-29, 2006. Kharkov, Ukraine. – P. 382-386.
14. Гламаздин В.В., Натаров М.П., Скрасанов В.Н. Матричная модель связи квазиоптического открытого резонатора с одномодовым волноводом / Труды 16 Междунар. Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». 11-15 сентября 2006 г., Севастополь, Крым. – С. 550-551.
15. New elements for coupling of the high-quality millimeter-wave resonators with waveguides: theory, design, experiment / G. Slepyan, V. Karpoich, V. Rodionova, B. Bulgakov, V. Skresanov, M. Natarov // MSMW'07 Symposium Proceedings, Kharkov, Ukraine, June 25-30, 2007, pp. 651-653.
16. Characteristics of the Waveguide to Quasioptical or Dielectric Resonator Coupling / V. Glamazdin, M. Natarov, V. Skresanov, A. Shubny // MSMW'10 Symposium Proceedings, Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2010.

АНОТАЦІЯ

Натаров М.П. Радіаційні втрати та ефективність елементів зв'язку та джерел збудження квазіоптичних відкритих резонаторів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 - радіофізика. Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України, Харків, 2018.

При збудженні резонансних коливань у відкритих резонаторах існують радіаційні втрати енергії, які пов'язані з нерезонансним випромінюванням джерел збудження (або елементів зв'язку з зовнішніми джерелами) та з розсіюванням поля резонансної моди на елементі зв'язку. В дисертаційній роботі експериментально і теоретично досліджено закономірності, яким підпорядковуються такі втрати, з'ясовані фактори, які впливають на їх значення. Розроблено методи вимірювання радіаційних втрат, проведено вимірювання втрат в міліметровому діапазоні хвиль елементів зв'язку у вигляді щілини на дзеркалі, яка плавно трансформується у стандартний хвилевід, та у вигляді круглого отвору у тонкій діафрагмі на дзеркалі у торці хвилеводу. Елементи зв'язку використовувалися у квазіоптичних відкритих резонаторах двох типів: у дводзеркальних резонаторах та у дзеркальних дискових діелектричних резонаторах з модами шепочучої галереї. Для адекватної інтерпретації експериментальних характеристик розроблено оригінальну феноменологічну модель збудження відкритого резонатора, яка дозволила проаналізувати резонансні та нерезонансні процеси у відкритому резонаторі і дати ясне фізичне трактування закономірностям, що спостерігаються.

Ключові слова: квазіоптичний відкритий резонатор, елемент зв'язку, прямокутний хвилевід, добротність, нерезонансне випромінювання, радіаційні втрати, ефективність збудження, ефективність виведення енергії.

АННОТАЦИЯ

Натаров М.П. Радиационные потери и эффективность элементов связи и источников возбуждения квазиоптических открытых резонаторов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика. Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова Национальной академии наук Украины, Харьков, 2018.

В открытых резонаторах при возбуждении резонансных колебаний существуют радиационные потери энергии, связанные с нерезонансным излучением источников возбуждения (или элементов связи с внешними источниками) и с рассеянием поля резонансной моды на элементе связи. В диссертационной работе экспериментально и теоретически исследованы закономерности, которым подчиняются такие потери, выявлены факторы,

влияющие на их величину. Разработаны методы измерения радиационных потерь, в миллиметровом диапазоне длин волн проведено измерение потерь элементов связи в виде щели на зеркале, плавно переходящей в стандартный волновод, и в виде круглого отверстия в тонкой диафрагме на зеркале в торце волновода. Элементы связи использовались в квазиоптических открытых резонаторах двух типов: в двухзеркальных резонаторах и в зеркальных дисковых диэлектрических резонаторах с модами шепчущей галереи. Для адекватной интерпретации экспериментальных характеристик разработана оригинальная феноменологическая модель возбуждения открытого резонатора, которая позволила проанализировать резонансные и нерезонансные процессы в открытом резонаторе и дать ясную физическую трактовку закономерностям, которые наблюдаются.

Ключевые слова: квазиоптический открытый резонатор, элемент связи, прямоугольный волновод, добротность, нерезонансное излучение, радиационные потери, эффективность возбуждения, эффективность вывода энергии.

SUMMARY

Natarov M.P. Radiation loss and efficiency of coupling elements and excitation sources of the quasi-optical open resonators. - The manuscript.

The thesis for the degree of Candidate of Science in specialty 01.04.03 - radiophysics. - O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2018.

At excitation of resonant oscillations in open resonators there are radiation losses of energy which are connected with non-resonant radiation of excitation sources (or coupling elements with external sources) and with the scattering of the resonance mode field on the coupling element. In the dissertation, the mechanisms that influence such losses are investigated experimentally and theoretically, and the factors that influence on their values are determined. The methods for measuring radiation losses are developed, measurements of losses in the millimeter range of the coupling elements in the form of a slot on the mirror, which gradually transforms into a standard waveguide, and in the form of a circular aperture in a thin diaphragm on the mirror at the end of the waveguide. The coupling elements were used in the two types of quasi-optic open resonators: in the two-mirror resonators and in the mirror disc dielectric resonators with whispering gallery modes. An original phenomenological model of an open resonator excitation was developed for an adequate interpretation of experimental characteristics, which allowed to analyze resonant and non-resonant processes in open resonator and to give a clear physical interpretation of the observed regularities.

Key words: quasi-optical open resonator, coupling element, rectangular waveguide, quality factor, non-resonant radiation, radiation losses, excitation efficiency, energy output efficiency.

Наукове видання

Натаров Михайло Петрович

**РАДІАЦІЙНІ ВТРАТИ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ЗВ'ЯЗКУ
І ДЖЕРЕЛ ЗБУДЖЕННЯ КВАЗІОПТИЧНИХ
ВІДКРИТИХ РЕЗОНАТОРІВ**

Відповідальний за випуск О. І. Білоус

Підписано до друку 28.12.2017 р. Формат 60x84 1/16.
Папір офс. Ум. друк. арк. 0,9. Зам. № 5. Тир. 100 прим.

Надруковано з макету замовника
Ротапринт ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків

Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру видавців
та виготовників видавничої продукції: серія ДК №1133 від 27.11.2002 р.