

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

**ЛІСКЕ ОЛЕКСІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 621.371+537.862

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИПРОМІНЮЮЧИХ КОМПОНЕНТІВ  
ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ЩІЛИННИХ ЛІНІЙ  
ПЕРЕДАЧІ**

05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів - 2018

**Дисертацією є рукопис.**

**Робота виконана** у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Гоблик Віктор Васильович**, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Козловський Валерій Валерійович**, Національний авіаційний університет, завідувач кафедри засобів захисту інформації;

кандидат технічних наук, доцент  
**Рожновський Михайло Васильович**, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, завідувач кафедри технічної електродинаміки та систем радіозв'язку.

Захист відбудеться «07» вересня 2018 року о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного навчального корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «03» серпня 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.10

Демидов І.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Випромінювачі на основі щілинних ліній передачі, що збуджуються полем біжучої хвилі, відомі з 1963 року. Вони є компонентами інтегральних схем, використовуються в низці антенних систем (АС), таких як АС амплітудно-фазометричної пеленгації, сучасні телекомунікаційні системи (радіоінтернет), бортові АС літальних апаратів та наземного транспорту, АС систем GPS-навігації. Широке використання щілинних випромінювачів обумовлено їх перевагами: невеликі розміри, можливість забезпечення електричного сканування діаграми спрямованості, робота як з лінійною, так і з коловою поляризацією, можливість конструювання антенних решіток з випромінювачів, що живляться полем біжучих хвиль у щілинній лінії передачі. Проте, потенційні можливості таких антен до теперішнього часу в повній мірі не вивчені внаслідок відсутності строгої теорії таких антен, тому дослідження та покращення ефективності випромінюючих структур на основі щілинних ліній передачі представляє інтерес як з практичної, так і з теоретичної точок зору.

Найбільш відомими дослідженнями щілинних випромінювачів, відповідного математичного апарату, моделей і методів займалися такі вчені: М.А. Бонч-Бруєвич, М.С. Нейман, А.А. Пістолькорс, Я.Н. Фельд. Дослідженням електродинамічних та випромінюючих характеристик ЩЛП з 60-тих рр. 20 століття займаються Ю.Ю. Радциг, Рамеш Гарг (Ramesh Garg), К.С. Гупта (K.C. Gupta) та Сеймур Б. Кон (S.V. Cohn), який уперше отримав результати дослідження щілинних ліній передачі аналітичними методами. В даний час дослідження випромінювачів на основі щілинних ліній передачі представляє комерційний інтерес для фірм-розробників сучасних засобів зв'язку, таких як: Alcatel, Panasonic, ALPS Electric, Hon Hai Precision Industry, Technicolor, а також для розробників засобів зв'язку для літальних апаратів, військової техніки та електрообладнання.

Теоретичне дослідження щілинних випромінюючих структур, які використовуються у радіотехнічних системах дециметрового та сантиметрового діапазонів довжин хвиль, має велике значення. При цьому актуальними залишаються наступні проблеми: підвищення точності розрахунків, що дає змогу зменшити долю трудомісткого та дорогого експериментального відлагодження в об'ємі робіт по створенню надвисокочастотних пристроїв, підвищення ефективності алгоритмізації для розв'язання завдань дослідження електромагнітних властивостей щілинних випромінювачів та скорочення машинного часу, необхідного для розрахунків, що особливо суттєво при розробленні систем автоматизованого проектування, проведенні чисельного експерименту з метою виявлення принципової можливості застосування щілинних випромінювачів для отримання специфічних електродинамічних характеристик радіотехнічних пристроїв.

Таким чином, підвищення ефективності метал-діелектричних структур, що збуджуються полем біжучої хвилі у щілинній лінії передачі є **актуальним науковим завданням**, розв'язання якого дасть можливість розширити їх функціональні можливості за рахунок збільшення діапазону робочих частот та підвищення коефіцієнту підсилення.

**Зв'язок роботи з науковими планами.** Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Національного університету "Львівська політехніка".

Дисертація виконана в межах науково-дослідних робіт:

- Розробка наукових засад моделювання нанорозмірних структур для інфокомунікаційних технологій (ДБ/Аудіо), номер держ. реєстрації 0104U002321;
- Дослідження модульованих нанорозмірних структур інфокомунікаційних систем з використанням нейромережових технологій (ДБ/Стінф), номер держ. реєстрації 0107U00826;
- Розробка теорії, методів аналізу та синтезу модульованих нанорозмірних структур з заданими інфокомунікаційними властивостями (ДБ/Модем), номер держ. реєстрації 0110U001117;
- Моделювання процесів електромагнітного відклику в модульованих нанорозмірних метал-діелектричних та напівпровідникових структурах (ДБ/Теза), номер держ. реєстрації 0113U001354.

В даних роботах автор був виконавцем та відповідальним виконавцем.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення методів підвищення ефективності випромінюючих компонентів на основі щілинних ліній передачі для використання в інфокомунікаційних системах.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- проаналізувати та узагальнити літературні дані щодо сучасного стану та перспектив розвитку щілинних випромінювачів;
- обґрунтувати способи покращення ефективності випромінюючих компонентів на основі щілинних ліній передачі та розвинути методи визначення їх параметрів;
- розробити новий метод, числові алгоритми та прикладну комп'ютерну програму для дослідження широкого класу щілинних випромінювачів, провести теоретичне дослідження на електродинамічному рівні властивостей електромагнітних хвиль у щілинних лініях передачі;
- створити фізичні моделі та провести експериментальну верифікацію розроблених методів дослідження розподілу електромагнітного поля щілинних випромінювачів;
- запропонувати конкретні практичні рекомендації щодо використання щілинних випромінювачів в якості елементів антенних решіток при забезпеченні синфазності живлення окремих елементів, що сприяє підвищенню ефективності пристроїв даного класу та поліпшенню їх масогабаритних показників.

**Об'єкт досліджень:** процеси випромінювання електромагнітної хвилі випромінюючими компонентами на основі щілинних ліній передачі.

**Предмет досліджень:** моделі та методи підвищення ефективності випромінюючих компонентів на основі щілинних ліній передачі для пристроїв інфокомунікаційних систем.

**Методи дослідження:** для реалізації поставлених завдань використано методи математичного аналізу, методи математичної фізики, засоби комп'ютерної алгебри (пакет програм Matlab). Для знаходження вхідних опорів диполів із заданим розподілом напруг на вході застосовано метод наведених електро-рушійних сил (ЕРС). Експериментальна перевірка результатів моделювання з метою верифікації

розробленої моделі була виконана методом вимірювання поля випромінювання щілинного випромінювача в дальній зоні.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше розроблено математичну модель процесу збудження електричних струмів у металевому екрані скінчених розмірів біжучою хвилею щілинної лінії передачі, у якій, на відміну від відомих моделей, екран заміщено решіткою ортогональних диполів, що дало змогу застосувати для побудови математичної моделі метод наведених ЕРС для знаходження взаємних опорів таких диполів і дослідити вплив геометричних розмірів екрану на електродинамічні властивості щілинних випромінювачів у заданій смузі частот та збільшити потенційні можливості методу для розроблення щілинних антен з покращеними електродинамічними та функціональними властивостями.

2. Набув подальшого розвитку метод визначення параметрів щілинної лінії передачі, який, на відміну від відомих, дозволяє отримати більш точні значення коефіцієнту сповільнення та коефіцієнту загасання хвилі у щілинній лінії передачі, що дає змогу підвищити ефективність щілинного випромінювача складної геометричної конфігурації та антенних решіток, що складаються з кількох щілинних випромінювачів.

3. Вперше розроблено новий підхід до пошуку оптимальних конструктивних рішень щілинних ромбічних випромінювачів (ЩРВ), який, на відміну від відомих, передбачає використання спеціалізованої математичної моделі, яка описує взаємозв'язок геометричних розмірів щілини ЩРВ та довжини хвилі у щілинній лінії передавання  $\lambda_{щ}$ , що дало змогу, шляхом застосування схемотехнічного моделювання, встановити ефективні геометричні розміри ЩРВ для отримання поперечного випромінювання, зокрема виявлено, що периметр ромбу повинен становити  $2\lambda_{щ}$ .

Новизна отриманих результатів підтверджується відсутністю розроблених моделей та методів у відомих положеннях теорії щілинних випромінювачів.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

1. Розроблено та реалізовано за допомогою фізичної моделі спосіб визначення параметрів щілинної лінії передачі, який дає змогу більш ефективно використовувати розроблені методи для моделювання щілинних випромінювачів довільної геометричної форми у екрані скінчених розмірів.

2. Запропоновану автором методику використано для створення щілинних випромінювачів із підвищеною ефективністю використання поверхні за рахунок використання явища випромінювання біжучих у щілинних лініях передачі хвиль.

3. Розроблено принципово нову конструкцію щілинної антени, в якій щілинний випромінювач виконано у вигляді ромбу, що забезпечило збільшення смуги робочих частот, покращення узгодження антени в смузі робочих частот, зменшення рівня бокового випромінювання та підвищення коефіцієнту підсилення (патент України №104959).

4. Удосконалено конструкцію щілинного випромінювача шляхом використання нахилоного рефлектора, що дало змогу отримати смугу робочих частот 29% за рівнем КСХ < 2.

5. Вперше запропоновано і реалізовано антенну решітку з чотирьох ЩРВ. Розроблено компланарну схему живлення, яка дала змогу забезпечити синфазне

живлення усіх елементів антенної решітки в широкій смузі частот. Діапазон робочих частот становить 2,32..2,75 ГГц, а коефіцієнт підсилення становить 12,2 дБ. При цьому компланарне з'єднання полегшує інтеграцію ШВ з твердотільними активними пристроями.

6. Створений автором програмний засіб спрощує проведення розрахунків розробленими методами.

Практичну цінність отриманих результатів підтверджують акти впровадження, отримані у Фізико-механічному інституті ім. Карпенка НАН України (м. Львів) та Національному університеті "Львівська політехніка".

**Особистий внесок здобувача** полягає у самостійному виконанні теоретичної і експериментальної частин роботи та інтерпретації одержаних результатів. У публікаціях, написаних у співавторстві, автором дисертації: у роботах [4, 9] розроблено нові конструкції щілинних випромінювачів; у роботах [10, 22, 28] розроблено алгоритм та комп'ютерну програму для розрахунку розподілу в дальній зоні електромагнітного поля фазованої антенної решітки диполів, розташованих на діелектрику з екраном, що живляться щілинною лінією ромбічної форми; у роботах [6, 13, 25, 27] виконано огляд принципів побудови та методів математичного моделювання щілинних випромінювачів; у роботах [3, 7, 14, 15, 21, 26, 30] прийнято участь у дослідженнях модульованих нанорозмірних метал-діелектричних та напівпровідникових структур та виконано комп'ютерне оброблення експериментальних даних; у роботах [1, 2, 23] наведені результати математичного моделювання щілинних випромінювачів; у роботі [24] експериментально досліджено розподіл електромагнітного поля щілинного випромінювача за розробленою методикою та оброблено результати верифікації математичної моделі знаходження розподілу електромагнітного поля фазованої антенної решітки диполів, що живляться полем біжучих хвиль у щілинній лінії передачі; у роботах [5, 8, 16, 17, 19, 20] досліджено можливість використання щілинного випромінювача в якості випромінювача електромагнітної енергії дефектоскопа; у роботі [29] виконано розроблення випромінювача на основі щілинної лінії передачі для використання в якості елемента антенної решітки, призначеної для перетворення теплового випромінювання в електричну енергію.

**Апробація результатів роботи.** Основні результати роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях:

- 5th, 7th, 8th International Conference «Antenna Theory and Techniques» (Kyiv, Ukraine, 2005, 2009, 2011);

- 5th, 11th, 13th International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (Lviv-Slavske, Ukraine, 2006, 2012, 2016);

- 11, 12, 14, 15, 16 відкрита науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська Політехніка» з проблем електроніки (Львів, Україна, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013);

- Третя міжнародна наукова конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Комп'ютерні науки та інженерія» (Львів, Україна, 2009);

- 11th, 12th International Conference «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics» (Polyana-Svalyava, Ukraine, 2011, 2013);

- IXth, XIth International Conference «Antenna Theory and Techniques» (Odessa, Kyiv, Ukraine, 2013, 2017)
- 12th International Conference «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics» (Lviv-Polyana, Ukraine, 2013);
- Міжнародні науково-технічні конференції «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ» (Львів, Україна, 2016, 2017);
- Науково-практична конференція «Застосування сухопутних військ Збройних сил України у конфліктах сучасності» (Львів, Україна, 2016);
- Тринадцята наукова конференція ХНУ Повітряних сил ім. І. Кожедуба (Харків, Україна, 2017).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 30 друкованих наукових праць. З них 7 статей (5 статей у наукових фахових виданнях України, зокрема 3 статті у наукових періодичних виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus [1-3]), праць у збірниках матеріалів і тез доповідей конференцій - 21 (з них 9 входять до наукометричної бази Scopus [10, 11, 16-18, 22, 24, 26, 30]). Отримано 1 патент на винахід та 1 патент на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і шести додатків. Загальний обсяг роботи 208 сторінок, з них 123 сторінки – основного тексту. Дисертація містить 119 рисунків і 8 таблиць. Список використаних джерел нараховує 112 найменувань.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи; сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет і методи досліджень; висвітлюється наукова новизна та практичне значення отриманих результатів; зв'язок роботи з науковими програмами та темами; відзначений особистий внесок автора; наведені дані про апробацію, публікації та структуру роботи.

У **першому розділі** – «**Аналіз принципів побудови випромінюючих компонентів на основі щілинних ліній передачі**» - проведено аналіз сучасного стану розвитку випромінюючих структур на основі щілинних ліній передачі (ЩЛП), надано їхню класифікацію.

Проведено аналіз праць вітчизняних та закордонних вчених, у яких викладено науково-технічні ідеї та розроблені на їхній основі методи моделювання щілинних випромінювачів (ЩВ). Виявлено фактори, що впливають на випромінювання електромагнітного поля ЩВ у ближній та дальній зонах.

У сучасних наукових публікаціях підходи до моделювання ЩВ розрізняються, в залежності від його типу. Перший тип ЩВ використовує режим стоячих хвиль у резонансній структурі, що являє собою коротку ( $0,001..0,03\lambda$ ) або довгу щілину ( $0,25..2\lambda$ ), прорізану в провідному екрані або в стінках хвилеводів чи резонаторів.

Другий тип ЩВ випромінює енергію хвиль, біжучих вздовж ЩЛП. Випромінювачі такого типу можуть бути використані, як елементи антенної решітки (АР), що живляться криволінійною ЩЛП. Це дозволяє отримати більший коефіцієнт підсилення. Також до переваг випромінювачів такого типу можна віднести те, що вони можуть працювати у більшому діапазоні частот у порівнянні з

мікросмушковими випромінювачами. Так, смуга частот петлевого ЩВ при  $KСХ < 2$  складає 26.7%. Також вони дозволяють працювати як з лінійною так і з коловою поляризацією.

У роботі показано, що найбільш важливим завданням є розроблення моделі випромінювання ЩВ, яка б враховувала вплив розмірів екрану ЩВ на її електродинамічні характеристики.

На основі проведеного аналізу доведено необхідність розроблення та дослідження випромінюючих компонентів на основі ЩЛП. Одним із напрямів підвищення ефективності, який включає в себе підвищення коефіцієнту підсилення, підвищення широкосмуговості та зменшення масогабаритних характеристик АР, є використання явища випромінювання біжучих у ЩЛП електромагнітних хвиль та можливості змінювати конфігурацію ЩВ. При цьому необхідно зосередитись на розробленні способу підвищення завадостійкості, яке можливе за рахунок зниження рівня бокових пелюстків АР.

**Другий розділ – «Дослідження методів моделювання і автоматизованого проектування щілинних випромінювачів»** - за допомогою комп'ютерних моделей досліджено особливості випромінювання ЩВ електромагнітної енергії на прикладі ЩВ ромбічної форми.

Для аналізу ЩВ найпопулярнішими є наступні засоби електромагнітного симулювання: AWR Microwave Office (метод моментів), Ansoft HFSS (метод скінчених елементів) та CST Microwave Studio (скінчено-різницевий метод в часовій області).

Розроблено конфігурацію ЩВ, який являє собою металеву площину з вузькою щілиною шириною  $w$  у формі ромбу, що знаходиться на діелектричній підкладці товщиною  $t \ll \lambda_{щ}$  ( $\lambda_{щ}$  - довжині хвилі у ЩЛП), з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon$ . Довжина сторони ромба рівна  $L_s$ . Інша сторона діелектричної підкладки може бути з металізацією або без.

Щілинний ромбічний випромінювач (ЩРВ) досліджувався при закороченні на кінці ЩЛП. Збудження випромінювача здійснювалось портом зосередженого живлення в нижній частині ромбу. ЩРВ складається з металевої площини з розмірами  $107 \times 107$  мм, довжина сторони ромба  $L_s = 50$  мм, ширина щілини  $w = 1.5$  мм, висота діелектричної підкладки  $t = 1.5$  мм, відносна діелектрична проникність  $\epsilon = 5.5$ .

Для моделювання використано ЕОМ з процесором з частотою 2.6 ГГц Dual-Core та 3.25 Гб оперативної пам'яті.

Досліджено вплив кута  $\gamma$  на характеристики ЩРВ (рис. 1).

При збільшенні  $\gamma$  отримано узгодження ЩРВ з фідером живлення в більш ширшому діапазоні (рис. 1 б). При зміні кута  $\gamma$  в межах  $60^\circ..120^\circ$  зберігається односпрямований характер випромінювання ЩРВ, у якого периметр рівний  $2\lambda_{щ}$  (рис. 1 в, г).

В режимі EMSIGHT у програмі Microwave Office поверхня ЩРВ розбивається на 3095 прямокутних комірок при заданому розмірі комірки  $S = 1.36$  мм, час розрахунку склав 12 секунд при необхідному об'ємі пам'яті 82 Мб та на 6830 комірок при розмірі комірки  $S = 0.68$  мм і часі розрахунку 1 хв. 9 секунд та об'ємі пам'яті 359 Мб. При цьому найменші комірки зосереджені поблизу ЩЛП. В режимі АХІЕМ поверхня випромінювача розбита на 324 комірки, досягнута похибка конвергенції -47.9 дБ, розрахунок тривав 11 секунд.



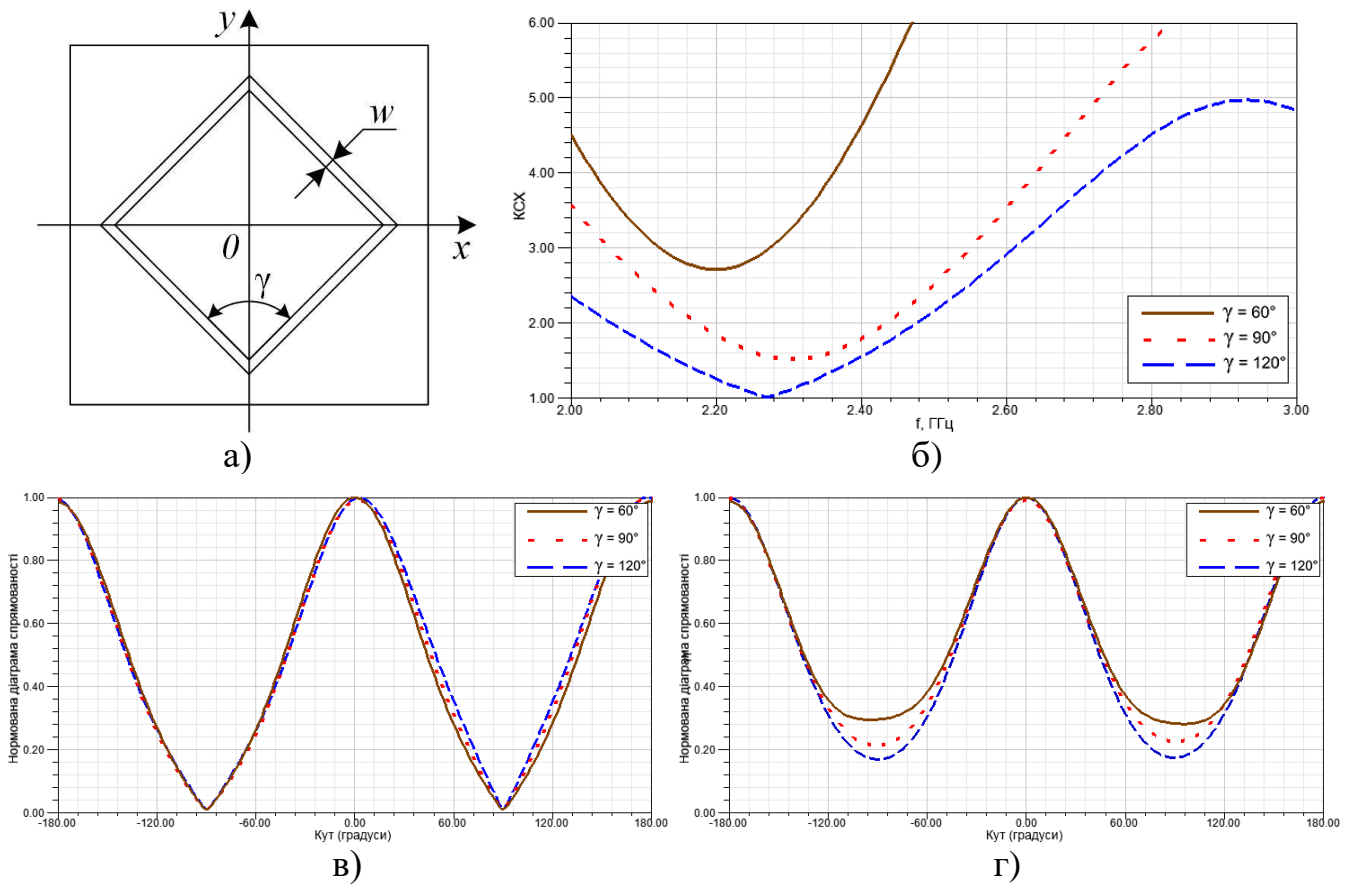


Рис. 1. Результати комп'ютерного моделювання щілинного ромбічного випромінювача: а – геометрія ромбічного випромінювача; б – частотна залежність  $КСХ$ ; в – діаграма спрямованості в площині  $YOZ$ ; г – діаграма спрямованості в площині  $XOZ$

Розроблені моделі ЩРВ дали змогу здійснити порівняльний аналіз засобів 3D моделювання електромагнітних структур (табл. 1). Слід зазначити, що мінімальне значення параметру  $S_{11}$ , отриманого за допомогою трьох програм електромагнітного симулювання, є однаковим. В Ansoft HFSS і AWR Microwave Office резонансна частота є приблизно однаковою, при цьому програмі AWR MWO для розрахунку знадобилось значно менше часу.

Отримані результати комп'ютерного моделювання ЩРВ свідчать про те, що засоби 3D моделювання електромагнітних структур потребують значних обчислювальних ресурсів та часу на обчислення при забезпеченні прийнятливої точності. Найменш вибагливим з цієї точки зору для моделювання щілинних випромінювачів є 2.5D метод моментів.

Враховуючи вищесказане та з огляду на те, що ЩВ можуть виконуватись у екранах великих розмірів (наприклад, у обшивці літака, безпілотної літальної апарату або наземного транспортного засобу), актуальним є завдання розроблення математичної моделі для дослідження впливу розмірів екрану, у якому прорізана щілина, на властивості ЩВ та здатної проводити швидкий розрахунок електродинамічних характеристик ЩВ та антенних решіток з декількох випромінювачів.

## Порівняння засобів комп'ютерного моделювання

<b>CST Microwave Studio</b>		
	Перехідний процес	Частотна область
Точність	- 30 дБ	0.001
Кількість комірок	76,160 шестигранників	123,491 тетраедрів
Час розрахунку	1:02	34:32
<b>Ansoft HFSS</b>		
Точність	0.0033	
Кількість ітерацій	20	
Кількість комірок	132,002 тетраедрів	
Час розрахунку	1:08:11	
Пам'ять	1.13 ГБ	
<b>AWR Microwave Office, режим EMSIGHT</b>		
Розмір комірок	1.36×1.36 мм	0.68×0.68 мм
Кількість комірок	3095	6830
Час розрахунку	0:12	1:09
Пам'ять	82 МБ	359 МБ
<b>AWR Microwave Office, режим AXIEM</b>		
Похибка	- 47.9 дБ	
Кількість комірок	324	
Час розрахунку	0:11	

У третьому розділі – «Моделювання та дослідження щілинного ромбічного випромінювача у екрані скінчених розмірів» - запропоновано

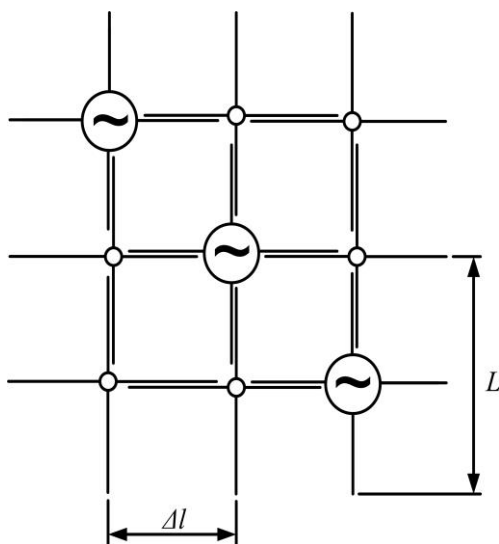


Рис. 2. Геометрія моделі щілинного ромбічного випромінювача

удосконалену модель для дослідження процесу випромінювання електромагнітних хвиль щілинним ромбічним випромінювачем у екрані скінчених розмірів.

Удосконалена модель базується на представленні металевої поверхні з прорізаною криволінійною щілиною у вигляді антени біжучої хвилі вібраторного типу із заданим розподілом напруг і застосуванні методу наведених ЕРС для знаходження взаємних опорів диполів.

Для отримання просторового розподілу поля ЩРВ виконано наступні дії:

1) металеву площину замінено невідомою густиною поверхневого струму  $J(x, y) = J_x \hat{x} + J_y \hat{y}$ ;

2) провідна поверхня представлена у вигляді подвійної решітки з  $N$  вертикальних (паралельних осі  $OY$ ) і  $M$  горизонтальних (паралельних осі  $OX$ ) безмежно тонких

дипольних випромінювачів довжиною  $L \ll \lambda$ , розташованих на відстані  $l$  один від одного (рис. 2);

3) закон розподілу струму вздовж вібраторів – гармонічний, а активні вібратори розташовані вздовж щільної лінії і живляться в центрі  $\delta$ -розриву напругою, закон розподілу якої характерний для довгої лінії з втратами в режимі, який визначається опором навантаження на кінці ЩЛП. Віддаль між точками живлення активних вібраторів вважається нескінченно малою.

Величини невідомих струмів диполів, виражених вектором-стовпцем  $[I]$ , можуть бути визначені з відомої матриці взаємних опорів  $[Z]$  та розподілу напруг живлення диполів  $[U]$  методом наведених ЕРС за допомогою системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР):

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & \dots & Z_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Для розв'язку СЛАР (1) та знаходження невідомого вектору-стовпця  $[I]$  складено програму у середовищі Matlab.

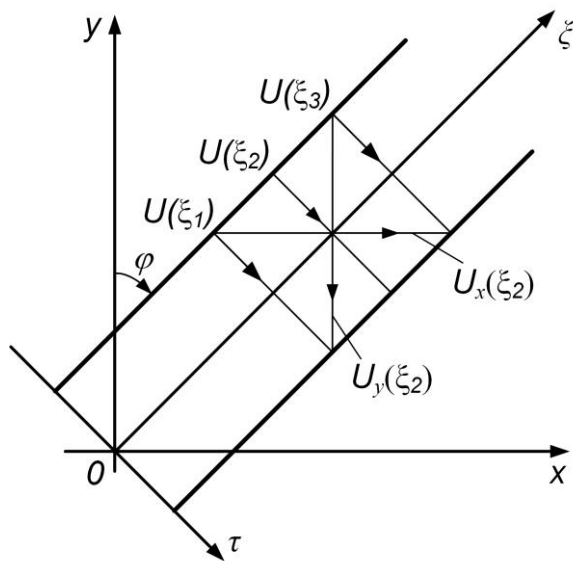


Рис. 3. Компоненти напруги в щільній лінії передачі

апертури є напругою  $U(\xi)$  між контурами щілини в цьому перерізі:

$$U(\xi) = \int_{-w/2}^{w/2} E(\tau, \xi) dx \quad (3)$$

Вхідні опори  $Z'$  диполів горизонтальної АР (рис. 4 а) та  $Z''$ - вертикальної АР (рис. 4 б) живляться напругами  $U_x(\xi)$  та  $U_y(\xi)$ .

Напруга вздовж ЩЛП задана законом:

$$U(z) = U_0 [e^{-\gamma z} + \rho \cdot e^{\gamma z}], \quad (2)$$

де  $\gamma = \alpha + j\beta$  – комплексна стала поширення;

$\alpha$  – коефіцієнт згасання;

$\beta$  – коефіцієнт фази;

$\rho$  – коефіцієнт відбиття.

Метод визначення вертикальних (паралельних осі  $OY$ ) та горизонтальних (паралельних осі  $OX$ ) компонентів напруги у ЩЛП, які живлять, відповідно, вертикальні та горизонтальні активні диполі, подано далі.

Тангенціальна складова  $E(\xi)$  напруженості електричного поля в щілині є функцією координати  $\xi$  (рис. 3), що співпадає з напрямком ЩЛП. Відомо, що інтеграл цієї функції вздовж осі  $O\tau$  в кожному сеченні

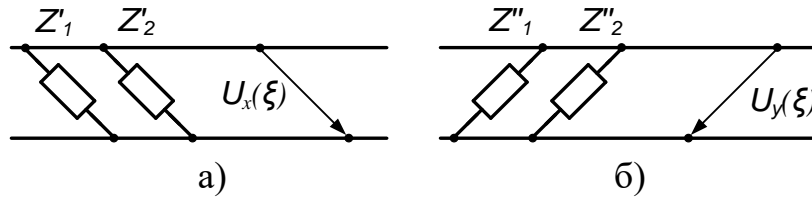


Рис. 4. Вхідні опори диполів: а – горизонтальної АР; б – вертикальної АР

Отримано вирази для горизонтальних  $U_x(\xi)$  та вертикальних  $U_y(\xi)$  складових напруги між контурами щілини, розміщеної під кутом  $\varphi$ . Напруженості поля розкладаються на компоненти:

$$E(\tau, \xi) = E_x(\tau, \xi) + E_y(\tau, \xi). \quad (4)$$

Оскільки  $w \ll \lambda$ , поле  $E(\tau, \xi)$  в поперечному січенні щілини передбачається незалежним від  $\tau$ .

Розподіли компонентів  $U_x(\xi)$  та  $U_y(\xi)$  відрізняються від  $U(\xi)$  у місцях мінімумів та максимумів, причому відхилення зростає при збільшенні ширини щілини. В режимі біжучої хвилі при відсутності мінімумів та максимумів у розподілі напруги компоненти  $U_x(\xi)$  та  $U_y(\xi)$  приблизно рівні  $U(\xi)$ .

У результаті розв'язку СЛАР визначені невідомі струми живлення диполів АР. Оскільки напруга на диполі вважається заданою, то його вхідний імпеданс

розраховано за виразом  $Z_0 = U_0 / I_0$ . Закон розподілу струму вздовж диполів вважається гармонічним. На рис. 5 зображено векторний розподіл струмів живлення диполів, який є сумою розрахованих значень вертикальних та горизонтальних компонентів струму при довжині периметра ромбу  $2\lambda_{щ}$ . Досліджено розподіл поверхневих струмів ЩРВ у екрані з розмірами 87x87 мм, 87x137 мм, 87x250 мм.

Досліджено фазу вертикальних та горизонтальних компонентів поверхневого струму. Виявлено, що поверхня ЩРВ з розмірами 87x87 мм на частоті 2.4 ГГц складається з чотирьох областей, у яких зсув фази між горизонтальними та вертикальними компонентами складає  $+29^\circ$  та  $-155^\circ$ .

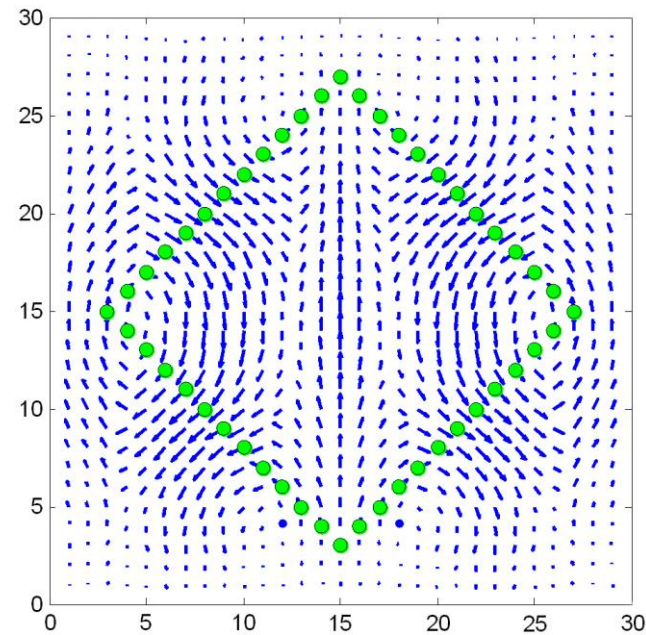


Рис. 5. Розподіл поверхневих струмів щілинного ромбічного випромінювача

Для аналізу діаграми спрямованості (ДС) ЩРВ використовуємо пряме перетворення Фур'є від визначеного раніше амплітудно-фазового розподілу поверхневих струмів:

$$\dot{f}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot e^{j(\Phi_i + k\rho_i \cos \gamma_i)} \quad (5)$$

де  $N$  – кількість диполів у моделі;

$A_i$  і  $\Phi_i$  – амплітудний і фазовий розподіл у моделі відповідно;

$\rho_i$  – відстань від  $i$ -го диполя до початку координат;  
 $\gamma_i$  – кут між напрямком від початку координат до  $i$ -го елемента і напрямком від початку координат до точки спостереження;  
 $k$  – хвильове число.

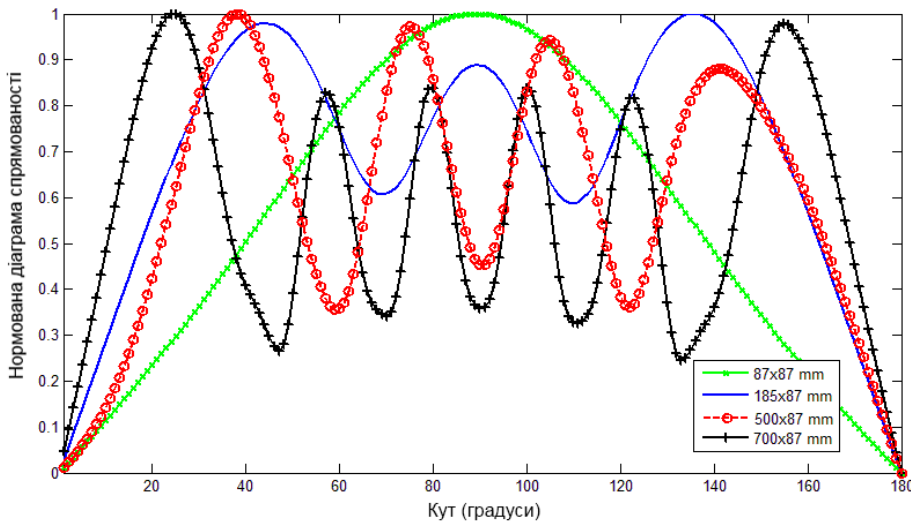


Рис. 6. Діаграма спрямованості щілинного ромбічного випромінювача при різних розмірах екрану

На рис. 6 наведено ДС ЩРВ в площині  $YOZ$  при різних розмірах екрану.

Шляхом перемноження діаграм спрямованості в  $YOZ$ -площині та  $XOZ$ -площині отримані 3D діаграми спрямованості у широкому діапазоні частот для поля, поляризація якого співпадає з віссю  $OY$  (рис. 7). Впливом електрично тонкої

діелектричної підкладки на випромінювання в зворотньому напрямку знехтувано. В смузі частот від 1.85 ГГц до 2.8 ГГц спостерігається випромінювання по нормалі до площини ЩРВ при мінімальному рівні бокового випромінювання (рис. 7). Підсилення на частоті 2.4 ГГц становить 4.88 дБ.

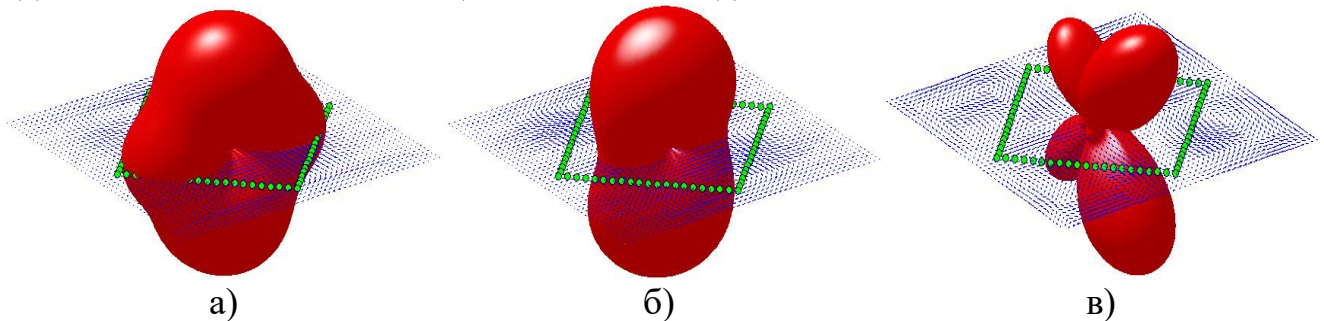


Рис. 7. Діаграма спрямованості щілинного ромбічного випромінювача: а - на частоті 1.85 ГГц,  $G=4.15$  дБ; б - на частоті 2.4 ГГц,  $G=4.88$  дБ; в - на частоті 3.4 ГГц,  $G=8.6$  дБ

Проаналізовано збіжність обчислення діаграми спрямованості ЩРВ на частоті 2.4 ГГц при кількостях електричних диполів у моделі 529, 961 та 1521. При цьому величина конвергенції діаграми спрямованості у  $YOZ$ -площині на порядок менше, ніж у  $XOZ$ -площині.

Проведено пошук шляхів покращення параметрів ЩВ. Запропоновано використання ЩВ у якості елемента АР. Це дало змогу, при забезпеченні синфазності живлення елементів АР, отримати більший коефіцієнт підсилення. Основною перевагою планарних АР є те, що вони займають малий об'єм і можуть бути розміщені на будь-яких поверхнях. З метою оцінки діаграми спрямованості АР ЩРВ та для дослідження її частотних характеристик розроблено та досліджено

макет АР з чотирьох ЩРВ та з фідерним трактом у вигляді відрізків компланарних ліній для забезпечення синфазного збудження елементів АР. Результати цих досліджень подано у четвертому розділі.

**Четвертий розділ – «Розроблення щілинного ромбічного випромінювача та дослідження розподілу поля у ньому»** - присвячено дослідженню процесів випромінювання ЩЛП, розробленню та дослідженню експериментальних взірців ЩРВ та АР з чотирьох ЩРВ.

Експериментальні дослідження характеристик ЩВ проводились за допомогою стенду у безвідлунній камері. Стенд дозволяє в автоматичному режимі за допомогою програмного забезпечення зчитувати дані і записувати їх в пам'ять комп'ютера, проводити оцінювання рівня бокових пелюстків як в лінійному, так і логарифмічному масштабах, оцінювати ширину та форму головної пелюстки, положення провалів в ДС, виміряти коефіцієнт підсилення, а також вимірювати КСХ у смузі частот, що дозволяє оцінити діапазон робочих частот випромінювачів.

Експериментально виміряно залежності КСХ на вході коаксіально-мікросмужкового переходу з підключеною втратною короткозамкненою ЩЛП на частотах 2, 2.4, 2.8 ГГц при зміні довжини ЩЛП  $L$  (рис. 8). Коаксіально-мікросмужковий перехід з'єднує фідер з хвилевим опором  $Z_{\phi}=50$  Ом та ЩЛП з хвилевим опором  $Z_{щ}=100$  Ом.

Результати експериментальних вимірювань КСХ використані для визначення значення сповільнення хвилі  $\lambda_{щ}/\lambda_0$  у ЩЛП у діапазоні частот 2..4 ГГц. Для цього вимірюється довжина хвилі у ЩЛП, яка рівна подвоєній відстані між сусідніми максимумами розподілу КСХ на рис. 8.

Статистичне оброблення вимірювань КСХ та напруженості електричного поля виконувалось у відповідності до ГОСТ 8.207-76 наступним чином. Вимірювання фізичних величин проводилось шляхом багатократних спостережень, з яких отримано середнє арифметичне, яке приймається за результат вимірювання. Всього зроблено по 15 вимірювань значення віддалі між максимумами кривої залежності КСХ на вході ЩЛП для кожної з досліджуваних частот діапазону.

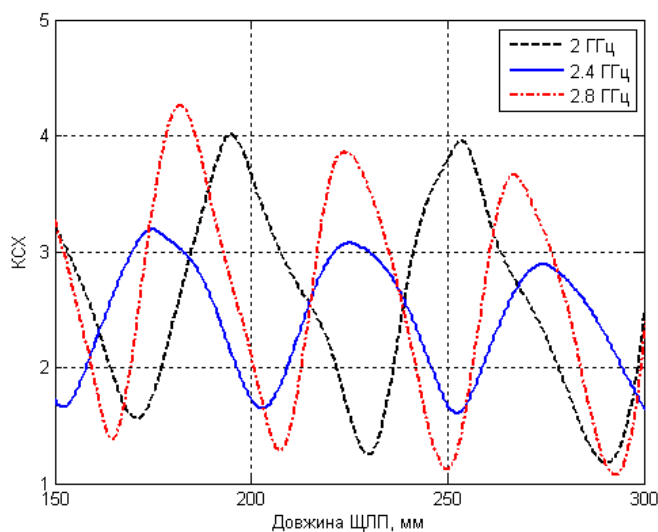


Рис. 8. КСХ на вході коаксіально-мікросмужкового переходу з підключеною втратною щілинною лінією передачі

Статистичне оброблення результатів вимірювань дало змогу вивести середньостатистичні експериментальні значення коефіцієнту сповільнення хвилі у ЩЛП в діапазоні 2..4 ГГц, який коливається в межах 0.79..0.83.

Загасання електромагнітної енергії у ЩЛП зумовлено втратами у діелектричній підкладці, омичними втратами у провідниках та випромінюванням електромагнітної енергії, оскільки ЩЛП є відкритою структурою. Електромагнітна хвиля при поширенні по ЩЛП збуджує поверхневі струми, що зумовлює

перехід частини енергії у джоулеве тепло.

Формула розрахунку коефіцієнту загасання хвилі  $\alpha$  у втратній ЩЛП:

$$\alpha = \frac{10}{L_1 - L_2} \log_{10} \frac{(КСХ_2 + 1)(КСХ_1 - 1)}{(КСХ_2 - 1)(КСХ_1 + 1)}, \quad (6)$$

де  $L_1, L_2$  – довжини ЩЛП, при яких спостерігаються максимуми розподілу КСХ;

$КСХ_1$  та  $КСХ_2$  – значення КСХ на вході ЩЛП відповідних довжин  $L_1$  та  $L_2$ , отримані шляхом перерахунку зі значень КСХ на вході коаксіально-мікросмужкового переходу, до якого підключена втратна ЩЛП (рис. 8).

Отриманий розподіл коефіцієнту загасання хвилі у ЩЛП з  $w=1.5$  мм у смузі частот 2..4 ГГц з вказанням інтервалів похибок наведено на рис. 9.

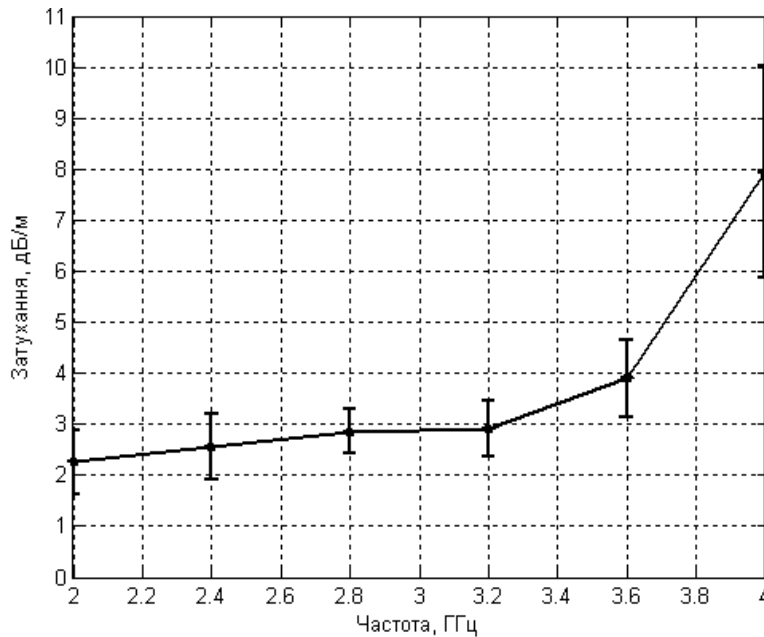


Рис. 9. Коефіцієнт загасання хвилі у щілинній лінії передачі з інтервалами похибок

Для виготовлення макету ЩРВ використаний металізований діелектрик з  $\epsilon=5.5$ , товщиною 1.5 мм. Хвильовий опір ЩЛП при даних розмірах становить  $Z_{xв}=100$  Ом. Розміри металевого екрану становлять 87x87 мм. Геометрія, режим та характеристики ЩРВ описані у 2-му розділі. ЩРВ живиться коаксіальним фідером, при цьому сумарний опір двох плечей ЩРВ в точці підключення коаксіальної лінії складає 50 Ом.

Виявлено, що розташування металевого рефлектору під кутом  $\alpha$  до нормалі призводить до зміни величини хвильового опору вздовж ЩЛП та покращує узгодження антени в смузі робочих частот. Ширина смуги робочих частот при цьому становить 29%, що перевищує значення для петлевого ЩВ, наведене в літературі.

Експериментально отримано частотну залежність КСХ ЩРВ в екрані розміром 87x87 мм та в смузі частот 2..3 ГГц (рис. 10).

Розташування металевого рефлектора під кутом до нормалі приводить до зміни величини хвильового опору вздовж щілинної лінії та покращує узгодження антени в смузі робочих частот (рис. 10). Ширина смуги частот при цьому становить 29%, що перевищує значення для петлевого ЩВ, наведені в літературі.

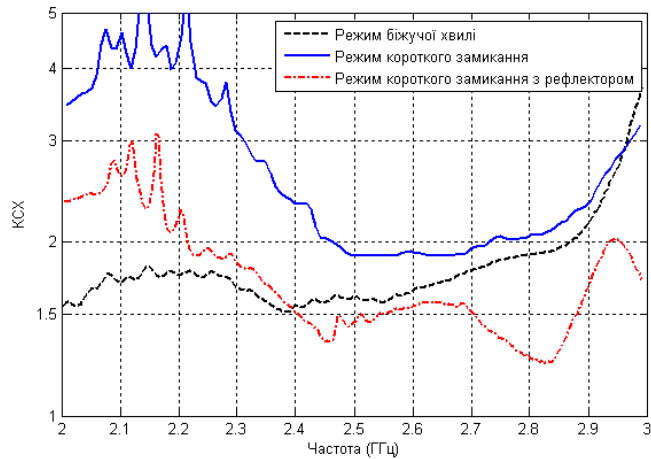


Рис. 10. Частотні залежності коефіцієнту стоячої хвилі щілинного ромбічного випромінювача

На рис. 11 представлені ДС ЩРВ у площині  $YOZ$ , отримані за допомогою математичного моделювання та експериментально на частоті 2.4 ГГц в режимі КЗ.

Відповідність між теоретичними та виміряними результатами є достатньо добра, що свідчить про те, що запропонований метод є адекватним для аналізу ЩВ.

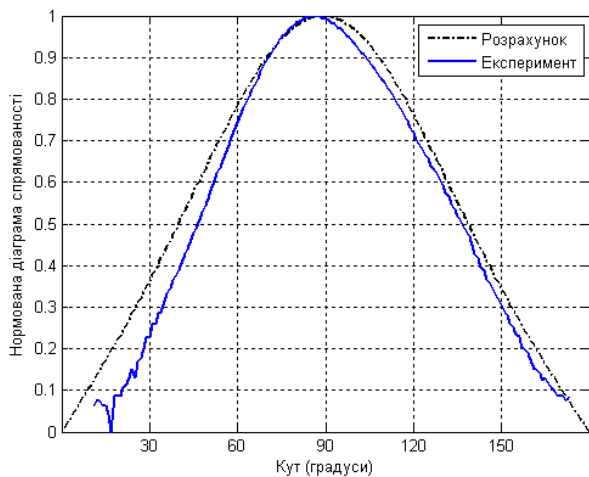


Рис. 11. Діаграма спрямованості щілинного ромбічного випромінювача

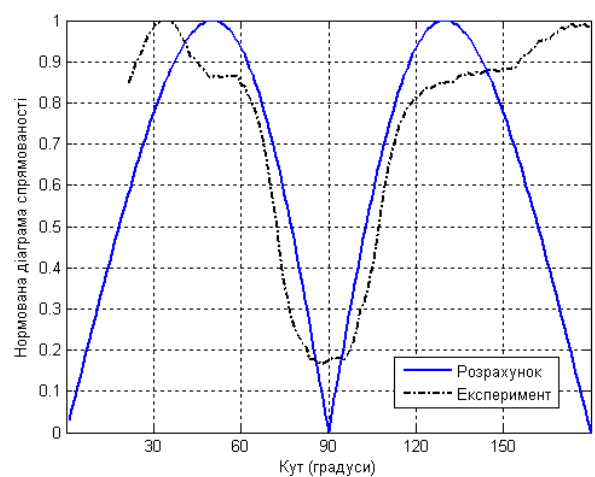


Рис. 12. Кросполяризована діаграма спрямованості щілинного ромбічного випромінювача

Ліва та права частини ЩРВ мають однакові, але взаємопротилежні горизонтальні компоненти поверхневого струму, що призводить до провалу у кросполяризованій ДС (у площині  $XOZ$ ) в напрямку  $OZ$ . В ході експерименту спостерігається зменшення кросполяризованого випромінювання в напрямку нормалі до рівня 0.18 від максимального (рис. 12).

На рис. 13 зображена плоска АР, що складається з чотирьох ЩРВ. Узгодження АР з 50-омною коаксіальною лінією здійснюється з допомогою системи компланарних ліній. Для підвищення коефіцієнту підсилення АР використовується металевий екран.



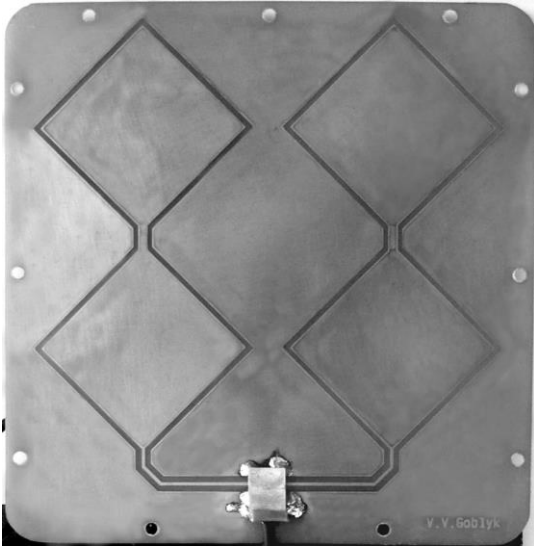


Рис. 13. Топологія друкованої антенної решітки з чотирьох щілинних ромбічних випромінювачів

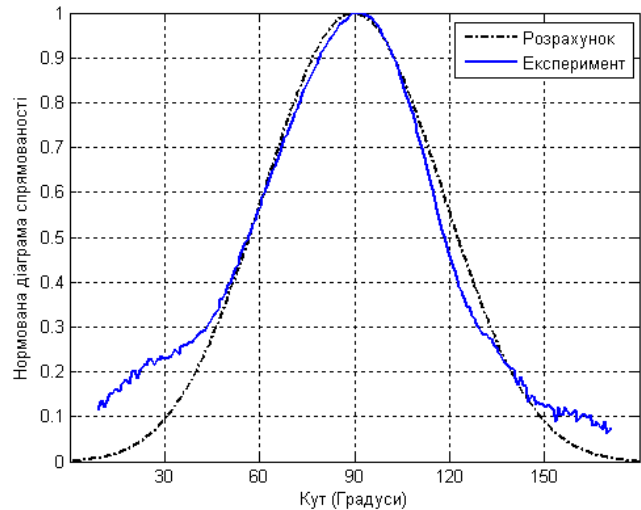


Рис. 14. Діаграма спрямованості плоскої антенної решітки з чотирьох щілинних ромбічних випромінювачів

На рис. 14 представлені результати експериментальних та теоретичних досліджень випромінюючих властивостей АР з чотирьох ЩРВ у площині  $YOZ$ . Проведено експериментальне дослідження коефіцієнту підсилення плоскої АР з чотирьох ЩРВ. Діапазон робочих частот становить 2.32..2.75 ГГц, максимальне значення коефіцієнту підсилення 12.2 Дб отримано на частотах 2.4 та 2.68 ГГц.

Таким чином, отримано випромінювач нового типу на основі ЩЛП для створення нового класу радіотехнічних пристроїв для інфокомунікаційних систем.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу, яка полягає в підвищенні ефективності метал-діелектричних випромінюючих структур на основі щілинних ліній передачі та розширенні їх функціональних можливостей за рахунок збільшення діапазону робочих частот та підвищення коефіцієнту підсилення.

Найбільш істотні наукові і практичні результати дисертаційної роботи:

1. На основі проведеного аналізу сучасних методів підвищення ефективності щілинних випромінювачів розроблено нові методи підвищення коефіцієнту підсилення та розширення смуги робочих частот щілинних випромінювачів. Технологічна простота конструкції щілинних випромінювачів забезпечує зниження вартості та масогабаритних показників обладнання і уможливорює їх ширше впровадження в різні галузі техніки, зокрема телекомунікації.

2. Розроблено електродинамічну модель, за допомогою якої виконано порівняльну оцінку впливу розмірів екрану на форму діаграми спрямованості щілинного випромінювача. Запропонована модель представляє структуру щілинного випромінювача у вигляді решітки диполів, що забезпечує її двократну перевагу по швидкості розв'язання завдання перед комп'ютерними моделями завдяки зменшенню кількості математичних операцій. Збіжність обчислення діаграми спрямованості у площині  $YOZ$  становить  $1.1 \times 10^{-3}$  та  $7.6 \times 10^{-3}$  у площині  $XOZ$ . По мірі

збільшення кількості щілинних випромінювачів у складі АР вигаш у швидкодії збільшується.

3. Виконано експериментальні дослідження та аналіз процесу поширення електромагнітної хвилі у ЩЛП. Досліджено частотні залежності загасання та сповільнення хвилі у ЩЛП. Встановлено, що на частоті 2.4 ГГц сповільнення хвилі становить 0.83. Це дає змогу зменшити площу випромінювачів для засобів телекомунікацій в 1.45 разів.

4. Створено фізичну модель ЩРВ, у якій використання металевго рефлектора під певним кутом дозволяє впливати на величину хвильового опору вздовж ЩЛП. Це дало змогу отримати більшу на 2.3% смугу робочих частот, у порівнянні з петлевими ЩВ.

5. Виконано дослідження основних параметрів щілинних випромінювачів замкненої геометричної форми, показано, що рівень кросполяризованого сигналу експериментального взірця щілинного випромінювача ромбічної форми в напрямку нормалі є на 18 дБ нижчим відносно максимального значення. Це робить можливою практичну реалізацію радіотехнічних пристроїв з покращеними характеристиками завадостійкості.

6. Вперше встановлено вплив країв металевго екрану на особливості формування діаграми спрямованості щілинного випромінювача у вигляді ромба та розкрито значні потенційні можливості розробленої математичної моделі для розроблення широкого класу щілинних антен із покращеними електродинамічними та функціональними властивостями на основі криволінійних щілинних ліній передачі для телекомунікаційних систем та енергетичних потреб, зокрема для перетворення фонового електромагнітного випромінювання в електричну енергію.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Noblyk V. Radiation field modelling of slot antenna in finite size screen / V. Noblyk, O. Liske // Computational problems of electrical engineering. – 2013. – Vol. 3, No. 1. – P. 29–34. (Наукове фахове видання; індексується Index Copernicus; ISSN 2224-0977)

2. Гоблик В.В. Поле антенної решітки ромбічних випромінювачів на основі щілинної лінії передавання / В.В. Гоблик, О.М. Ліске, І.Ю. Тепляков // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації. – 2017. – № 874. – С. 31–38. (Наукове фахове видання; індексується Index Copernicus; ISSN 0321-0499)

3. Pavlysh V. Modelling of electrodynamic properties of structures with N-multiple periodicity / V. Pavlysh, V. Noblyk, I. Nychai, O. Liske // Computational problems of electrical engineering. – 2012. – Vol. 2, № 1. – P. 89–95. (Індексується Index Copernicus; ISSN 2224-0977)

4. Гоблик В.В. Моделювання антен на базі щілинної лінії передачі / В.В. Гоблик, О.М. Ліске // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації. – 2004. – №508. – С. 181–186. (Наукове фахове видання; ISSN 0321-0499)

5. Ліске О.М. Радіохвильовий метод неруйнівного контролю з врахуванням внутрішніх механічних напружень у випромінювачі / О.М. Ліске, А.О. Мельничук, Р.М. Якимів // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету

України : Зб. наук.-техн. пр. - Львів : РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.12. – С. 138–146. (Наукове фахове видання; ISBN 5-7763-2435-1)

6. Гоблик В.В. Моделювання конформних антен на основі щілинної лінії передачі / В.В. Гоблик, Я.С. Щадило, О.М. Ліске // Наука і оборона. – 2016. – Вип. 2. – С. 64-67. (Наукове фахове видання)

7. Гоблик Н.Н. Компьютерные модели элементов инфокоммуникационных систем на основе модулированных наноразмерных структур в учебном процессе / Н.Н. Гоблик, В.В. Гоблик, А.Н. Ліске // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. ст. – 2011. – С. 399-405.

8. Патент № 73700 UA, МПК(2006.01), G01N 22/02. Двочастотний радіохвильовий дефектоскоп / Мельничук А.О., Ліске О.М., Якимів Р.М. Заявник Національний університет "Львівська політехніка". – № u201201252; заявл. 07.02.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19.

9. Патент № 104959 UA, МПК(2014.01), H01Q 11/00. Щілинна антена / Гоблик В.В., Ліске О.М. Заявник Національний університет "Львівська політехніка". – № a201300020; заявл. 02.01.2013; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.

10. Goblyk V.V. The modeling of plane curvilinear dipole antenna arrays / V.V. Goblyk, O.M. Liske, E.I. Yakovenko // Antenna Theory and Techniques: 5th International Conference, May 24–27, 2005: proceed. of the conf. - Kyiv, Ukraine, 2005. – P. 232–233. (Scopus)

11. Liske Oleksiy. Research of design methods of antennas based on curvilinear transmission slotline / Oleksiy Liske // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: 5th International Conference TCSET'2006, Feb. 28 – March 4, 2006: proceed. of the conf. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2006. – P. 557–558. (Scopus)

12. Ліске О.М. Дослідження особливостей формування електромагнітного поля щілинними випромінювачами / О.М. Ліске // Одинадцята відкрита науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету "Львівська Політехніка" з проблем електроніки, 1–4 квітня 2008: матер. конф. – Львів, Україна, 2008. – С. 31.

13. Гоблик В.В. Науково-прикладні проблеми фізико-математичного моделювання випромінювачів на базі щілинної лінії передачі та шляхи їх розв'язку / В.В. Гоблик, О.М. Ліске // Дванадцята відкрита науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету "Львівська Політехніка" з проблем електроніки, 7–9 квітня 2009: матер. конф. – Львів, Україна, 2009. – С. 15.

14. Ничай Ірина. Вплив періоду модуляції діелектричної пластини на поле нитки струму / Ірина Ничай, Олексій Ліске // Комп'ютерні науки та інженерія: Третя міжнародна наукова конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, 14–16 травня 2009: матер. конф. – Львів, Україна, 2009. – С. 251–252.

15. Noblyk V.V. Plasmon antenna with complex profile of dielectric permittivity change / V.V. Noblyk, I.V. Nychai, O.M. Liske // Antenna Theory and Techniques: 7th International Conference, October 6-9, 2009: proceed. of the conf. - Lviv, Ukraine, 2009. – P. 138–140.

16. Melnychuk A.O. Object detection by precision radiowave defectoscope on the basis of slot radiator with use of artificial neural network / A.O. Melnychuk, R.M. Yakymiv, O.M. Liske // *Antenna Theory and Techniques: 8th International Conference, September 20–23, 2011: proceed. of the conf.* – Kyiv, Ukraine, 2011. – P. 324–326. (Scopus)
17. Goblyk V.V. Analysis of radiation patterns of collimator based on modulated metal-dielectric spiral structure / V.V. Goblyk, I.B. Subota, O.M. Liske // *Antenna Theory and Techniques: 8th International Conference, September 20–23, 2011: proceed. of the conf.* – Kyiv, Ukraine, 2011. – P. 281. (Scopus)
18. Liske O.M. Comparison of computational electromagnetic tools for design and simulation of slot rhombic antenna / O.M. Liske // *CAD Systems in Microelectronics: 11th International Conference The Experience of Designing and Application, Feb. 23–25, 2011: proceed. of the conf.* – Polyana–Svalyava, Ukraine, 2011. – P. 114–115. (Scopus)
19. Гоблик В.В. Радіохвильовий дефектоскоп на базі двополяризаційного щілинного випромінювача / В.В. Гоблик, О.М. Ліске // Чотирнадцята відкрита науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету “Львівська Політехніка” з проблем електроніки, 5–8 квітня 2011: матер. конф. – Львів, Україна, 2011. – С. 19.
20. Liske O.M. Radiowave Methods of Non-Destructive Testing / O.M. Liske, R.M. Yakymiv, A.O. Melnychuk // *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: 11th International Conference, February 21–24, 2012: proceed. of the conf.* – Lviv-Slavske, Ukraine, 2012. – P. 184.
21. Жуков Г.В. Розробка антенної решітки для систем безпроводного зв'язку / Г.В. Жуков, О.М. Ліске // П'ятнадцята відкрита науково-технічна конференція Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки з проблем електроніки та інфокомунікаційних систем, 3–5 квітня 2012: матер. конф. – Львів, Україна, 2012. – С. 65.
22. Hoblyk V. Mathematical model of slot rhombic antenna / V. Hoblyk, O. Liske // *Antenna Theory and Techniques: IXth International Conference, September 16–20, 2013: proceed. of the conf.* - Odessa, Ukraine, 2013. – P. 355–357. (Scopus)
23. Гоблик В.В. Розрахунок електромагнітного поля короткозамкненої щілинної лінії / В.В. Гоблик, О.М. Ліске // Шістнадцята щорічна відкрита науково-технічна конференція Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки з проблем електроніки та інфокомунікаційних систем, 2–4 квітня 2013: матер. конф. – Львів, Україна, 2013. – С. 26.
24. Hoblyk V. Experimental investigation of slot rhombic antenna radiating properties / V. Hoblyk, O. Liske // *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics: 12th International Conference, February 19–23, 2013: proceed. of the conf.* – Lviv- Polyana, Ukraine, 2013. – P. 143–144. (Scopus)
25. Гоблик В.В. Моделювання антени Вівальді на основі щілинної лінії передачі / В.В. Гоблик, О.М. Ліске, Я.С. Щадило // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ: Міжнародна науково-технічна конференція, 18–20 травня 2016: збірник тез доповідей – Львів, Україна, 2016. – С. 175.

26. Goblyk N. Modelling radiative properties of metallodielectric structures / N. Goblyk, V. Hoblyk, V. Pavlysh, I. Nychai, O. Liske, M. Zelenku, I. Teplyakov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: 13th International Conference, Febr. 23 – 26 2016: proceed. of the conf. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2016. – P. 105-107. (Scopus)

27. Гоблик В.В. Особливості збудження металодіелектричних структур щілинними лініями передачі / В.В. Гоблик, Я.С. Щадило, О.М. Ліске // Застосування сухопутних військ Збройних сил України у конфліктах сучасності: Науково-практична конференція, 17 листопада 2016: збірник тез доповідей – Львів, Україна, 2016. – С. 30–31.

28. Гоблик В.В. Моделювання в Матлаб конформних антенних решіток на основі компланарних хвилеводів / В.В. Гоблик, В.А. Павлиш, Я.С. Щадило, О.М. Ліске // Тринадцята наукова конференція ХНУ Повітряних сил ім. І. Кожедуба, 12–13 квітня 2017: збірник тез доповідей – Харків, Україна, 2017. – С. 258.

29. Гоблик В.В. Моделювання антен теплового випромінювання на основі компланарного хвилеводу / В.В. Гоблик, В.А. Павлиш, Я.С. Щадило, О.М. Ліске // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ: Міжнародна науково-технічна конференція, 11–12 травня 2017: збірник тез доповідей – Львів, Україна, 2017. – С. 186-187.

30. Hoblyk V.V. Achievements in Antennas Research at Lviv Polytechnic National University / V.V. Hoblyk, V.A. Pavlysh, N.M. Hoblyk, Ye.I. Yakovenko, O.M. Liske, I.V. Nychai, D.V. Nevinskyi, D.A. Nikolayev, I.Yu. Teplakov // Antenna Theory and Techniques: 11th International Conference, May 24–27, 2017: proceed. of the conf. – Kyiv, Ukraine, 2017. – P. 58–63. (Scopus)

## АНОТАЦІЯ

**Ліске О.М. Підвищення ефективності випромінюючих компонентів інфокомунікаційних систем на основі щілинних ліній передачі.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розробленню методів та моделей підвищення ефективності випромінюючих компонентів на основі щілинних ліній передачі для пристроїв інфокомунікаційних систем. В роботі досліджено принципи побудови випромінюючих компонентів на основі щілинних ліній передачі. Отримано форму та ефективні геометричні розміри випромінювача, що збуджується полем біжучої хвилі у щілинній лінії передачі, для забезпечення поперечного випромінювання. Розроблено математичну модель процесу випромінювання щілини в екрані скінчених розмірів із застосуванням методу наведених електрорушійних сил для знаходження взаємних опорів диполів двох ортогональних решіток в присутності діелектрика. Запропоновано метод визначення параметрів щілинної лінії передачі, який дозволяє отримати більш точні значення коефіцієнту сповільнення та коефіцієнту згасання хвилі у щілинній лінії передачі. Розроблено та виготовлено макет антенної решітки щілинних ромбічних випромінювачів із синфазним живленням окремих елементів, що дало змогу підвищити ефективність пристроїв

даного класу з поліпшеними масогабаритними показниками. Отримано рівень кросполяризованого сигналу щілинного ромбічного випромінювача в напрямку нормалі на 18 дБ нижчим відносно максимального значення.

**Ключові слова:** щілинна лінія передачі, щілинний випромінювач, інфокомунікаційна система, математичне моделювання, метод наведених електрорушійних сил.

## АННОТАЦІЯ

**Ліске О.М. Повышение эффективности излучающих компонентов инфокоммуникационных систем на основе щелевых линий передачи. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. – Национальный университет «Львівська політехніка», Львов, 2018.

Диссертационная работа посвящена разработке методов и моделей повышения эффективности излучающих компонентов на основе щелевых линий передачи для устройств инфокоммуникационных систем. В работе исследованы принципы построения излучающих компонентов на основе щелевых линий передачи.

Получена форма и эффективные геометрические размеры излучателя, возбуждаемого полем бегущей волны в щелевой линии передачи, для обеспечения поперечного излучения.

Разработана математическая модель процесса излучения щели в экране конечных размеров с применением метода наведенных электродвижущих сил для нахождения взаимных сопротивлений диполей двух ортогональных решеток в присутствии диэлектрика, с помощью которой выполнена сравнительная оценка влияния размеров экрана на форму диаграммы направленности. Предложенная модель представляет структуру щелевого излучателя в виде плоской антенной решетки, что обеспечивает эффективность благодаря уменьшению количества математических операций при высокой точности. Сходимость вычисления диаграммы направленности составляет  $1.1 \times 10^{-3}$ .

Предложен метод определения параметров щелевой линии передачи, который позволяет получить более точные значения коэффициента замедления и коэффициента затухания волны в щелевой линии передачи.

Создан макет щелевого ромбического излучателя, в котором использование металлического рефлектора под углом позволяет влиять на величину волнового сопротивления вдоль щелевой линии передачи. Это позволило получить большую полосу рабочих частот на 2.3%, по сравнению с петлевыми щелевыми излучателями. Разработан и изготовлен макет антенной решетки щелевых ромбических излучателей с синфазным питанием отдельных элементов, что позволило повысить эффективность устройств данного класса с улучшенными массогабаритными показателями. Получен уровень кросполяризованого сигнала щелевого излучателя ромбической формы в направлении нормали на 18 дБ ниже максимального значения.

**Ключевые слова:** щелевая линия передачи, щелевой излучатель, инфокоммуникационная система, математическое моделирование, метод наведенных электродвижущих сил.

### ABSTRACT

**Liske O.M. Improving of the efficiency of the emitting components on the basis of slot transmission lines in the information and communication systems.** – On the rights of manuscript.

A thesis submitted in fulfillment of Ph.D. (candidate) degree in technical sciences on speciality 05.12.13 – Radio Engineering Devices and Telecommunication Means. – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to the development of methods and models for increasing the efficiency of emitting components on the basis of slot transmission lines for using in the information and communication systems. In this research work the principles of construction of radiating components on the basis of slot transmission lines are investigated and developed. The shape and effective geometrical dimensions of the emitter excited by the traveling wave field in the slot transmission line are obtained, to provide transverse radiation. The mathematical model of the slot radiating process in the finite size screen was contributed using the method of induced electromotive forces for finding the mutual impedances of the dipoles of two orthogonal arrays in the presence of a dielectric. The method of determining the parameters of the slot transmission line, which allows to obtain more accurate values of the slow factor and wave attenuation coefficient in the slot transmission line, is proposed. The layout of the antenna array of rhombic slot emitters with in-phase power supply of separate elements have been developed and made. It made it possible to increase the efficiency of devices of this class with improved mass-dimensional indices. Obtained the level of the crosspolarized signal of the slot emitters of the rhombic form in the direction of the normal up to 18 dB lower of the maximum value.

**Key words:** slot transmission line, slot radiator, infocommunication system, mathematical modeling, method of induced electromotive forces

### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АР	Антенна решітка
АС	Антенна система
ДС	Діаграма спрямованості
ЕРС	Електро-рушійна сила
КЗ	Коротке замикання
КСХ	Коефіцієнт стоячої хвилі
НВЧ	Надвисокі частоти
СЛАР	Система лінійних алгебраїчних рівнянь
ФАР	Фазована антенна решітка
ЩВ	Щілинний випромінювач
ЩЛП	Щілинна лінія передачі
ЩРВ	Щілинний ромбічний випромінювач