

ЗАХИСТ ВХІДНИХ КІЛ ПРИЙМАЧІВ РАДІОРЕЛЕЙНИХ СТАНЦІЙ МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ ВІД ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД

В роботі розглянуто принципи моделювання та побудову широкосмугового пасивного захисного пристрою мікрохвильового діапазону. Пристрій створено на базі самокерованого обмежувача потужності. Внесені втрати в режимі низького рівня вхідної потужності не перевищують 1-2 дБ в робочому діапазоні частот. В режимі високого рівня вхідної потужності внесені втрати складають не менше 30 дБ.

Ключові слова: захисний пристрій, самокерований обмежувач, внесені втрати, мікрохвильовий діапазон.

Вступ. На сучасному етапі розвитку радіоелектронних засобів має місце все більш інтенсивне освоєння НВЧ - діапазону електромагнітних коливань. Створюються нові типи радіорелейних систем передачі та радіолокаційних станцій, удосконалюються супутникові інформаційні системи.

Внаслідок цього, у зв'язку з бурхливим освоєнням дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазону довжин хвиль цивільними і військовими службами, в наведених вище діапазонах частот склалася досить складна електромагнітна обстановка. Це пов'язано з застосуванням потужних (до 1-10 МВт) стаціонарних імпульсних передавальних станцій, що використовуються у військових РЛС дальнього виявлення, аеродромних РЛС цивільної і військової авіації, а також передавальних станцій малої і середньої потужності (до 100 кВт), що використовуються у РЛС мобільних об'єктів (на військових і цивільних літаках, вертольотах, морських судах, пересувних військових РЛС ближнього виявлення).

Все це підвищує ймовірність випадкового надходження на вхідні кола приймачів радіорелейних станцій імпульсної завади досить великої потужності та вимагає створення пристроїв захисту вхідних кіл від руйнівної дії таких імпульсів. Важливою вимогою до пристрою захисту є його пасивний характер, тобто відсутність необхідності підключення до джерела живлення.

Таким чином, з урахуванням практично непередбаченої можливості опромінення НВЧ-приймача імпульсом високої потужності, виникає задача побудови ефективного швидкодіючого і широкосмугового захисного пристрою (ЗП), у функції якого входить обмеження потужності НВЧ, що падає на чутливі елементи. Захисний пристрій повинний знаходитися в постійній готовності, не перешкоджати проходженню слабких сигналів, виконувати свої функції при відключенні живлення приймача, тому що напівпровідникові НВЧ елементи вхідних кіл чутливі до НВЧ-потужності навіть у "холодному" стані.

Такий захисний пристрій може застосовуватися як для захисту приймачів станцій радіорелейного зв'язку, так і як розв'язуючий пристрій у РЛС, де приймач і передавач працюють на загальну антену, і т. д.

Основна частина. Визначальним параметром при виборі схеми побудови захисного пристрою є робочий діапазон частот, який у нашому випадку перекриває весь робочий діапазон прямокутного хвилеводу перерізом 7,2x3,4 мм і складає 25.86 - 37.5 ГГц. В теперішній час відбувається інтенсивне освоєння цього та суміжних діапазонів. Враховуючи той факт, що в системах радіолокації, зв'язку та навігації вхід радіоприймального пристрою знаходиться під впливом детермінованих та випадкових завад, необхідно передбачити заходи щодо захисту його вхідних кіл, разом з вхідними підсилювачами [1], від дії завад. Імпульсна завада значної потужності може пошкодити вхідні кола приймальних пристроїв РРЛ та РЛС, зокрема, призвести до пробою або підвищити рівень шуму змішувальних діодів. Одним із цих заходів і є застосування захисних пристроїв. У такій широкій смузі частот в ЗП вже не можуть використовуватися інтегральні ґратки й інші пристрої, що використовують трансформатори імпедансів на основі відрізків лінії передачі, оскільки ці елементи забезпечують прийнятні характеристики в порівняно вузькій смузі частот (порядку 5 - 10 %).

Очевидно, що необхідна ширина робочої смуги ЗП може бути забезпечена за його

реалізації на основі регулярної лінії передачі без використання узгоджувальних резонансних елементів.

Можливі варіанти схем побудови ЗП на основі регулярної лінії передачі показані на рис.1 а,б,в.

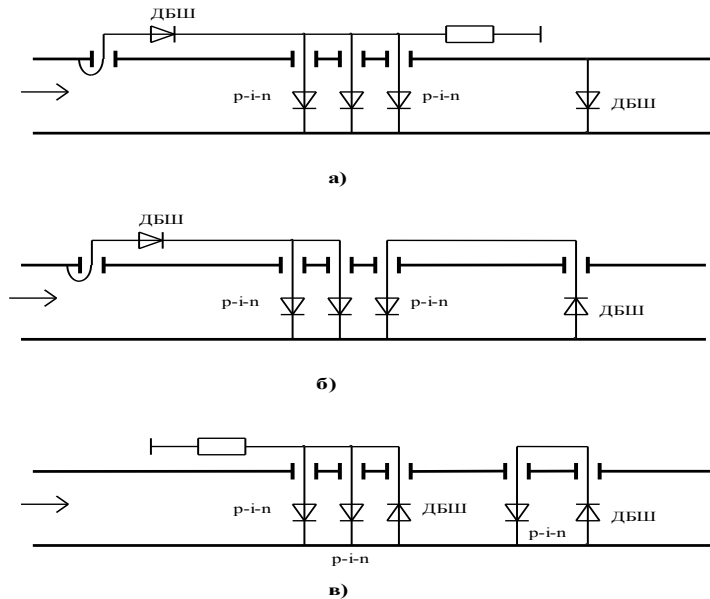


Рис.1. Варіанти побудови ЗП на основі регулярної лінії передачі

Усі приведені схеми використовують принцип самокерованих обмежувачів НВЧ потужності, коли енергія продетектованого НВЧ сигналу використовується для живлення керуючих р-і-п-діодів. В цьому випадку ЗП завжди знаходиться у стані робочого режиму, навіть якщо апаратура відключена від джерела живлення [2].

Втрати (загасання сигналу) в цих схемах у режимі слабкого сигналу визначаються як втратами в активних елементах, так і відбиттям сигналу від входу ЗП за рахунок неузгодженості лінії передачі в місцях розташування діодів, що має місце навіть за відсутності втрат у діодах. Якщо в узгоджену довгу лінію з хвильовим опором ρ у деякому перерізі включено ємність C , коефіцієнт відбиття від цього перерізу визначається виразом:

$$r = \frac{1}{-1 + i \cdot \frac{2}{\omega \rho C}}, \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi f$ - кругова частота, i - уявна одиниця.

З (1) можна обчислити величину коефіцієнта передачі лінії між виходом та входом:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \cdot \omega^2 \cdot \rho^2 \cdot C^2}, \quad (2)$$

і, відповідно, втрати в лінії:

$$L = 10 \lg \left(1 + \frac{1}{4} \cdot \omega^2 \cdot \rho^2 \cdot C^2 \right). \quad (3)$$

На рис.2 наведено залежність втрат (за рахунок відбиття) на ділянці лінії з ємністю C та хвильовим опором ρ в залежності від величини C (ρ виражено в омах, C - у пікофарадах).

З рисунка випливає, що для забезпечення втрат порядку 1 дБ необхідно виконання умови $\rho C \leq 5 \text{ Ом} \cdot \text{пФ}$.

Ємності р-і-п-діодів, що використовуються у міліметровому діапазоні, мають зазвичай величину 0.05 - 0.1 пФ і не можуть бути зменшені як за технологічних причин, так і з огляду на тепловий режим, що визначає граничну величину НВЧ потужності, яка комутується. Звідси випливає, що для створення ЗП з малим загасанням у режимі слабкого сигналу необхідно використовувати лінію з хвильовим опором не вищим від 50 - 100 Ом.

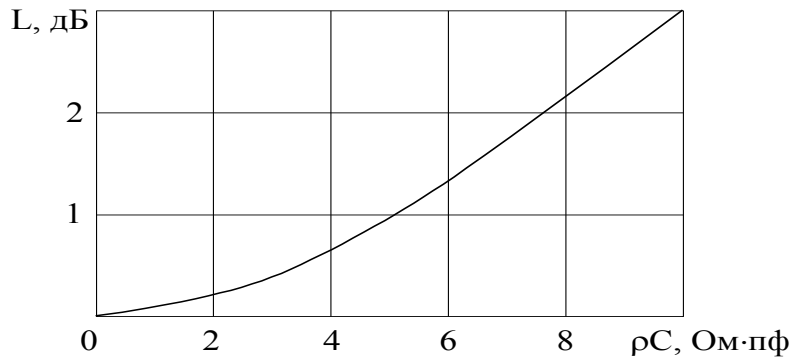


Рис.2. Залежність втрат за рахунок відбиття на ділянці регулярної лінії з хвильовим опором ρ від ємності C , включеної в лінію (ρ виражене в омах, C - у пікофарадах)

Очевидно, що звичайний прямокутний хвилевід мало підходить для цієї мети, оскільки його хвильовий опір має більш високе значення. Крім того, поле електромагнітної хвилі в ньому розподілене практично по всьому перерізу, в той час як активні елементи (АЕ), що розміщені в прямокутному хвилеводі, можна розглядати, як точкові елементи із зосередженими параметрами. Рівень взаємодії АЕ з електромагнітною хвилею в цьому випадку достатньо низький. Можливе використання хвилеводно-щілинних ліній (ХЩЛ), однак, при цьому виникають труднощі з тепловідводом від активних елементів, тому що в самій ХЩЛ тепловідвід від АЕ практично відсутній, а уведення спеціальних теплопровідних штифтів чи пластин призводить до виникнення додаткових втрат у лінії, оскільки ці елементи (штифти, пластини) є електродинамічними неоднорідностями, і спричиняють додаткове відбиття сигналу.

У зв'язку з викладеним, найбільш прийнятними для реалізації ЗП, з точки зору забезпечення достатнього тепловідводу, можна вважати наступні типи ліній:

1. Н-хвилевід, де можна монтувати АЕ на гребені хвилеводу, що забезпечить потрібний тепловідвід, або вводити спеціальні теплопровідні штифти до складу гребеня хвилеводу, не створюючи при цьому електродинамічних неоднорідностей у тракті.

2. Мікросмужкова лінія МСЛ. Якщо в діелектричній пластинці виконати отвори в місцях розміщення АЕ, діоди можна монтувати прямо на металеву пластину, яка буде виконувати функції тепловідводу.

Однак, МСЛ мають порівняно високі втрати, а виконання отворів в діелектричній пластинці є порівняно складною технологічною операцією. Таким чином, всю сукупність вимог до прямої системи забезпечує Н-хвилевід.

Для оцінки основних параметрів ЗП і розрахунку характеристик його елементів необхідно в першу чергу визначити характеристики регулярної хвилеводної структури та її геометричні розміри. На рис.3 приведена конструкція Н-подібного хвилеводу. Хвилевід утворений двома симетрично розташованими гребенями шириною $2t$, відстань між ними $2l$. Ці гребні розташовані у прямокутному хвилеводі, ширина якого 7.2 мм, висота 3.4 мм.

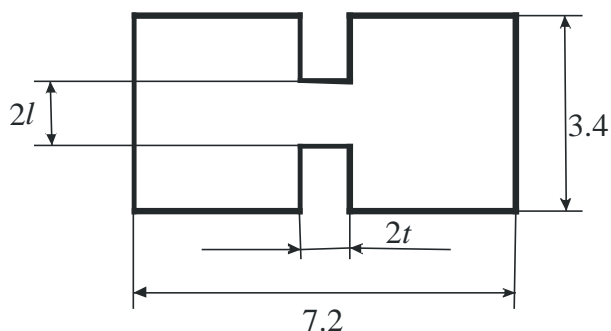


Рис.3. Конструкція Н-хвилеводу

Моделювання параметрів Н-хвилеводу з точки зору узгодження вимог до нього з вибором оптимальних значень параметрів t та l було проведене в [3] та результати моделювання використані в цій роботі.

Наступною проблемою при розробці самокерованого обмежувача потужності є проблема забезпечення його параметрів у широкій смузі частот. З метою вирішення цього питання в роботі було проведене моделювання та оптимізація захисного пристрою у відповідному частотному діапазоні. Зокрема було визначено оптимальну відстань між активними елементами пристрою. В результаті вирішення цієї проблеми запропоновано та оптимізовано конструкцію захисного пристрою 8- мм діапазону довжин хвиль на основі самокерованого обмежувача потужності з відносним робочим діапазоном частот до 40%, яка представлена на рис. 4.

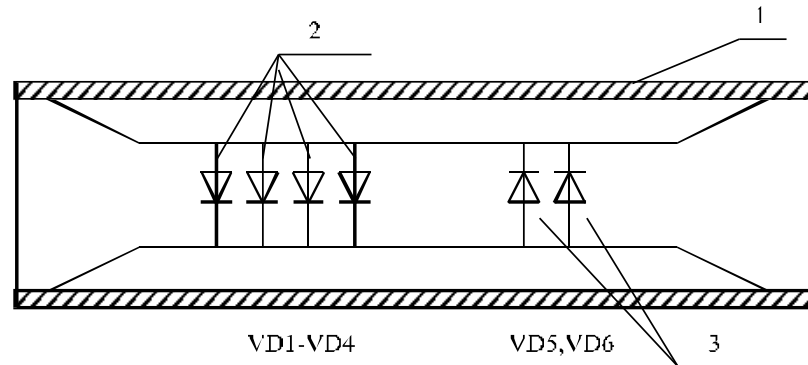


Рис. 4. Захисний пристрій на Н-хвилеводі
 1 - Н- хвилевід;
 2 - керуючий вузол на р-і-п-діодах;
 3 - вузол детекторних діодів (ДБШ).

Широкосмуговість конструкції досягається за рахунок використання в якості прямої системи Н-хвилеводу, що плавно переходить у прямокутний хвилевід, а також за рахунок способу включення діодів з бар'єром Шоттки (ДБШ) і р-і-п діодів у Н-хвилевод. При цьому ДБШ (VD5,VD6) розташовані за р-і-п діодами (VD1-VD4) у напрямку від входу ЗП між гребенями Н-хвилеводу. Р-і-п діоди також розміщені між гребенями, утворюючи керований НВЧ-аттенюатор. Відстань між діодами підбиралась експериментально після оптимізації розмірів Н-хвилеводу. Критерієм вибору відстані між ними була мінімізація нерівномірності ослаблення в режимі запирання. Режим запирання на першому етапі імітувався смужками із золота (розмір поперечного перерізу – 100мкм x 30 мкм), які закорочували гребені хвилеводу. Як показали результати експериментальних досліджень, оптимальна відстань складає 0,8 мм, що узгоджується з результатами теоретичних розрахунків для режиму малого сигналу. Збільшення відстані призводить до росту нерівномірності, яка при значенні 2,5 мм досягає 30 дБ в робочій смузі частот для 6-7 смужок. При реалізації схемотехнічної побудови необхідно враховувати той факт, що збільшення кількості діодів, з одного боку, викликає ріст загасання в режимі сильного сигналу, з іншого, – збільшує загасання в режимі слабкого сигналу, і це є небажаним наслідком. Першими, починаючи від входу ЗП, розташовані чотири р-і-п діоди, причому діоди з більшою товщиною бази розташовуються ближче до входу. За р-і-п діодами розміщені два ДБШ. Електрична схема з'єднання діодів забезпечує протікання струму через р-і-п-діоди при детектуванні ДБШ НВЧ-сигналу. При збільшенні вхідної потужності до значення, яке перевищує деякий граничний рівень $P_{пор}$, ДБШ детектують сигнал і створюють у ланцюзі р-і-п діодів керуючий струм, що переводить р-і-п діодний аттенюатор у стан підвищеного загасання. Таким чином, відбувається обмеження потужності вхідного імпульсного сигналу до рівня, що не перевищує заданий допустимий рівень. При цьому, на початку обмеженого імпульсу на виході ЗП спостерігається викид, зумовлений кінцевою швидкодією пристрою. Для стикування Н-хвилеводу з прямокутним хвилеводом в

конструкції ЗП були виконані плавні переходи. Розрахункове значення КСХН для цих переходів у всьому діапазоні частот не перевищувало 1,07.

В якості матеріалу діелектричної підкладки, на якій були сформовані провідники електричної схеми з'єднання діодів, використовувався поліімід [4]. Цей діелектрик має ряд переваг, порівняно з іншими матеріалами. Зокрема, це мала товщина та гнучкість поліімідної плівки, які дозволяють зменшити втрати НВЧ-сигналу за рахунок витікання через щілину, в якій розташована плівка, та запобігти її руйнуванню під дією механічних навантажень. Перевагою є також досить висока допустима робоча температура ($t^0 = 220^{\circ}\text{C}$), що дозволяє підвищити стійкість ЗП до впливу навколишнього середовища. Для поліімідних плівок існує добре розроблена технологія металізації та формування смужкових провідників. Діелектрична проникність полііміду складає: $\epsilon = 3,5$; питомий опір $\rho = 10^{15} - 10^{16}$ Ом·м. У якості р-і-п діодів у досліджуваному ЗП застосовувалися кремнієві діоди з товщиною бази від 6-7 мкм до 10-12 мкм, у якості ДБШ – арсенід-галієві діоди з балковими виводами, сформовані на плівковій основі. Випробування ЗП проводилися з використанням імпульсного НВЧ генератора. Тривалість вхідного імпульсного сигналу складала 100 нс при шпаруватості 100 - 1000. Рівень імпульсної вхідної потужності міг регулюватися і досягав 10Вт. Результуючі втрати в режимі пропускання (при низькому рівні вхідного сигналу) не перевищували 1-2дБ у робочому діапазоні частот 25,87-37,5 ГГц. При подачі на вхід ЗП імпульсного сигналу потужністю до 10Вт імпульсна потужність на виході ЗП не перевищувала 10 мВт. Швидкодія ЗП, що оцінювалась за тривалістю імпульсного викиду вихідного сигналу, складала 7-8 нс.

Висновки

В результаті теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та оптимізовано конструкцію самокерованого обмежувача потужності, що, на відміну від існуючих, працює в широкому діапазоні частот (порядку 40%) та забезпечує порівняно низький рівень втрат в режимі малого сигналу та високий рівень загасання в режимі потужного вхідного сигналу.

Результати цієї роботи дозволять підвищити надійність вхідних кіл НВЧ- приймачів РРЛ станцій мм-діапазону, що працюють в умовах складної електромагнітної обстановки, а саме – за наявності впливу потужних зовнішніх імпульсних сигналів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аболдуев И.М., Вальд-Перлов В.М., Миннебаев В.М. Проектирование маломощных усилителей с защитой от высокого уровня входной мощности // Труды 9-й Международной крымской микроволновой конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо 1999. - 13-16 сентября, Севастополь: СГТУ (Украина) .- 1999.- С. 59-62.
2. Вайсблат А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах.-М.: Радио и связь, 1987.-120 с.: ил.
3. Каток В.Б., Манько А.А. Оптимізація направляючої системи самокерованого обмежувача потужності міліметрового діапазону довжин хвиль // Праці УНДІРТ. - 2003. - №2(34)-3(35). - С. 100-101.
4. Справочник по электротехническим материалам. под ред. Ю.В. Коршунова и др.: В 2 т., 3-е изд. Переработанное.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- Т.1.- 386 с.

Надійшла: 22.11.2013р.

Рецензент: д.т.н., професор Дивізіюк М.М.