СЕКЦІЯ «ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКА ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКА»

УДК 621.372.8
Пшеничний П.В.[1], Коротун А.В.[2,3]
[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2] проф. НУ «Запорізька політехніка»
[3] с.н.с. Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України

ОГЛЯД ПОГЛИНАЮЧИХ ХВИЛЕВІДНИХ ФІЛЬТРІВ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ З ЧАСТКОВИМ ДІЕЛЕКТРИЧНИМ ЗАПОВНЕННЯМ

Сучасні системи радіолокації та зв'язку високої потужності стикаються з проблемою електромагнітної сумісності та захисту вихідних каскадів передавачів від відбитих хвиль. Традиційні рефлекторні фільтри відбивають енергію гармонік назад до джерела, що може спричинити пробої та нестабільність роботи генераторів. Поглинаючі (абсорбційні) фільтри з частковим діелектричним заповненням дозволяють не лише компактно реалізувати селекцію частот, а й забезпечити стабільний коефіцієнт стоячої хвилі (КСВ) у широкій смузі загородження, перетворюючи небажану енергію в тепло.

Метою дослідження є систематизація та аналіз існуючих конструкцій поглинаючих хвилевідних фільтрів, оцінка впливу геометричних параметрів та характеристик діелектричних поглиначів на ефективність придушення вищих мод, а також визначення оптимальних сфер їх застосування.

В рамках проведеного огляду авторами розглянуті наступні питання:

1. Фізичні механізми поглинання: аналіз розподілу електромагнітного поля у хвилеводі, частково заповненого діелектриком з втратами. В основі роботи таких фільтрів лежить явище дисипації електромагнітної енергії при взаємодії з речовиною.

2. Топології заповнення: порівняння центрального, пристінного та ступінчастого розміщення поглинаючих вставок. Геометрія розміщення діелектрика визначає селективні властивості фільтра:

– центральне розміщення (*E*-площина): пластина встановлюється в максимумі вектора *E*. Це забезпечує найвищий коефіцієнт згасання на одиницю довжини. Проте така топологія має найгірший відвід тепла;

– периметральне (пристінне) заповнення: шар поглинача наноситься на вузькі стінки хвилеводу. Це ідеально для фільтрації вищих мод, оскільки основна мода H_{10} має нульову напруженість поля біля стінок і проходить майже без втрат, тоді як вищі гармоніки інтенсивно поглинаються;

– дискретні поглинаючі елементи: використання окремих циліндрів або блоків, що дозволяє створювати резонансні «пастки» для конкретних частот загородження.

3. Узгодження структур: будь-яка вставка у хвилеводі створює стрибок хвильового опору, що призводить до відбиття сигналу (збільшення КСВ). Для мінімізації цього ефекту використовують:

– геометричні трансформатори: поглинач виготовляється у формі клину (одинарного або подвійного). Чим довша похила частина (зазвичай > 2λ), тим краще узгодження у широкій смузі частот;

– ступінчасті переходи: довжина кожної сходинки діелектрика становить чверть довжини хвилі (λ/4). Відбиття від кожної наступної сходинки компенсує відбиття від попередньої;

– градієнтне заповнення: використання матеріалів, діелектрична проникність яких плавно зростає вздовж осі поширення хвилі (від 1.0 до потрібного значення).

4. Матеріалознавчий аспект**:** огляд характеристик НВЧ-поглиначів на основі карбіду кремнію (SiC), феритів, керамічних композитів та сучасних метаматеріалів.

Порівняння досліджених типів фільтрів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика типів фільтрів

Критерій порівняння	**Фільтри з центральною вставкою**	**Фільтри з пристінними шарами**	**Структури з витікаючою хвилею**
Ефективність поглинання	Дуже висока (макс. поле *E*)	Середня (для основної моди)	Висока для вищих гармонік
Пропускна потужність	Низька (ризик перегріву центру)	Висока (відвід тепла через стінки)	Найвища (зовнішній поглинач)
Рівень КСВ	Залежить від якості клину	Стабільно низький	Мінімальний у широкій смузі
Складність виготовлення	Низька (проста вставка)	Середня	Висока (потребує перфорації)
Габарити	Мінімальні	Середні	Значні (зовнішні камери)

За результати проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

– поглинаючі фільтри з частковим заповненням є важливими для хвилевідних систем, де неможливе використання ізоляторів або циркуляторів високої потужності;

– для забезпечення максимальної потужності доцільно використовувати пристінні структури або схеми з витікаючою хвилею, незважаючи на їхню конструктивну складність;

– подальший розвиток напрямку полягає у використанні адитивних технологій (3D-друку) для створення діелектричних вставок зі складним градієнтом проникності, що дозволить ще більше зменшити габарити пристроїв.