

ОБМЕЖУВАЧ ПОТУЖНОСТІ НВЧ НА ЧАСТКОВО ЗАПОВНЕНОМУ ДІЕЛЕКТРИКОМ ПРЯМОКУТНОМУ ХВИЛЕВОДІ

DOI 10.36994 / 2788-5518-2022-01-03-06

Почерняєв В.М., д.т.н., проф. Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна. vpochernyaev@gmail.com

Магомедова М.С. Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна. kkz.praktika@ukr.net

Сивкова Н.М. Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна. natsivonat@gmail.com

Анотація: У роботі розроблена конструкція обмежувача потужності НВЧ на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі. Такі обмежувачі потужності на частково заповнених діелектриком прямокутних хвилеводах дозволяють обмежувати великі потужності, у тому числі в тропосферній компоненті комбінованих станцій НВЧ, що не знижує електричної міцності пристрою. В роботі використовується відкрита нелінійна структура, яка є елементом з розподіленими параметрами та має електричну міцність практично таку ж, як частково заповнений діелектриком прямокутний хвилевод. Включення відкритої нелінійної структури у діелектричну пластину прямокутного хвилеводу (частково заповненого діелектриком прямокутного хвилеводу) дозволяє зменшити конструктивні неоднорідності лінії передачі та уникнути звуження робочого діапазону частот. У роботі надана конструкція включення відкритої нелінійної структури в частково заповнений діелектриком прямокутний хвилевод. В роботі показана електрична схема обмежувача потужності НВЧ з паралельним включенням напівпровідникових діодів у вигляді відкритої нелінійної структури в частково заповнений діелектриком прямокутний хвилевод. Для підвищення ефективності управління в схему обмежувачів потужності НВЧ вводять додатковий змішувальний напівпровідниковий діод, який внаслідок більшої чутливості до потужності НВЧ, відкривається при меншому рівні падаючої потужності, ніж обмежувальні діоди. Також приведені формули розрахунку потужності, що поглинається напівпровідниковим діодом та розсіюється у вигляді тепла і пов'язана з падаючою на обмежувач середньою потужністю НВЧ. В роботі надана конструкція обмежувача потужності на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі в якому поперечні геометричні розміри відкритої нелінійної структури збігаються з поперечними геометричними розмірами діелектричної пластини. Наведена формула для визначення обмеження потужності НВЧ. В роботі приведені коефіцієнти трансформації плоско-поперечних стиків та визначена координатна функція, що апроксимує поле на плоско-поперечному стикі діелектричної пластини і відкритої нелінійної структури в частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі. Координатна функція представляється через комбінацію поперечних електричних власних векторних функцій хвилеводу для хвиль типу квазі- H_{10} , квазі- H_{30} та квазі- H_{50} . Надана формула визначення значення нормованої провідності відкритої нелінійної структури при якій настає поріг обмеження.

Ключові слова: обмежувач потужності НВЧ, частково заповнений діелектриком прямокутний хвилевод, відкрита нелінійна структура, напівпровідниковий діод, коефіцієнт трансформації, координатна функція, поперечна електрична власна векторна функція, нормована провідність, електрична міцність.

MICROWAVE POWER LIMITER ON A RECTANGULAR WAVEGUIDE PARTIALLY FILLED BY DIELECTRIC

Vitaliy Pochernyaev, Dr. habil., Prof. State University of Intellectual Technologies and Communications, Odessa, Ukraine. vpochernyaev@gmail.com

Maria Mahomedova. Kyiv Professional College of Communications, Kyiv, Ukraine. kkz.praktika@ukr.net

Natalia Syvkova. State University of Intellectual Technologies and Communications, Odessa, Ukraine. natsivonat@gmail.com

Abstract: At article investigator a microwave power limiter on a rectangular waveguide partially filled by dielectric. Such power limiters on rectangular waveguides partially filled by dielectric make it possible to limit high powers, including in the troposcatter component of combined microwave stations, which does not reduce the electrical strength of the device. In this article is use an open nonlinear structure, which is an element with distributed parameters and has an electrical strength almost the same as that of a rectangular waveguide partially filled by dielectric. The inclusion of an open nonlinear structure in the dielectric plate of a rectangular

waveguide (a rectangular waveguide partially filled by dielectric) makes it possible to reduce the structural inhomogeneities of the transmission line and avoid narrowing the operating frequency range. In article provides a design for the inclusion of an open nonlinear structure in a rectangular waveguide partially filled by dielectric. In this article shows an electrical circuit of a microwave power limiter with a parallel connection of semiconductor diodes in the form of an open nonlinear structure in a rectangular waveguide partially filled by dielectric. To improve control efficiency, an additional mixing semiconductor diode is introduced into the microwave power limiter circuit, which, due to greater sensitivity to microwave power, opens at a lower incident power level than limiting diodes. Also given are formulas for calculating the power absorbed by the semiconductor diode, which is dissipated in the form of heat and is related to the average microwave power incident on the limiter. In article presents the design of a power limiter on a rectangular waveguide partially filled by dielectric, in which the transverse geometric dimensions of the open nonlinear structure coincide with the transverse geometric dimensions of the dielectric plate. The formula for determining the limitation of microwave power is given. The article presents the transformation coefficients of plane-transverse junctions and determines the coordinate function approximating the field at the plane-transverse junction of a dielectric plate and an open nonlinear structure in a rectangular waveguide partially filled by dielectric. The coordinate function is represented through a combination of function transverse electric eigenvector of the waveguide for quasi- H_{10} , quasi- H_{30} and quasi- H_{50} waves. A formula is presented for determining the value of the normalized conductivity of an open nonlinear structure, at which the limitation threshold occurs.

Key words: microwave power limiter, partially filled by dielectric, open nonlinear structure, semiconductor diode, transformation coefficient, coordinate function, transverse electric eigenvector function, normalized conductivity, electric strength.

Вступ

У надзвичайних ситуаціях виникає потреба в мобільних цифрових станціях НВЧ, що швидко розгортаються та здатні одночасно встановлювати прямі зв'язки і організовувати прив'язки до вузлів зв'язку. Для цих цілей розроблено мобільну цифрову тропосферно-радіорелейну станцію (МЦТРРПС) [1,2]. Така станція можлива до застосування в районах стихійних лих та катастроф, в умовах гористості та важкопрохідної місцевості, а також у зоні військового конфлікту та бойових дій. У таких комбінованих станціях НВЧ виникає завдання обмеження впливу просочування потужності НВЧ від однієї компоненти станції до іншої.

Обмежувачі потужності НВЧ, які являють собою феритові пристрої або пристрої на напівпровідникових елементах, так само призначені для захисту вхідних ланцюгів приймачів НВЧ, зниження до безпечного рівня потужності, що надійшла на їх вхід, де в якості перших каскадів використовуються маломощні підсилювачі або змішувачі.

У даній роботі досліджуються напівпровідникові обмежувачі потужності НВЧ на частково заповнених діелектриком прямокутних хвильоводах (ЧЗДПХ). Гранична потужність таких обмежувачів становить одиниці кВт. Обмежувач потужності на напівпровідникових діодах має два стани: пропускання - при малій потужності сигналу і запирання - при великій потужності. Перехід з одного стану в інший ґрунтується на нелінійних властивостях напівпровідникових діодів НВЧ і здійснюється за допомогою зовнішньої напруги, що управляє ними.

В хвильоводних пристроях в якості напівпровідникових елементів зручно використовувати відкриту нелінійну структуру (ВНС) (напівпровідниковий діод відкритого типу). Шляхом зміни електропровідних властивостей напівпровідникових матеріалів діелектричне середовище переходить в провідяще середовище. Управління потужністю НВЧ здійснюється на основі взаємодії змінної щільності плазми напівпровідника з коливаннями НВЧ поля хвильоводу шляхом зміни управляючої напруги, що подається на ВНС.

Напівпровідниковий діод у вигляді ВНС можна включити в лінію передачі паралельно або послідовно. На рис.1а показано паралельне включення ВНС в ЧЗДПХ. На рис.1б показано управління ВНС через провідящу щілину в широкій стінці прямокутного хвильоводу (ВНС на рисунку відсутня). Таке включення має два плоско-поперечних стика прямокутного хвильоводу, частково заповненого лінійним діелектриком з прямокутним хвильоводом, частково заповненим нелінійним діелектриком, тобто хвильоводом з ВНС.

Метою роботи є розробка конструкції обмежувача потужності НВЧ на ЧЗДПХ.

Виконання досліджень

Параметри обмежувачів потужності НВЧ поділяються на дві групи: високого та низького рівнів потужності. Параметри обмежувачів потужності НВЧ для високого рівня потужності: великі втрати запирання L_z , що характеризують ослаблення сигналу під час проходження через обмежувач; мала потужність, що просочується, на виході обмежувача; малий час відновлення $\tau_{\text{відн}}$, який визначає тривалість переходу обмежувача від режиму запирання до режиму пропускання. Параметри обмежувачів потужності НВЧ для низького рівня: малі втрати пропускання $L_{\text{п}}$ при малій вхідній потужності; мінімальна величина коефіцієнта відбиття від входу; широка смуга робочих частот; поріг обмеження $P_{\text{пор}}$, який визначається потужністю сигналу на вході, під впливом якого втрати пропускання збільшуються вдвічі порівняно із втратами пропускання за мінімальної потужності.

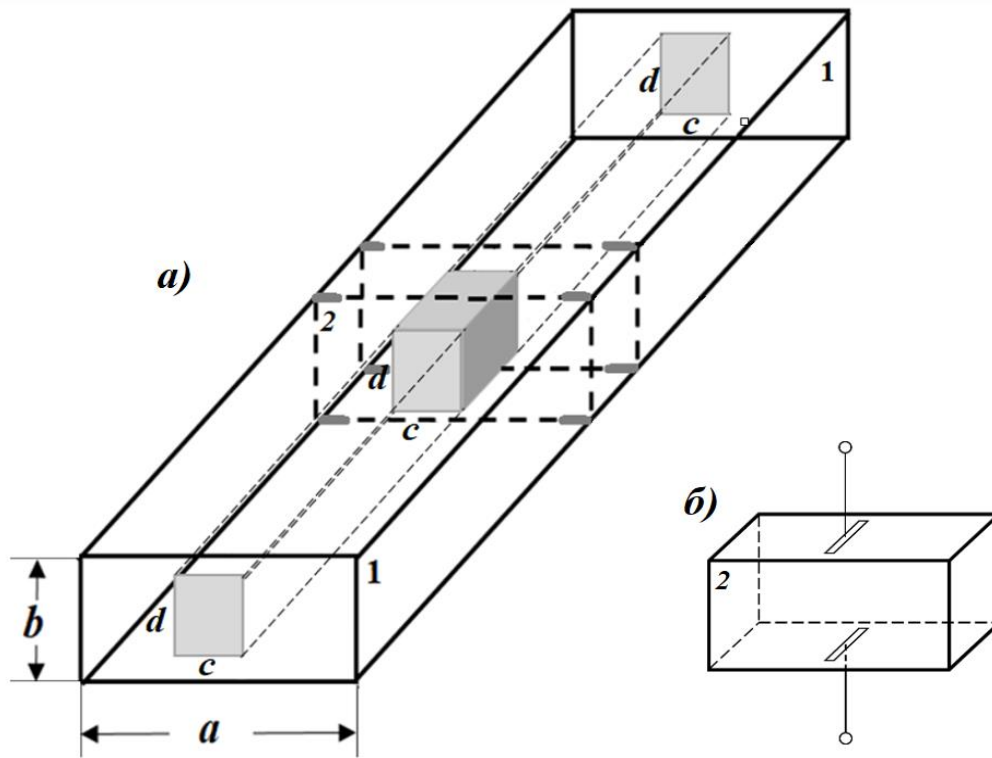


Рис.1. Конструкція включення ВНС в ЧЗДПХ

Обмежувальні діоди НВЧ використовують напівпровідникові структури типу $p-n$ або $p-i-n$. У даному дослідженні це ВНС. Відмінності у використанні $p-n$ і $p-i-n$ - структур призводять до різних робочих рівнів потужності (у $p-i-n$ - вище) і швидкодії (у $p-n$ - вище). Відмінність у рівні потужності пояснюється значно більшим обсягом $p-i-n$ - структури (при одній і тій же величині ємності напівпровідникового діода обсяг $p-i-n$ - структури на 3-4 порядки більший за обсяг $p-n$ - структури), а менша швидкість зумовлена накопиченням в i -шарі великого заряду неосновних носіїв, час розсіювання $\tau_{розс}$ яких великий. Час розсіювання у $p-i-n$ - діодів з різною товщиною i -шару лежить у межах від одиниць до десятків мікросекунд, а у $p-n$ - діодів - у межах від одиниць до десятків наносекунд.

Частота, на якій втрати пропускання дорівнюють втратам запирання ($L_{\pi} = L_3$), є критичною частотою напівпровідникового діода:

$$f_{кр} = (2\pi C_j \sqrt{R_{зак} R_{від}})^{-1},$$

де $R_{зак} \sim C_j^2$, C_j = сотні нФ, $R_{від} \sim 0,25 R_{зак}$.

Потужність, що поглинається напівпровідниковим діодом і розсіюється у вигляді тепла, пов'язана з середньою падаючою НВЧ потужністю $P_{пад}$ виразом:

$$P_{роз.п(з)} = 2P_{пад} (\sqrt{L_{п(з)}} \pm 1) / L_{п(з)}, \quad (1)$$

де L_{π} - втрати пропускання; L_3 - втрати запирання.

Втрати в лінії з паралельно увімкненим напівпровідниковим діодом:

$$L_{\pi} = [1 + z_0 / (2R_{зак})]^2, \quad (2)$$

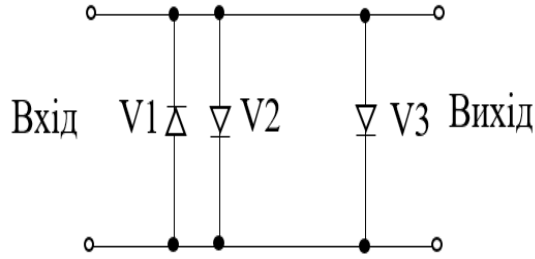
де z_0 — хвильовий опір лінії передачі.

У режимі запирання:

$$L_3 = [1 + z_0 / (2R_{від})]^2. \quad (3)$$

Формула (2) та (3) входить в формулу (1).

На рис.2 показана електрична схема обмежувача потужності НВЧ.



Рисю 2. Електрична схема обмежувача потужності НВЧ

Для підвищення ефективності управління в схему обмежувачів потужності НВЧ вводять додатково змішувальний діод $V3$ (рис.2), який внаслідок більшої, ніж у $p-i-n$ - діодів чутливості до потужності НВЧ, відкривається при меншому рівні падаючої потужності, ніж $p-i-n$ - діоди $V1$ та $V2$. На рис.2 показано паралельне включення напівпровідникових діодів у вигляді ВНС до ЧЗДПХ.

На рис.3 показана конструкція обмежувача потужності НВЧ на ЧЗДПХ, де a, b - широка та вузька стінки прямокутного хвильоводу; c, d - геометричні розміри діелектричної пластини щодо широкої та вузької стінки хвильоводу відповідно; $V1, V2, V3$ - ВНС. Поперечні геометричні розміри ВНС збігаються з поперечними геометричними розмірами діелектричної пластини.

Як показано в роботі [3] електродинамічний розрахунок обмежувача потужності НВЧ на ЧЗДПХ, конструкція якого показана на рис.3, може бути проведений за такою методикою. Обмеження потужності НВЧ здійснюється за заданим рівнем ослаблення сигналу:

$$\mathcal{L} = 20 \lg |T_{11}|,$$

$$|T_{11}|^2 = (1 + \hat{y})^2 / 4\hat{y}^2,$$

$$\hat{y} = 3y_{\text{ВНС}} + \left(\frac{1}{N}\right)^2 (y_{01} + y_{02}),$$

де $y_{\text{ВНС}}$ - нормована провідність ВНС [3]; y_{01}, y_{02} - нормовані провідності відрізків 1 та 2 ЧЗДПХ відповідно [4].

Коефіцієнт трансформації N визначається таким чином:

$$N = 2(N_{v1}^2 + N_{v2}^2 + N_{v3}^2)^{1/2}.$$

Коефіцієнти трансформації стиків:

$$N_{v1} = N_{v2} = N_{v3} = (N_0^2 + N_k^2)^{1/2},$$

$$N_0 = \int_S \overline{\mathfrak{A}}_h \bar{\mathfrak{E}}_{h_{10}} dS,$$

$$N_k = \int_S \overline{\mathfrak{A}}_h \bar{\mathfrak{E}}_k dS.$$

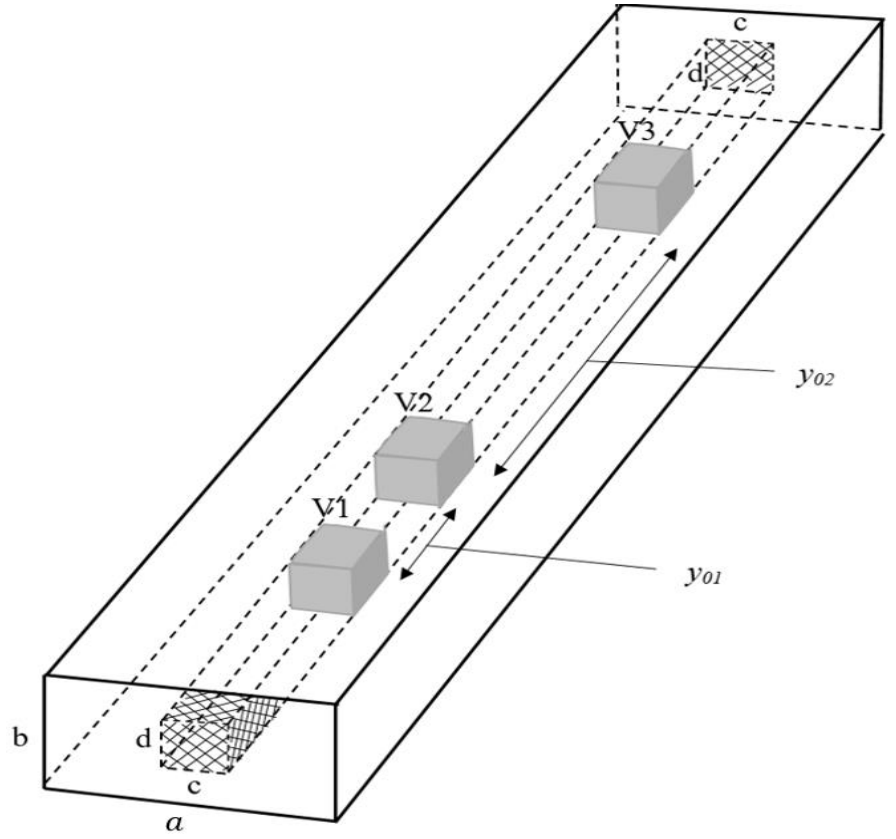


Рис. 3. Конструкція обмежувача потужності НВЧ на ЧЗДПХ

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{\mathcal{E}}_{h_{10}} &= \sqrt{128/ab(64 + q^2 + p^2 + q^2p^2)} * \frac{1}{\kappa_{h_{10}}} * \mathcal{F}, \\
 \mathcal{F} &= \left\{ \left[\left(\frac{\pi}{a} \right) \sin \frac{\pi x}{a} - \left(\frac{p\pi}{2a} \right) * \sin \frac{\pi x}{a} \cos \frac{2\pi y}{b} - \left(\frac{3q\pi}{ba} \right) \sin \frac{3\pi x}{a} * \sin \frac{\pi x}{a} \cos \frac{2\pi y}{b} - \left(\frac{3q\pi}{ba} \right) * \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. * \sin \frac{3\pi x}{a} + \left(\frac{3q\pi}{16a} \right) \sin \frac{3\pi x}{a} \cos \frac{2\pi y}{b} \right] \bar{y}^0 + \left[\left(\frac{p\pi}{b} \right) \cos \frac{\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b} - \left(\frac{2q\pi}{8b} \right) \cos \frac{\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b} \right] \bar{x}^0 \right\}, \\
 \bar{\mathcal{E}}_{h_{30}} &= \sqrt{128/ab(64 + q^2 + p^2 + q^2p^2)} * \frac{1}{\kappa_{h_{30}}} * \mathcal{J}, \\
 \mathcal{J} &= \left\{ \left[\frac{p\pi}{b} \cos \frac{3\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b} y - \frac{qp\pi}{16b} \left(\cos \frac{5\pi x}{a} x - 2 \cos \frac{\pi x}{a} \right) \times \sin \frac{2\pi y}{b} y \right] \bar{x}^0 + \left[\frac{3\pi}{a} * \sin \frac{3\pi x}{a} x - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{3p\pi}{2a} \sin \frac{3\pi x}{a} x \cos \frac{2\pi y}{b} y - \frac{qp}{8a} \left(\frac{5}{2} \sin \frac{5\pi x}{a} x - \sin \frac{\pi x}{a} x \right) + \frac{qp\pi}{16a} \left(\frac{5}{2} \sin \frac{5\pi x}{a} x - \sin \frac{\pi x}{a} x \right) \cos \frac{2\pi y}{b} y \right] \bar{y}^0 \right\}, \\
 \bar{\mathcal{E}}_{h_{50}} &= \sqrt{128/ab(64 + q^2 + p^2 + q^2p^2)} * \frac{1}{\kappa_{h_{50}}} * \mathcal{K}, \\
 \mathcal{K} &= \left[\left(\frac{p\pi}{b} \right) \cos \frac{5\pi x}{a} * \sin \frac{2\pi y}{b} - \left(\frac{qp\pi}{8b} \right) K_1 \sin \frac{2\pi y}{b} \right] \bar{x}^0 + \left(\frac{5\pi}{a} \right) \sin \frac{5\pi x}{a} + \left(\frac{qp\pi}{16a} \right) K_2 \cos \frac{2\pi y}{b} - \\
 &\quad - \frac{2\pi y}{b} - \frac{qp}{8a} - \left(\frac{5p\pi}{2a} \sin \frac{5\pi x}{a} * \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \bar{y}^0, \\
 K_1 &= \frac{1}{3} \cos \frac{7\pi x}{a} - \frac{1}{2} \cos \frac{3\pi x}{a}, \\
 K_2 &= \frac{7}{3} \sin \frac{7\pi x}{a} - \frac{3}{2} \sin \frac{3\pi x}{a}.
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Величини $\bar{\mathcal{E}}_{h_{10}}, \bar{\mathcal{E}}_{h_{30}}, \bar{\mathcal{E}}_{h_{50}}$ – поперечні електричні власні векторні функції ЧЗДПХ. В якості функції $\bar{\mathcal{E}}_k$ беремо функції $\bar{\mathcal{E}}_{h_{30}}$ та $\bar{\mathcal{E}}_{h_{50}}$.

Координатна функція, що апроксимує поле на плоско-поперечному стику діелектричної пластини і ВНС в ЧЗДПХ записується наступним чином:

$$\bar{\mathcal{E}}_h = \bar{\mathcal{E}}_{h_{10}(\text{ВНС})} + \bar{\mathcal{E}}_{h_{30}(\text{ВНС})} + \bar{\mathcal{E}}_{h_{50}(\text{ВНС})}. \quad (5)$$

Поперечні електричні власні векторні функції, що входять у формулу (5), відрізняються від записаних у формулі (4) тим, що у формулах з «ВНС», як критичні хвильові числа або поперечні

хвильові числа використовується хвильове число $\hat{\kappa}_H$ з [5]. Тобто, помножувачі $\frac{1}{\kappa_{h_{10}}}, \frac{1}{\kappa_{h_{30}}}, \frac{1}{\kappa_{h_{50}}}$ змінюються на величину $\frac{1}{\hat{\kappa}_H}$. Однак слід враховувати, що величина $\hat{\kappa}_H$ у трьох вище наведених поперечних електричних власних векторних функціях відрізнятиметься значенням ефективної діелектричної проникності [4].

Нормована провідність ВНС, при якій настає поріг обмеження:

$$y_{\text{пор.ВНС}} = \frac{y_{\text{ВНС}}}{y_{\text{ВНС}}(4\sqrt{y_{\text{ВНС}}} + 1) - 1},$$

де $y_{\text{ВНС}}$ - нормована провідність ВНС. Нормування здійснюється відносно хвильової провідності ЧЗДПХ.

При виборі типу ліній, які можна раціонально використовувати в приймачах МЦТРРС, слід враховувати, що перехід з одного типу лінії на інший збільшує втрати сигналу і звужує смугу частот. Тому необхідна розробка ряду пристроїв із нелінійними елементами на ЧЗДПХ. Слід відмітити, що конструкцію обмежувача потужності НВЧ (рис.3) можна використовувати у тропосферних компонентах МЦТРРС, які використовують відносно великі потужності.

При різних неоднорідностях (поворотах, стрибках хвильових опорів) виникають вищі типи хвиль, які при резонансі збільшують втрати на окремих частотах і створюють фазові спотворення. Для боротьби з цим конструкцію приймального пристрою слід виконувати з униканням резонансних частот. Якщо розглядати приймач, реалізований на хвилеводах з діелектриком, то у приймачі можуть виникати коливання хвиль типу E . Визначення характеристик цих коливань – складна електродинамічна задача. Приблизно можна розраховувати резонансні довжини хвиль в конструкціях хвилеводних пристроїв наступним чином:

$$\lambda_{\text{рез}} \approx 2D / (L^2 + G^2)^{1/2},$$

$$D = 1 / \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}},$$

де G, L - габарити хвилеводного пристрою; $\varepsilon_{\text{эф}}$ - ефективна діелектрична проникність для основної хвилі.

Висновки

На закінчення відзначимо, що наявність конструктивних неоднорідностей лінії передачі призводить до звуження робочого діапазону частот. Уникнути цього вдається включенням ВНС у пластину ЧЗДПХ. Ланцюг живлення тонких провідників, довжина яких дорівнює непарному числу чвертьхвильових відрізків, що проходить через середину широкої стінки хвилеводу паралельно вузькій стінці має довжину не більше $0,2b$ і не збільшує коефіцієнт стоячої хвилі пристрою. Вибрана ВНС є елементом з розподіленими параметрами та має електричну міцність практично таку ж, як ЧЗДПХ. Як відомо, електрична міцність ЧЗДПХ вища за електричну міцність полого прямокутного хвилеводу в широкому діапазоні змін параметрів діелектричної пластини [6].

Слід зазначити, що розробка обмежувача потужності НВЧ на ЧЗДПХ з ВНС не є звичайною схемотехнічною задачею. Конструювання має проводитися, ґрунтуючись на вирішенні ключової задачі по плоско-поперечному стику двох хвилеводів: з лінійним та нелінійним діелектриком [5].

Обмежувач потужності НВЧ на ЧЗДПХ дозволяє обмежувати великі потужності, у тому числі в мобільних цифрових тропосферних станціях та в тропосферних компонентах мобільних цифрових комбінованих станцій НВЧ, що однак не знижує електричної міцності пристрою.

Література

1. Патент 112217 Україна, С2. Мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція / Почерняєв В.М., Повхліб В.С. Заявник і патентовласник Почерняєв В.М., Повхліб В.С.; заявл. 12.09.2014; опубл. 10.08.2016 // Бюл. № 15.
2. Патент №120288 Україна. Мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція / Почерняєв В.М., Повхліб В.С., Зайченко В.В.; заявл. 29.08.2017; опубл. 11.11.2019 // Бюл. № 21.
3. Pochernyaev V., Sykova N. Broadband switch on partially filled by dielectric rectangular waveguide // The scientific heritage ISSN 9215 – 0365, 2021. – Vol 1. – № 60(60). – С.49-52.
4. Почерняєв В.Н. Устройства на частично заполненных диэлектриком волноводах / Почерняєв В.Н. – К: УКНИПСК, 2000. – 222с.
5. Почерняєв В.М. Зовнішні параметри з'єднання прямокутного хвилевода, частково заповненого лінійним діелектриком з прямокутним хвилеводом, частково заповненим нелінійним діелектриком / Почерняєв В.М., Сивкова Н.М. // Вісник Університету «Україна». – Київ, 2020. - №1 (24). – С.100-105.
6. Почерняєв В.М., Цибизов К.Н. Теория сложных волноводов. – Киев: Науковий світ, 2003. – 224с.

References

1. Patent 112217 Ukrayina, C2. Mobilna cifrova troposferno-radiorelejna stanciya / Pochernyaev V.M., Povhlib V.S. Zayavnik i patentovlasnik Pochernyaev V.M., Povhlib V.S.; zayavl. 12.09.2014; opubl. 10.08.2016 // Byul. № 15.
2. Patent №120288 Ukraïna. Mobil'na cifrova troposferno-radiorelejna stanciya / Pochernyaev V.M., Povhlib V.S., Zajchenko V.V.; zayavl. 29.08.2017; opubl. 11.11.2019 // Byul.№ 21.
3. Pochernyaev V., Syvkova N. Broadband switch on partially filled by dielectric rectangular waveguide // The scientific heritage ISSN 9215 – 0365, 2021. – Vol 1. – № 60(60). – C.49-52.
4. Pochernyaev V.N. Ustrojstva na chastichno zapolnennyh dielektrikom volnovodah / Pochernyaev V.N. – K: UKNIPSK, 2000. – 222s.
5. Pochernyaev V.M. Zovnishni parametri z'yednannya pryamokutnogo hvilevoda, chastkovo zapovnenogo liniynim dielektrikom z pryamokutnim hvilevodom, chastkovo zapovnenim nelinejnim dielektrikom / Pochernyaev V.M., Syvkova N.M. // Visnik Universitetu «Ukrayina». – Kiyiv, 2020. - №1 (24). – C.100-105.
6. Pochernyaev V.M., Cibizov K.N. Teoriya slozhnyh volnovodov. – Kiev: Naukovij svit, 2003. – 224s.

