

УДК.621.372

ПРИСТРІЙ УПРАВЛІННЯ ПОТУЖНІСТЮ НВЧ НА ЧАСТКОВО ЗАПОВНЕНОМУ ДІЕЛЕКТРИКОМ ПРЯМОКУТНОМУ ХВИЛЕВОДІ

DOI 10.36994/2788-5518-2021-01-01-06⁶

Почерняєв В.М., д.т.н., проф., Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Київ, Україна. vpochernyaev@gmail.com

Сивкова Н.М., Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Київ, Україна. natsivonat@gmail.com

Анотація. У статті розроблено широкосмуговий пристрій управління потужністю НВЧ на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі. В якості керуючого елемента застосована відкрита нелінійна структура (нелінійний опір відкритого типу), яка включена в діелектричну пластину частково заповненого діелектриком прямокутного хвилеводу. Показана конструкція такого пристрою і її еквівалентна схема. Для такої еквівалентної схеми записані матриця передачі і матриця розсіювання. Елементами цих матриць є нормовані провідності хвилеводів з відкритою нелінійною структурою. Виписані модулі коефіцієнта передачі і коефіцієнта відбиття. Фазова постійна основної квазі- H_{10} хвилі частково заповненого діелектриком прямокутного хвилеводу з відкритою нелінійною структурою записана в явному вигляді. Чисельні результати залежності модуля коефіцієнта передачі від активної складової комплексної провідності відрізка, частково заповненого діелектриком прямокутного хвилеводу з відкритою нелінійною структурою і модуля коефіцієнта відбиття від активної складової комплексної провідності відрізка, частково заповненого діелектриком прямокутного хвилеводу з відкритою нелінійною структурою представлені у вигляді графіків. Ці залежності побудовані при фіксованих значеннях реактивної складової комплексної провідності відрізка, частково заповненого діелектриком прямокутного хвилеводу з відкритою нелінійною структурою. Знайдено вирази для коефіцієнта поглинання. Визначена нормована активна провідність, при якій потужність, що поглинається, максимальна. У статті зазначено, що створення управляючого пристрою на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі з відкритою нелінійною структурою не є звичайною схемотехнічною задачею.

Ключові слова: Керуючий елемент, частково заповнений діелектриком хвилевід, відкрита нелінійна структура, коефіцієнт передачі, коефіцієнт відбиття, коефіцієнт поглинання, матриця розсіювання, активна складова комплексної провідності, реактивна складова комплексної провідності.

⁶ Почерняєв В.М., Сивкова Н.М.

УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ СВЧ НА ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОМ ДИЭЛЕКТРИКОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

Почерняев В.Н., д.т.н., проф., Одесская национальна академия связи им. А.С. Попова, Киев, Украина. vpochernyaev@gmail.com

Сивкова Н.М., Одесская национальна академия связи им. А.С. Попова, Киев, Украина. natsivonat@gmail.com

Аннотация. В статье разработано широкополосное устройство управления мощностью СВЧ на частично заполненном диэлектриком прямоугольном волноводе. В качестве управляющего элемента применена открытая нелинейная структура (нелинейное сопротивление открытого типа), которая включена в диэлектрическую пластину частично заполненного диэлектриком прямоугольного волновода. Показана конструкция такого устройства и ее эквивалентная схема. Для такой эквивалентной схемы записаны матрица передачи и матрица рассеяния. Элементами этих матриц являются нормированные проводимости волноводов с открытой нелинейной структурой. Выписаны модули коэффициента передачи и коэффициента отражения. Фазовая постоянная основной квази- H_{10} волны частично заполненного диэлектриком прямоугольного волновода с открытой нелинейной структурой записана в явном виде. Численные результаты зависимости модуля коэффициента передачи от активной составляющей комплексной проводимости отрезка, частично заполненного диэлектриком прямоугольного волновода с открытой нелинейной структурой и модуля коэффициента отражения от активной составляющей комплексной проводимости отрезка, частично заполненного диэлектриком прямоугольного волновода с открытой нелинейной структурой представлены в виде графиков. Эти зависимости построены при фиксированных значениях реактивной составляющей комплексной проводимости отрезка, частично заполненного диэлектриком прямоугольного волновода с открытой нелинейной структурой. Найдено выражения для коэффициента поглощения. Определена нормированная активная проводимость, при которой поглощенная мощность максимальна. В статье отмечено, что создание управляющего устройства на частично заполненном диэлектриком прямоугольном волноводе с открытой нелинейной структурой не является обычной схемотехнической задачей.

Ключевые слова: Управляющий элемент, частично заполненный диэлектриком волновод, открытая нелинейная структура, коэффициент передачи, коэффициент отражения, коэффициент поглощения, матрица рассеяния, активная составляющая комплексной проводимости, реактивная составляющая комплексной проводимости.

MICROWAVE POWER CONTROL DEVICE ON A RECTANGULAR WAVEGUIDE PARTIALLY FILLED BY DIELECTRIC

Pochernyaev V.N., Doctor of Technical Sciences, Prof., O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications, Kyiv, Ukraine, vpochernyaev@gmail.com

Syvko N.M. O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications, Kyiv, Ukraine, natsivonat@gmail.com

Abstract. The article developed a broadband microwave power control device based on a rectangular waveguide partially filled by dielectric. An open nonlinear structure (open-type nonlinear resistance) is used as a control element, which is included in the dielectric plate of a rectangular waveguide partially filled by dielectric. The construction of such a device and its equivalent circuit are shown. For such an equivalent circuit, the transmission matrix and the scattering matrix are written. The elements of these matrices are normalized conductivities of waveguides with an open nonlinear structure. The modules of the transmission coefficient and the reflection coefficient are written. The phase constant of the main quasi- H_{10} wave of a rectangular waveguide partially filled by dielectric with an open nonlinear structure is written explicitly. The numerical results of the dependence of the modulus of the transfer coefficient on the active component of the complex conductivity of a segment partially filled by dielectric of a rectangular waveguide with an open nonlinear structure and the modulus of the reflection coefficient on the active component of the complex conductivity of a segment partially filled by dielectric of a rectangular waveguide with an open nonlinear structure are presented in the form of graphs. These dependences are plotted for fixed values of the reactive component of the complex conductivity of a segment partially filled by dielectric of a rectangular waveguide with an open nonlinear structure. Expressions for the absorption coefficient are found. The normalized active conductivity at which the absorbed power is maximum is determined. It is noted in the article that the creation of a control device based on a rectangular waveguide partially filled by dielectric with an open nonlinear structure is not a common circuit problem.

Keywords: control element, rectangular partially filled waveguide by dielectric, open nonlinear structure, transmission coefficient, reflection coefficient, absorption coefficient, transmission matrix, scattering matrix, active component of complex conductivity, reactive component of complex conductivity.

Вступ

Управління амплітудою коливань здійснюється внаслідок відбиття або поглинання НВЧ енергії. Звідси пристрої, що управляють потужністю діляться на два види: прохідні та відбиваючі. До прохідних пристроїв відносяться, наприклад, атенюатори, стабілізатори, а до відбиваючих, наприклад, комутатори, перемикачі. Якщо необхідно хвильове виконання, то широкосмугові пристрої з $\Delta f \geq 20\%$, що управляють потужністю НВЧ, можна реалізувати на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі (ЧЗДПХ).

Метою роботи є розробка широкосмугового пристрою управління потужністю НВЧ на ЧЗДПХ.

Основний зміст

В хвилеводних пристроях в якості управляючого елемента зручно використовувати відкриту нелінійну структуру (ВНС) (нелінійний опір відкритого типу). Шляхом зміни електропровідних властивостей напівпровідникових матеріалів діелектричне середовище переходить в провідяче середовище. Управління НВЧ потужністю здійснюється на основі

взаємодії змінної щільності плазми напівпровідника з коливаннями НВЧ поля хвильоводу шляхом зміни управляючої напруги, що подається на ВНС.

Нелінійний опір 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 проводячу 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. Дослідження такого плоско-поперечного з'єднання проведено в [1]. Даний ЧЗДПХ є прямокутним хвильоводом з розмірами $a \times b$, в якому розташована діелектрична пластина розмірами $c \times d$, що не торкається стінок хвильоводу і має відносну діелектричну проникність ϵ_r . У діелектричну пластину включена ВНС з такими ж поперечними геометричними розмірами $c \times d$. Хвильовод 1 представляє собою ЧЗДПХ, хвильовод 2 – ЧЗДПХ з ВНС.

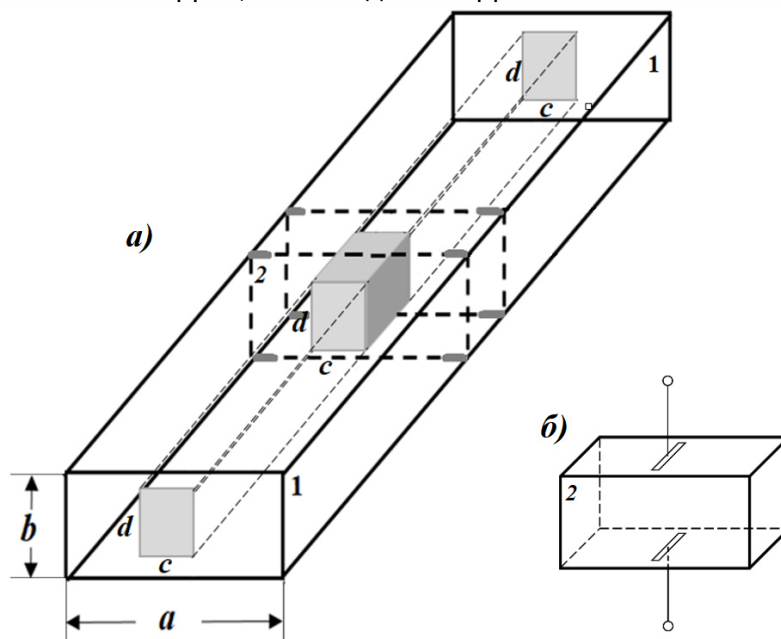


Рис.1. Конструкція включення ВНС в ЧЗДПХ

Еквівалентна схема такої структури має наступний вигляд (рис.2):

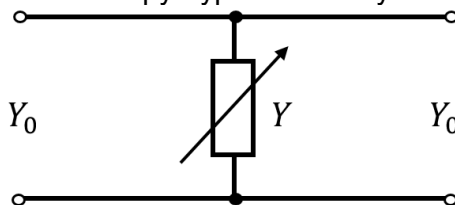


Рис. 2. Еквівалентна схема включення ВНС в ЧЗДПХ

Матриця розсіювання такої схеми наступна:

$$[S] = \begin{bmatrix} -\frac{y}{2+y} & \frac{2}{2+y} \\ \frac{2}{2+y} & -\frac{y}{2+y} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $y = Y/Y_0$ – нормована провідність хвильоводу з ВНС; $Y = G + jB$ – комплексна провідність хвильоводу з ВНС; Y_0 – хвильова провідність ЧЗДПХ [2].

Запишемо явний вид коефіцієнтів матриці розсіювання (1).

Комплексний коефіцієнт відбиття:

$$S_{11} = S_{22} = -\frac{y}{2+y}.$$

Комплексний коефіцієнт передачі:

$$S_{12} = S_{21} = \frac{y}{2+y}.$$

Модуль коефіцієнта відбиття:

$$|S_{11}| = |S_{22}| = \frac{g}{2+g},$$

де $g = G/Y_0$ – нормована активна провідність ВНС.

Аргумент коефіцієнта відбиття $\varphi = \pi$.

Модуль коефіцієнта передачі:

$$|S_{12}| = |S_{21}| = \frac{2}{2+g}.$$

Аргумент коефіцієнта передачі $\varphi = 0$.

Загасання, що вноситься управляючим елементом в лінію передачі наступне:

$$\mathcal{L} = 10 \lg \frac{1}{|S_{12}|^2}. \quad (2)$$

У формулі (2) величина S_{12} береться з формули (1). При чисто активній провідності, що включена в лінію передачі паралельно, загасання наступне:

$$\mathcal{L} = 20 \lg \left(1 + \frac{g}{2} \right).$$

Запишемо матрицю передачі для схеми рис.1:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 + \frac{y}{2} & \frac{y}{2} \\ -\frac{y}{2} & 1 - \frac{y}{2} \end{bmatrix},$$

Загасання, що вноситься каскадним з'єднанням, визначається модулем коефіцієнта T_{11} матриці передачі всього ланцюга:

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

Комплексний коефіцієнт передачі T та коефіцієнт відбиття Γ , що визначають роботу управляючого пристрою при узгодженому вході і виході наступні:

$$T = \frac{2}{2+y}, \quad \Gamma = -\frac{y}{2+y}, \quad (3)$$

де $y = g + jb$ – нормована комплексна провідність відрізка ЧЗДПХ з ВНС.

Підставив величину y в (3) отримаємо формули для визначення модулів і аргументів коефіцієнтів передачі та відбиття управляючого пристрою на одному нелінійному опорі у вигляді ВНС:

$$\begin{aligned} |T| &= \frac{2}{\sqrt{(2+g)^2 + b^2}}, \\ |\Gamma| &= \frac{\sqrt{[g(2+g) + b^2]^2 + 4b^2}}{[(2+g)^2 + b^2]}, \\ \varphi_T &= -\arctg \left[\frac{b}{2+g} \right], \\ \varphi_\Gamma &= \pi + \arctg \left[\frac{2b}{g(2+g) + b^2} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Матриця передачі $[T]$ відрізка ЧЗДПХ з ВНС має наступний вигляд:

$$[T] = \begin{bmatrix} e^{j\theta} & 0 \\ 0 & e^{-j\theta} \end{bmatrix},$$

де $\theta = \beta_{\text{ВНС}} l$, $\beta_{\text{ВНС}}$ – фазова постійна основної квазі- H_{10} хвилі ЧЗДПХ з ВНС, l – довжина відрізка ЧЗДПХ з ВНС.

Фазова постійна $\beta_{\text{ВНС}}$ основної квазі- H_{10} хвилі ЧЗДПХ з ВНС визначається наступним чином:

$$\beta_{\text{ВНС}} = k_0 \sqrt{(\varepsilon_{\text{еф}} + \alpha \bar{\varepsilon}_{h_{10}}^2) - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2},$$

де k_0 – хвильове число, $(\varepsilon_{\text{еф}} + \alpha \bar{\varepsilon}_{h_{10}}^2)$ – діелектрична проникність ВНС, λ – довжина хвилі, $\lambda_{\text{кр}}$ – критична довжина хвилі.

На рис.3 показана залежність модуля коефіцієнта передачі від активної складової комплексної провідності відрізка ЧЗДПХ з ВНС при різних значеннях реактивної складової: крива 1 - при $b=0,1$; крива 2 - при $b=0,5$; крива 3 - при $b=1$.

На рис.4 показана залежність модуля коефіцієнта відбиття від активної складової комплексної провідності відрізка ЧЗДПХ з ВНС при різних значеннях реактивної складової: крива 1 - при $b=0,1$; крива 2 - при $b=0,5$; крива 3 - при $b=1$.

Прохідні пристрої управління амплітудою НВЧ коливань з чисто активним управляючим елементом мають кращі характеристики в порівнянні з управляючим пристроєм на одному чисто реактивному елементі. Для прохідних пристроїв управління потужністю НВЧ кращими є елементи з активною провідністю, що керується. Якщо управляючий елемент також має і реактивну складову провідності, характеристики управляючого пристрою погіршуються. При збільшенні нормованої реактивної провідності до 0,5, коефіцієнт передачі зменшується незначно, а коефіцієнт відбиття

збільшується трохи більше, особливо при малих значеннях активної провідності.

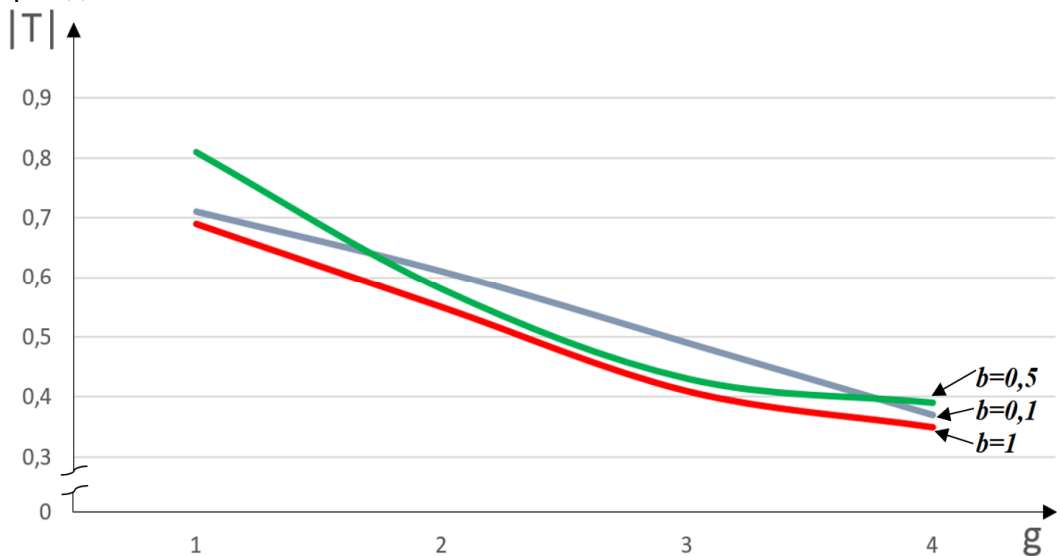


Рис. 3. Залежність модуля коефіцієнта передачі від активної складової комплексної провідності відрізка ЧЗДПХ з ВНС

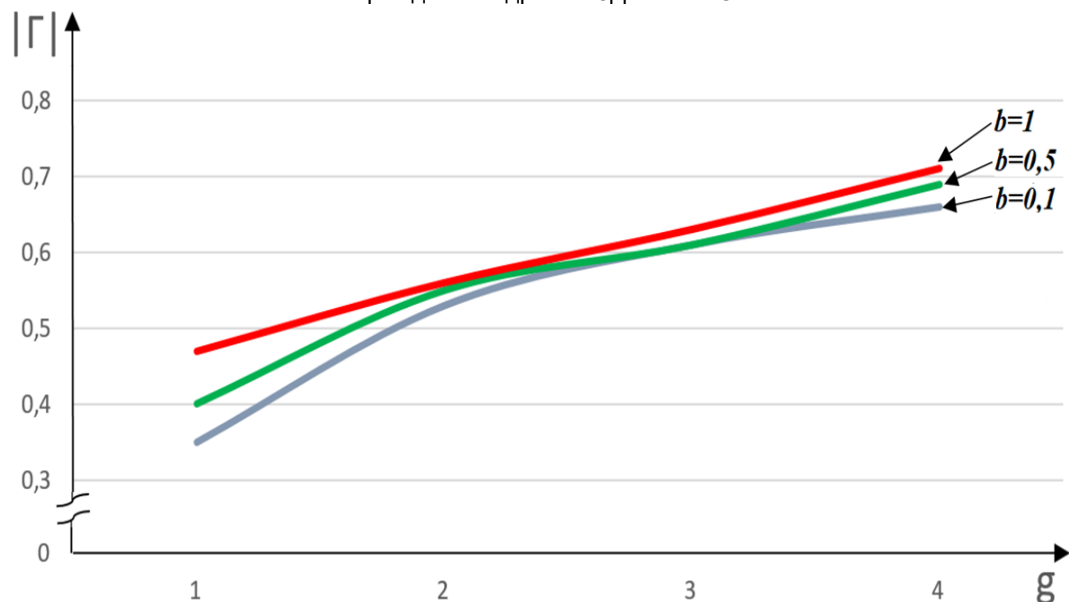


Рис. 4. Залежність модуля коефіцієнта відбиття від активної складової комплексної провідності відрізка ЧЗДПХ з ВНС

Тому ВНС вважаються кращими нелінійними опорами, оскільки мають найменшу реактивну провідність. Також, слід зазначити, їх зручне конструктивне включення в діелектричну пластину ЧЗДПХ. У цьому випадку не

треба вводити компенсуючі індуктивності, щоб зменшити ємність нелінійного опору.

Визначимо потужність, що поглинається одним управляючим елементом. Для управляючого елемента виконується рівність:

$$T^2 + \Gamma^2 + \Delta^2 = 1, \quad (5)$$

де Δ - коефіцієнт поглинання.

Підставивши значення модулів коефіцієнта передачі і коефіцієнта відбиття передачі з (4) в (5) отримаємо для управляючого пристрою з одним управляючим елементом вираз для коефіцієнта поглинання:

$$\Delta = \sqrt{\frac{4g}{(2+g)^2 + b^2}}.$$

Нормована активна провідність, при якій поглинена потужність максимальна, визначається з умови:

$$g = \sqrt{4 + b^2}.$$

Максимальну потужність поглинає чисто активний управляючий елемент. Реактивна складова провідності управляючого елемента зменшує максимальну поглинену потужність. Безкорпусний нелінійний опір у вигляді ВНС, включений в діелектричну пластину прямокутного хвильоводу не вносить додаткових провідностей.

Висновки

На закінчення відзначимо, що наявність конструктивних неоднорідностей в лінії передачі, призводить до звуження робочого діапазону частот. Уникнути цього вдається включенням ВНС в пластину ЧЗДПХ. Ланцюг живлення тонких провідників, довжина яких дорівнює непарному числу чвертьхвильових відрізків, що проходить через середину широкої стінки хвильоводу паралельно вузькій стінці має протяжність не більше $0,2b$ та не збільшує коефіцієнт стоячої хвилі пристрою. Обрана ВНС є елементом з розподіленими параметрами і має електричну міцність практично таку ж, як і ЧЗДПХ. Як відомо, електрична міцність ЧЗДПХ вище електричної міцності полого прямокутного хвильоводу в широкому діапазоні змін параметрів діелектричної пластини [3]. Слід зазначити, що створення управляючого пристрою на ЧЗДПХ з ВНС не є звичайною схемотехнічною задачею. Конструювання має здійснюватися, ґрунтуючись на рішенні ключового завдання по стику двох хвильоводів: з лінійним та нелінійним діелектриком [1].

Література

1. Почерняєв В.М., Сивкова Н.М. Зовнішні параметри з'єднання прямокутного хвильовода, частково заповненого лінійним діелектриком з прямокутним хвильоводом, частково заповненим нелінійним діелектриком // Вісник Університету «Україна», 2020, № 1 (24). – С.100-105.
2. Почерняєв В.М. Устройства на частично заполненных диэлектриком волноводах. – Киев: УКНИПСК, 2000. – 224с.

3. Почерняев В.Н., Скрыпник Л.В. Электрическая прочность полосового фильтра на комбинированных волноводно-диэлектрических звеньях // Радиоэлектроника, 1991, №10. – С.108 - 110 (высш. учебн. завед.).

References

1. Pochernyaev V.N., Syvkova N.M. External parameters of the connection of a rectangular waveguide partially filled of linear dielectric with a rectangular waveguide partially filled of nonlinear dielectric // Bulletin of the University "Ukraine", 2020, No. 1 (24). - S.100-105.
2. Pochernyaev V.N. Devices based on waveguides partially filled with a dielectric. - Kiev: UKNIPSK, 2000.- 224p.
3. Pochernyaev V.N., Skrypnik L.V. The electrical strength of a band-pass filter based on combined waveguide-dielectric links // Radioelectronics, 1991, No. 10.-P.108 - 110 (proceedings higher educational institution).