

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НВЧ КРУГЛОГО ХВИЛЬОВОДУ З ДІЕЛЕКТРИЧНИМ ЗАПОВНЕННЯМ

Лобода О. І.

Таврійський державний агротехнологічний університет

В статті отримано математичні моделі електричного поля круглого хвильоводу з діелектричним заповненням при врахуванні нелінійності середовища, які описані диференціальними рівняннями із частинними похідними. На основі методу скінчених різниць визначені діючі значення напруженості електричного поля круглого хвильоводу з діелектричним заповненням для хвиль E-типу і H-типу.

Постанова проблеми. За останні роки різко зросли рівень і об'єм вимог, пропонованих до частотних характеристик пристроїв, які працюють в діапазоні надвисоких частот (НВЧ). Тому останнім часом з різних видів НВЧ ліній передачі на практиці широкое поширення одержали круглі хвильоводи з діелектричним заповненням. Ці лінії передачі більш широкополосні, дешевші й простіші у виготовленні, мають високу електричну міцність, необхідну для передачі великої потужності, високу механічну міцність, що забезпечує високу надійність, тривалий термін служби й стійкість до механічних впливів, мінімальні втрати енергії, за рахунок чого збільшується дальність дії радіосистем і поліпшується електричні характеристики елементів і вузлів радіоапаратури, які конструюються на базі НВЧ ліній передачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До розрахунків електричного поля круглого хвильоводу присвячене значне число робіт теоретичного характеру. Слід зазначити, що при всій об'єктивності й цінності отримані теоретичні дані справедливі тільки для лінійного середовища. Однак, при сильних полях, електричне поле усередині хвильоводу поширюється в нелінійних середовищах [2...5].

Мета статті. Задача чисельного розрахунку електричного поля усередині круглого хвильоводу з діелектричним заповненням з урахуванням перерахованих вище факторів не вирішена дотепер і є актуальною задачею в області електродинаміки

Основні матеріали. Відомо, що для електричного поля [1, 2]

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (1)$$

Перетворюючи ліву частину рівняння (1), отримуємо

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

Якщо $\varepsilon = \varepsilon(E)$ рівняння (2) буде мати такий вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\varepsilon(E) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\varepsilon(E) \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\varepsilon(E) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

Необхідно відзначити, що, коли поля є потужними, то середовище веде себе нелінійно. В нелінійному середовищі залежність між відносною діелектричною проникністю ε і напруженістю електричного поля E є нелінійною і має такий вигляд [6]:

$$\varepsilon = 1,8 + 1,066 \cdot 10^{-5} E \quad (4)$$

Підставляючи рівняння (4) в (3) отримуємо:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[(1,8 + 1,066 \cdot 10^{-5} E) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[(1,8 + 1,066 \cdot 10^{-5} E) \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[(1,8 + 1,066 \cdot 10^{-5} E) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (5) \end{aligned}$$

Необхідно відзначити, що, отримане диференціальне рівняння в частинних похідних (5), є математичною моделлю електричного поля НВЧ круглого хвильоводу з діелектричним заповненням, є нелінійним і ця складна математична модель достатня повно й точно відображає властивості реальної системи. Тому загальне аналітичне рішення рівняння (5) одержати не вдається й доводиться його вирішувати за допомогою чисельних методів. У зв'язку із цим виникає питання про вибір чисельного методу для рішення рівняння в частинних похідних (5).

Метод скінчених різниць [6...8] один з найефективніших чисельних методів і у зв'язку із цим, один з найбільше широко застосовуваних методів рішення початкових або початково-крайових задач для диференціальних рівнянь у частинних похідних. Рішення, отримані методом скінчених різниць, являють собою сукупність значень, що описують поле функції в дискретних крапках, рівномірно розподілених по всій області поля. Ці значення знаходимо шляхом заміни одного диференціального рівняння, що описує поле, у частинних похідних системою простих рівнянь у скінчених різницях, які мають вигляд лінійних рівнянь, що зв'язують значення потенціалу в кожній крапці зі значеннями потенціалу в інших крапках, що оточують неї.

Таким чином, для визначення поля усередині НВЧ круглого хвильоводу з діелектричним заповненням:

- 1) перетворимо диференціальне рівняння (5) у систему лінійних алгебраїчних рівнянь;
- 2) вирішуємо отриману систему.

На основі вищевикладеного математичного алго-

ритму зроблений розрахунок напруженості електричного поля НВЧ круглого хвильоводу з діелектричним заповненням при збудженні хвиль E -типу та H -типу за допомогою комп'ютерної програми Microwave Office 2007 [7]. На основі отриманих числових результатів побудовані залежності (рис. 1, 2) між напруженістю електричного поля й довжиною поперечного перерізу круглого хвильоводу з діелектричним заповненням для хвиль E -типу та H -типу. Ці залежності дозволяють визначити розподіл електричного поля усередині даного пристрою. Слід зазначити, що дані залежності також дають можливість визначити зв'язок між електромагнітними і конструктивними параметрами досліджуваного пристрою.

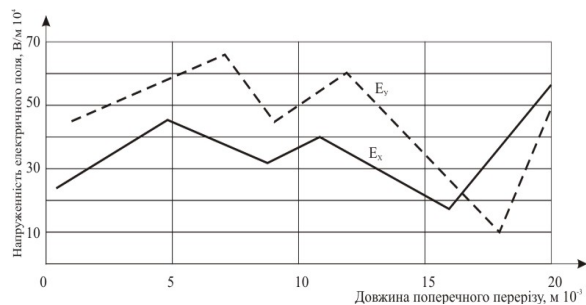


Рисунок 1 – Залежність напруженості електричного поля від довжини поперечного перерізу для хвилі E -типу

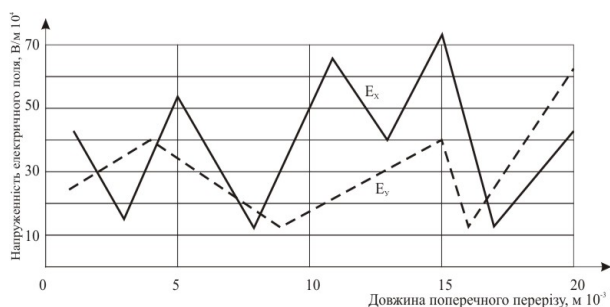


Рисунок 2 – Залежність напруженості електричного поля від довжини поперечного перерізу для хвилі H -типу

З метою уточнення вірогідності зроблених теоретичних викладень виникає необхідність звернутися до результатів експериментальних досліджень. Тому для виміру напруженості електричного поля усередині НВЧ хвильоводу був застосований метод реактивного зонда. Розбіжність між теорією й експериментом становить близько 6%. Ця обставина доводить не тільки вірність результатів, отриманих по формулі (5), але й підтверджує важливе значення пропонованої формули, що забезпечує граничне просте рішення цієї важкої задачі.

Висновки. На основі отриманих результатів можна зробити такі висновки.

1. Показано, що при потужних полях середовище усередині НВЧ круглого хвильоводу з діелектричним заповнюванням веде себе нелінійно, тобто відносна діелектрична проникність середовища ϵ є функцією напруженості електричного поля E .

2. Враховуючи нелінійність середовища, створені нові математичні моделі електричного поля НВЧ круглого хвильоводу з діелектричним заповненням;

3. Отримане диференціальне рівняння обчислене із допомогою метода скінчених різниць і визначені

числові значення напруженості електричного поля НВЧ круглого хвильоводу з діелектричним заповненням при збудженні хвиль E -типу і H -типу.

4. Отримані в роботі теоретичні результати можуть бути використані в різноманітних лініях передачі НВЧ діапазону.

Список використаних джерел

1. Новожилов Ю. В. Электродинамика / Ю. В. Новожилов, Ю. А. Яппа М.: Наука. – 1978. – 352 с.
2. Марков Г. Т. Математические методы прикладной электродинамики / Г. Т. Марков, Е. Н. Васильев. – М.: Советское радио. – 1970. – 120 с.
3. Изюмова Т. И. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии / Т. И. Изюмова, В. Т. Свиридов. М.: Энергия. – 1975. – 112 с. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 876)
4. Конструкции СВЧ устройств и экранов: Учеб. Пособие для вузов / А. М. Чернушенко, Н. Е. Меланченко, Л. Г. Малорацкий, Б.В. Петров. Под ред. А. М. Чернушенко. – М.: Радио и связь. - 1983. – 400 с.
5. Машковцев Б. М., Теория волноводов / Б. М. Машковцев, К.Н. Цибизов, Б. Ф. Емелин. – М-Л.: Наука, 1966. – 354 с.
6. Силаев М.А. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. – М.: Советское радио. - 1970. – 248 с.
7. Разевиг В.Д. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office / В. Д. Разевиг, Ю. В. Потапов, А. А. Курушин. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.

Аннотация

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЧ КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА С ДИЕЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

Лобода О.И.

В статье получены математические модели электрического поля круглого волновода с диэлектрическим заполнением с учетом нелинейности среды, которые описаны дифференциальными уравнениями с частными производными. На основании метода конечных разностей определены действующие значения напряженности электрического поля круглого волновода с диэлектрическим заполнением для волн E -типа и H -типа.

Abstract

THE ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE MICROWAVE OVEN OF THE ROUND WAVE GUIDE WITH DIELECTRIC FILLING

A. Loboda

In this paper the mathematical model of the electric field of a circular waveguide with dielectric filling in the light of the nonlinear medium, which are described by differential equations with partial derivatives. On the basis of the finite difference method defined operating values of the strength of the electric field of a circular waveguide with dielectric filling for the waves E -type and H -type.