

Рассеяние волны типа H_{10} на щелевой импедансной диафрагме в прямоугольном волноводе

Ю. М. Пенкин, А. В. Жиронкина, С. А. Мартыненко, Л. П. Яцук

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
61077, Украина, г. Харьков, пл. Свободы, 4

Статья поступила в редакцию 7 марта 2000 г.

С помощью метода Галеркина проведен численный анализ характеристик рассеяния волны типа H_{10} на щелевой импедансной диафрагме конечной толщины в прямоугольном волноводе. Показана возможность управления этими характеристиками путем изменения значений комплексного импеданса пленочного покрытия поверхности диафрагмы.

За допомогою методу Гальоркіна проведено числовий аналіз характеристик розсіювання хвилі типу H_{10} на щілинній діафрагмі скінченної товщини в прямокутному хвилеводі. Показано можливість керування цими характеристиками шляхом зміни значень комплексного імпедансу плівкового покриття поверхні діафрагми.

В волноводной технике СВЧ поперечные апертурные диафрагмы используются в поляризаторах, ограничителях, распределителях СВЧ мощности, фильтрах и т. д. Это, как правило, индуктивные и емкостные диафрагмы, а также одно- и многощелевые диафрагмы различной конфигурации. В настоящее время при разработке узлов волноводного тракта с такими диафрагмами большое внимание уделяется вопросам расширения функциональных возможностей устройств и разработке различных способов управления их электродинамическими характеристиками. Речь идет об изменении рабочего диапазона частот, смене режимов запыриания и пропускания, совмещении нескольких функций в одном узле устройства с целью его миниатюризации.

Помимо традиционных, отработанных на практике способов немеханического управления характеристиками волноводных устройств, выполненных из идеально проводящего металла (изменение геометрии апертуры диафрагмы, включение в ее полость диэлектрических вставок или полупроводниковых диодов и др.) в технике СВЧ и КВЧ (крайне высокие частоты, мм-диапазон) используются также покрытия из материалов с управляемыми физическими свойствами (см., например [1]). Участки волноводных секций покрывают ферритовыми, полупроводниковыми, сегнетоэлектрическими и др. пленками. В частности, покрытия могут наноситься непосредственно на диафрагмы. В литературе такие задачи до сих пор не рассматривались.

Для расчета электродинамических характеристик волноводных узлов, включающих пленочные покрытия, при постановке краевой за-

дачи целесообразно воспользоваться приближением распределенного комплексного импеданса [2]. Это и сделано в настоящей работе при исследовании рассеяния волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе на импедансной диафрагме с узкой щелью, имеющей координатные границы (границы, совпадающие с координатными поверхностями выбранной системы координат).

Постановка задачи и алгоритм решения

В бесконечном прямоугольном волноводе с поперечным сечением $a \times b$, который возбуждается волной типа H_{10} , расположена диафрагма толщиной c , причем одна из ее поверхностей (S_1) совпадает с плоскостью $z = -c$, другая (S_2) – с плоскостью $z = 0$. Щель длиной L и шириной d прорезана в диафрагме так, что ее центр в общем случае смещен от стенок волновода соответственно на расстояния x_0 и y_0 (геометрия системы приведена на рис. 1). Поверхность диафрагмы S_2 характеризуется комплексным распределенным импедансом ξ , все остальные внутренние поверхности волноводной системы, включая стенки резонатора, образованного полостью отверстия связи, считаются идеально проводящими. Рассмотрим рассеяние волны типа H_{10} на диафрагме при условии $d \ll L$, которое позволяет предполагать, что электрическое поле в щели направлено только поперек неё и в этом направлении постоянно.

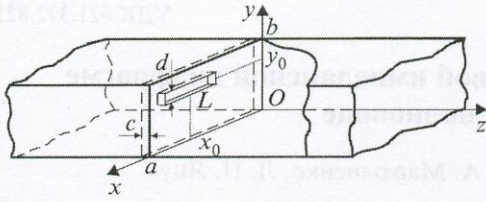


Рис. 1. Геометрия задачи

Не проводя здесь сравнительного анализа численных методов, с помощью которых можно было бы исследовать поставленную электродинамическую задачу (см., например, [3]), применим для её решения наиболее предпочтительный, по нашему мнению, метод Галёркина с использованием тригонометрического базиса полных областей [4]. Он успешно использовался ранее для расчетов характеристик узких щелей в прямоугольном волноводе с учетом конечной толщины волноводной стенки [5,6]. Выражения для проводимостей щелей в импедансном торце полубесконечного прямоугольного волновода получены в работе [7]. Отметим, что в отличие от работы [8], где задача возбуждения прямоугольного волновода с широкой анизотропной импедансной стенкой решена путем непосредственного интегрирования уравнений Максвелла с применением интегралов Фурье, в [7] она решена с помощью функций Грина для векторных потенциалов Герца в случае магнитных и электрических токов, находящихся в одной плоскости и связанных между собой импедансными граничными условиями Щукина-Леонтовича. Приведенная в [7] функция Грина такого вида позволяет корректно находить поля возбуждения в любой области волновода, включая область источника.

Согласно выбранному методу [6,7], полость щелевого элемента связи в диафрагме рассматриваем как прямоугольный резонатор, по стенкам которого (расположенным соответственно в плоскостях $z = -c$ и $z = 0$) распределены магнитные токи:

$$\vec{J}_{1,2}^M = \sum_{p=1}^P V_p^{(1,2)} \frac{\vec{x}^0}{d} \sin p \frac{\pi(x - x_0 + L/2)}{L},$$

где x – координата вдоль щели; \vec{x}^0 – орт вдоль оси x ; $V_p^{(1)}$ и $V_p^{(2)}$ – неизвестные комплексные амплитуды напряжений соответственно на поверхностях щели S_1 и S_2 ; $p = 1, 2, \dots, P$ – числа натурального ряда.

Комплексные амплитуды $V_p^{(1)}$ и $V_p^{(2)}$ определим из условий непрерывности тангенциальных составляющих магнитного поля на поверхностях щели S_1 и S_2 . Элементы матрицы

рассеяния диафрагмы по основной волноводной моде H_{10} (коэффициенты отражения Γ_1 и прохождения Γ_{12}) найдем в соответствии с теорией [4], используя выражения для проводимостей, полученные в работах [6,7,9].

Результаты численных расчетов

По изложенной методике проведен численный анализ влияния импедансного покрытия на характеристики щелевой диафрагмы, расположенной в прямоугольном волноводе перпендикулярно его широкой стенке. Расчеты проводились для волновода стандартного поперечного сечения $a = 23$ мм, $b = 10$ мм с диафрагмой толщиной $c = 1$ мм и следующими геометрическими параметрами щелевого элемента связи: $L = 16$ мм, $d = 1.5$ мм, $x_0 = 11.5$ мм и $y_0 = 5$ мм. При этом количество учитываемых гармоник в распределениях магнитных токов $\vec{J}_{1,2}^M$ было выбрано $P = 5$, а число членов двойных рядов в представлениях функции Грина при расчете проводимостей – $M = 20$ и $N = 15$. Это обеспечило вычисление коэффициентов Γ_1 и Γ_{12} с точностью до $1 \div 3\%$ в зависимости от частоты.

Для проверки результатов расчетов на панорамном индикаторе КСВН Я2Р-67 были проведены измерения КСВН волновода с идеально проводящей диафрагмой, геометрия которой соответствует расчетной. На рис. 2 точками нанесены результаты эксперимента; данные расчетов при $\xi = 0$ Ом представлены кривой 1. Как видно, хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов подтверждает как правомерность используемой методике, так и правильность построения программ математического моделирования.

КСВН

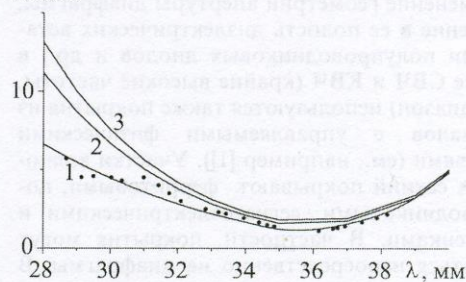


Рис. 2. Зависимость значения КСВН от длины волны при различных значениях действительного импеданса: 1 – $\xi = 0$ Ом; 2 – $\xi = 80$ Ом; 3 – $\xi = 120$ Ом

На рис. 2 представлены зависимости значений КСВН от длины волны при изменении величины действительной части импеданса: значению $\xi = 0$ (идеально проводящая диафрагма) соответствуют кривая 1, значению $\xi = 80$ Ом – кривая 2, а значению $\xi = 120$ Ом – кривая 3. По сравнению с идеально проводящей диафрагмой (кривая 1), варьирование значения действительного импеданса в рассмотренных пределах (кривые 2, 3) не приводит к существенному изменению величины КСВН и характера его частотных зависимостей в основной части рабочего диапазона волновода. При этом в связи с наличием импеданса на поверхности диафрагмы коэффициент проходящей за диафрагму мощности $|\Gamma_{12}|^2$ при $\xi = 120$ Ом уменьшается практически во всем частотном диапазоне, но не более чем на 10%. В коротковолновой части диапазона влияние импеданса сказывается сильнее, так как для коротких волн эффективная поверхность диафрагмы увеличивается. Что касается резонансной длины щели, то при наличии активного импеданса замечено, что в средней части рабочего диапазона ($\lambda = 32$ мм) она практически не изменяется по сравнению со случаем идеально проводящей диафрагмы. Таким образом, вариации величины активного импеданса (в относительно малых пределах, что наиболее предпочтительно для практической реализации возможностей внешнего управления) не приводят к эффективному воздействию импедансного покрытия на характеристики диафрагмы.

Влияние комплексного импеданса на характеристики диафрагмы при изменении его мнимой части можно проанализировать на основании результатов, приведенных на рис. 3 и 4, где кривыми 1 показаны зависимости от длины волны коэффициента проходящей мощности

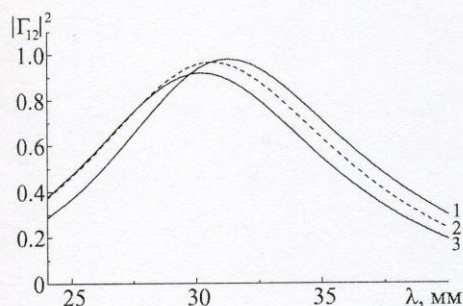


Рис. 3. Зависимость коэффициента проходящей мощности от длины волны при различных значениях комплексного импеданса индуктивного типа:
1 – $\xi = 60$ Ом; 2 – $\xi = (60 + 60i)$ Ом; 3 – $(60 + 120i)$ Ом

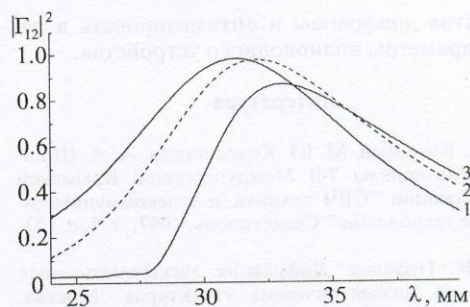


Рис. 4. Зависимость коэффициента проходящей мощности от длины волны при различных значениях комплексного импеданса емкостного типа:

1 – $\xi = 60$ Ом; 2 – $\xi = (60 - 60i)$ Ом;

3 – $(60 - 120i)$ Ом

для $\xi = 60$ Ом (мнимая часть импеданса равна нулю). На рис. 3 представлены зависимости $|\Gamma_{12}|^2$ от частоты для различных значений импеданса индуктивного типа (кривая 2 соответствует случаю $\xi = (60 + 60i)$ Ом, где i – мнимая единица; кривая 3 – $\xi = (60 + 120i)$ Ом), а на рис. 4 – для импеданса емкостного типа (кривая 2 соответствует случаю $\xi = (60 - 60i)$ Ом, кривая 3 – $\xi = (60 - 120i)$ Ом). Как видно, наличие реактивности в импедансе изменяет резонансную длину волны диафрагмы. Причем импеданс индуктивного типа ее уменьшает, а емкостного – увеличивает. В рассмотренных случаях значения мнимой части импеданса варьируются в пределах $-120 \div 120$ Ом, резонансная длина волны изменяется на $\pm 10\%$ по отношению к $2L$. При этом на резонансной частоте $|\Gamma_{12}|^2$ уменьшается на 10%.

Выводы

На основании математического моделирования импедансной щелевой диафрагмы в прямоугольном волноводе показана возможность управления характеристиками диафрагмы путем изменения значений комплексного импеданса на ее поверхности.

Использование функции Грина для волновода с импедансной торцевой поверхностью и метода Галеркина позволило численно исследовать характеристики диафрагм конечной толщины в прямоугольном волноводе. На основании этих исследований, на этапе проектирования устройств, в которых используются импедансные диафрагмы в волноводе, можно определить необходимые пределы изменения значений комплексного импеданса пленочного

покрытия диафрагмы и оптимизировать в целом параметры волноводного устройства.

Литература

1. А. А. Китайцев, М. Ю. Колединцева, А. А. Шишков. Материалы 7-й Международной Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии." Севастополь, 1997, т. 1, с. 127-128.
2. Е. И. Нефедов. Дифракция электромагнитных волн на диэлектрических структурах. Москва, Наука, 1979, 312 с.
3. В. А. Неганов, Е. И. Нефедов, Г. П. Яровой. Современные методы проектирования линий передачи и резонаторов сверх- и крайневых частот. Москва, Педагогика-Пресс, 1998, 328 с.
4. Я. Н. Фельд, Л. С. Бененсон. Антенно-фидерные устройства. Ч. 2. Изд. им. Н. Е. Жуковского, 1959, 551 с.
5. Л. П. Яцук, А. В. Жиронкина, В. А. Катрич. Радиотехника. 1996, №7, Вып. 14, с. 56-63.
6. А. В. Жиронкина, Л. П. Яцук, В. А. Катрич. Радиотехника. 1993, №1, с. 56-63.

7. Ю. М. Пенкин. Радиопизика и электроника. Сб. Вестн. Харьковского ун-та. 1998, №405, с. 42-47.
8. Л. П. Яцук, В. В. Бодров, И. В. Горбач. Изв. вузов. Радиопизика. 1989, 32, №5, с. 602-612.
9. Н. Н. Горобец, А. В. Жиронкина, А. Г. Здоров, Л. П. Яцук. В сб. Антенны, Москва, 1979, вып. 27, с. 159-166.

Scattering of H_{10} - mode from an Impedance Slot Diaphragm in a Rectangular Waveguide

**Yu. M. Penkin, A. V. Zhironkina,
S. A. Martynenko, L. P. Yatsuk**

Numerical analysis of the H_{10} -mode scattering characteristics is performed using the Galyorkin's method for impedance slot diaphragm of finite thickness in a rectangular waveguide. The possibility of these characteristics to be controlled is shown by means of complex impedance variation of the diaphragm surface film covering.



Fig. 2. Scattering characteristics of the H_{10} mode from an impedance slot diaphragm of finite thickness in a rectangular waveguide. The curves correspond to different values of the complex impedance of the diaphragm surface film covering.