

УДК 621.372.825.

А. Г. ШЕИН, канд. физ-мат. наук,
Г. Я. КРАСОВСКИЙ

ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА И АМПЛИТУДНЫЙ СПЕКТР НЕКОТОРЫХ МОДИФИКАЦИЙ ГРЕБЕНЧАТЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

В различных электронных приборах часто используются замедляющие системы типа «гребенка над плоскостью» и «сдвоенная гребенка», расчету электродинамических характеристик которых при распространении LE -волн посвящена обширная литература [1—3].

Существует возможность улучшения некоторых характеристик систем такого типа путем усложнения геометрии структуры. В настоящей работе рассмотрены некоторые модификации систем, обладающих рядом интересных для приложений свойств.

Метод расчета

В связи со сложностью геометрии рассматриваемых ниже систем все расчеты целесообразно производить структурным методом, развитым в работах [4, 5] применительно к задачам о периодическом волноводе. Согласно этому методу, расчет замедляющих систем сводится к минимизации функционала

$$J(u) = \int_D |\nabla u|^2 d\tau - k_0^2 \int_D u^2 d\tau \quad (1)$$

в некотором функциональном пространстве, элементы которого удовлетворяют всем граничным условиям соответствующей краевой задачи. Здесь D — область одной ячейки замедляющей системы; $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Минимальные значения функционала (1) находятся методом Ритца. В качестве координатных функций при этом используются элементы из функциональных последовательностей

$$\{p_i - \omega(\nabla \omega \nabla p_i)\}_{i=0}^{\infty}; \quad (2)$$

$$\{\omega^2 p_i\}_{i=0}^{\infty}. \quad (3)$$

где p_i — система алгебраических или тригонометрических полиномов, удовлетворяющих условиям теоремы Флоке;

$\omega(p)$ — функция класса $C^2(D)$ со свойствами

$$а) \omega(p) > 0 \forall p \in D; б) \omega(p) = 0 \forall p \in S_{\text{мет}};$$

$$в) \frac{\partial \omega}{\partial n} = 1 \forall p \in S_{\text{мет}}; г) \omega(p) = \omega(p + L); \quad (4)$$

$S_{\text{мет}}$ — граница области D , на которой выполняются однородные краевые условия второго рода;

L — период замедляющей системы.

Алгоритмы построения $\omega(p)$ со свойствами (4) основаны на использовании аппарата R -функций и для широкого класса областей, представляющих практический интерес, описаны в работах [4, 7].

Во всех рассмотренных ниже случаях в схеме метода Ритца учитывается 18 координатных функций из функциональной последовательности (2). Как показал опыт, погрешности расчета дисперсионных характеристик в этом случае не превышают 2—3%. Элементы матриц Ритца вычисляются по формуле прямоугольников с шагом 0,05. Амплитуды пространственных гармоник с номером s определяются из соотношения

$$a_s(x_0, y) = \frac{1}{L} \int_0^L U_n(x_0, y, z) e^{i \left(\frac{\varphi_0 + 2\pi s}{L} \right) z} dz, \quad (5)$$

в котором $U_n(x_0, y, z)$ являются приближенным представлением соответствующей координатной составляющей LE -волны в плоскости x_0, y, z ; φ_0 — фазовый сдвиг поля на период системы. Точность вычисления интегралов (5) равна $O\{0,025\}^2$.

Анализ системы типа «гребенка со вставками»

Рассмотрим конструкцию замедляющей системы типа «гребенка со вставками» шириной b вдоль оси Oy (рис. 1). Это двух-

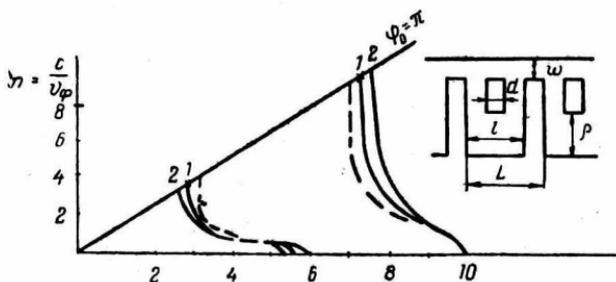


Рис. 1.

ступенчатая по пространству взаимодействия система со связью между резонаторами, образующими одну ячейку. Характер и величина этой связи определяется высотой ρ щелей связи, имеющих такие же поперечные размеры вдоль оси Oy , как и вся структура. Исследуем ее влияние на характеристики замедляющей системы.

На рис. 1 сплошными линиями приведены дисперсионные характеристики гребенки со вставками в первой и во второй полосах пропускания при разной высоте щелей связи. В качестве примера выбрана система с характеристическими размерами $h=2,5$; $L=0,4$; $W=0,4$; $l=0,2$; $d=0,1$; $b=5$. Кривые 1 соответствуют случаю $\rho=0,9$; кривые 2 — случаю $\rho=1,25$. Для сравнения штрихами нанесены дисперсионные кривые обычной гребенчатой системы без вставок.

Приведенные данные являются иллюстрацией того, что при увеличении высоты щелей связи в интервале $0 \ll \rho \leq h/2$ ширина первой полосы пропускания уменьшается, а второй — возрастает. При $\rho=h/2$ характер связи для LE_0 - и LE_1 -типов волн меняется. Дальнейшее увеличение высоты щелей связи приводит к возрастанию емкостной связи для LE_0 волны и индуктивной связи для LE_1 волны. Коротковолновая и длинноволновая отсечки этих типов волн при $\rho \rightarrow h$ стремятся к соответствующим отсечкам одноступенчатой гребенки.

Известно [1], что в двухступенчатых по пространству взаимодействия резонаторных замедляющих системах увеличиваются амплитуды высших пространственных гармоник. На рис. 2 приведены результаты расчета амплитуд 0-й и -1-й простран-

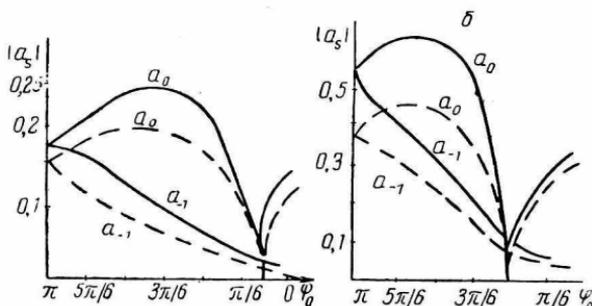


Рис. 2.

ственных гармоник E_z -координатных составляющих LE_1 и LE_0 типов волн гребенки (штриховые линии) и гребенки со вставками (сплошные линии). Амплитуды остальных пространственных гармоник значительно меньше амплитуды нулевой: они на графиках не предстали. При увеличении высоты щелей связи амплитуды пространственных гармоник гребенки со вставками уменьшаются и при $\rho=h$ совпадают с амплитудами обычной системы.

Анализ замедляющих систем типа гребенка — щель — гребенка

В многолучевых ЛБВ могут применяться различные модификации замедляющих систем типа гребенка — щель — гре-

бенка (рис. 3). В этой связи существует практическая потребность в результатах геометрического расчета различных их электродинамических характеристик. В работе [6] были исследованы дисперсионные свойства системы гребенка—щель—гребенка для случая, когда оси симметрии пластин обоих гребенок и проводников многопроводной линии совпадают (рис. 3, а). При этом предполагалось, что толщина всех пластин значительно меньше периода L . В таком приближении, однако, затруднительно судить о свойствах реальных конструкций. Не делая никаких предположений о соотношениях характеристических размеров рассматриваемых систем, исследуем их свойства структурным методом.

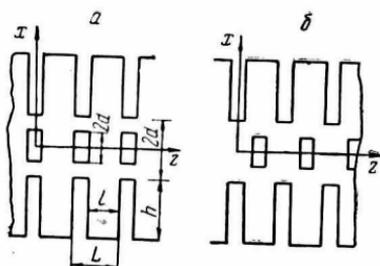


Рис. 3.

На рис. 4 приведены дисперсионные характеристики в трех наиболее длинноволновых полосах пропускания для структур, представленных на рис. 3, а (сплошные линии) и на рис. 3, б (штриховые линии). Для иллюстрации дисперсионных свойств

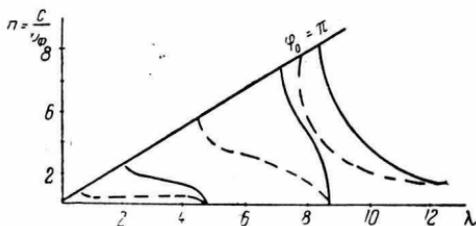


Рис. 4.

были выбраны бесконечно широкие по оси Oy системы с размерами: $h=2$; $l=0,2$; $L=0,4$; $d=0,2$; $a=0,3$.

Отметим, что структурный метод позволяет автоматически выделить области распространения синфазных и противофазных волн без применения

каких-либо специальных приемов. Это позволяет утверждать, что наиболее длинноволновая полоса пропускания соответствует противофазным волнам (наличие электрической стенки в плоскости симметрии $x=0$), а вторая полоса — синфазным волнам (в плоскости $x=0$ расположена магнитная стенка). Снятие вырождения для этих типов волн объясняется наличием возмущающего действия многопроводной линии. Отметим, что в сдвоенной гребенке при любом сдвиге ламелей вырождение при $\varphi_0 = \pi$ не снимается [2].

Сравнение приведенных данных показывает, что в замедляющих системах типа гребенка — щель — гребенка сдвиг многопроводной линии на расстояние $\rho \leq L/2$ приводит к расширению полос пропускания. В наибольшей степени этот эффект проявляется во второй полосе пропускания, т. е. для синфазных волн.

Амплитуды пространственных гармоник также зависят от положения многопроводной линии в пространстве взаимодействия двойной гребенки.

Для выяснения этой зависимости в сечениях, отстоящих на расстоянии $\delta=0,0125$ от пластин гребенок и многопроводной линии, был произведен расчет амплитуд пространственных гармоник для систем, представленных на рис. 3. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при сдвиге многопроводной линии на $L/2$ в основной полосе пропускания возрастают амплитуды 0-й и 1-й пространственных гармоник. Подобный эффект отмечался в сдвинутых на $L/2$ двойных гребенках [3].

ВЫВОДЫ

1. С помощью современных средств вычислительной техники, используя структурный метод, можно производить с достаточной для инженерной практики точностью расчеты сложных конструкций замедляющих систем.

2. Указанные в настоящей работе свойства замедляющей системы типа гребенка со вставками позволяют рекомендовать к использованию ее при конструировании электронных приборов, работающих во второй полосе пропускания на 1-й пространственной гармонике. Эта конструкция может быть использована также в приборах с электростатической фокусировкой.

3. Замедляющая система типа гребенка — щель — гребенка со сдвинутой на $L/2$ многопроводной линией обладает широкополосными характеристиками и может применяться в многолучевых ЛБВ, а также в мощных ЛОВ 0-типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Силин Р. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы. М., «Сов. радио», 1966. 632 с.
2. Альтшулер Ю. Г., Татаренко А. С. Лампы малой мощности с обратной волной. М., «Сов. радио», 1963, 296 с.
3. Стельмах М. Ф. К теории сдвоенного блока щелевых резонаторов. — «Радиотехника», 1958, № 8, с. 30—36.
4. Красовский Г. Я., Стрельченко А. И. Метод R -функций в скалярной задаче о периодическом волноводе. — «Электронная техника». Сер. 1. «Электроника СВЧ», 1972, вып. 10, с. 112—114.
5. Шеин А. Г., Красовский Г. Я. Применение метода Ритца в задачах об амплитудном спектре пространственных гармоник в замедляющих системах. — Сб. «Радиотехника», вып. 26. Харьков, 1972, с. 51—55.
6. Коновалов В. Е., Шульга В. Г. Дисперсионные свойства замедляющей системы гребенка — щель — гребенка. — Сб. «Радиотехника». Вып. 7. Харьков, 1968, с. 148—154.
7. Рвачев В. Л. Геометрические приложения алгебры логики. К., «Техніка», 1967, 212 с.