

РАСЧЕТ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРНЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2015 г. Н.П. КРАВЧЕНКО, С.В. МУХИН, С.А. ПРЕСНЯКОВ

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва
e-mail: natkrav@inbox.ru, mukhin_sergey@yahoo.com, pressnyak@gmail.com

Аннотация

При разработке усилителей сверхвысоких частот (СВЧ) большой и средней мощности, широко используемых в радиоэлектронном приборостроении, применяются цельнометаллические резонаторные замедляющие системы (ЗС), обеспечивающие необходимый теплоотвод. Эти ЗС являются трехмерными, а моделирование приборов, создаваемых на их основе с использованием строгих электродинамических программ, требует больших затрат вычислительных ресурсов. Поэтому разработка простых и точных моделей резонаторных ЗС, используемых при моделировании приборов, является актуальной задачей.

Цельнометаллические резонаторные замедляющие системы представляют собой линии передачи, образованные соединением в цепочку ячеек с идентичной структурой. СВЧ энергия передается по ЗС по двум каналам, один из которых образуется щелями связи и резонаторами, второй – пролетным каналом. Для исследования влияния второго фактора на дисперсионные характеристики замедляющих систем использовался вариант программы, в котором матрица передачи имеет размерность 4×4 .

При небольших радиусах пролетного канала решения для прямой и обратной волн практически совпадают с решениями, полученными для модели без учета пролетного канала. С увеличением радиуса пролетного канала дисперсионная характеристика немного смещается в область высоких частот, а характеристическое сопротивление снижается. С ростом радиуса пролетного канала уменьшается реактивное затухание. В результате происходит трансформация полного характеристического сопротивления. В полосах пропускания оно остается комплексным, исчезают особенности на границах полос пропускания.

Основная часть

Цельнометаллические резонаторные ЗС по сути являются линиями передачи, образованными путем объединения одинаковых ячеек в единую цепь. Связи между ячейками осуществляются при помощи волноведущих каналов, которые условно делятся на входные S_{α}^1 , $\alpha = 1, 2, \dots, k$ и выходные S_{α}^2 , $\alpha = 1, 2, \dots, l$. В связи с периодическим характером замедляющих систем расстояние между входным S_{α}^1 и выходным S_{α}^2 сечениями всегда одинаково и равняется периоду замедляющей системы D , а количество входных волноведущих каналов и сечений равняется количеству выходных каналов и сечений ($k = l = N$).

Компоненты электромагнитных полей на границах ячейки ЗС $S_{\alpha}^{1,2}$ связаны выражением:

$$\begin{pmatrix} \vec{a}_1 \\ \vec{b}_1 \end{pmatrix} = \mathbf{A}^N \begin{pmatrix} \vec{a}_2 \\ \vec{b}_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\overline{a_{1(2)}}$, $\overline{b_{1(2)}}$ – векторы, представляющие собой набор комплексных амплитуд в сечениях $S_\alpha^{1,2}$,

A_N – матричный линейный оператор вида:

$$A^N = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{12N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{22N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{2N1} & A_{2N2} & \dots & A_{2N2N} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

При помощи линейного оператора A_N из выражения (1) можно получить различные режимы работы рассматриваемой ЗС [1]. В случае, если имеются все значения элементов A_N , ЗС считается полностью формализованной, а значит, все её электродинамические характеристики могут быть найдены [2][3].

Тангенциальные составляющие полей в $S_\alpha^{1,2}$ задают поля нормальных волн во всей ячейке, и в S_α^1 и S_α^2 подчиняются условиям Флоке [4]:

$$\begin{aligned} \vec{E}_\alpha^{\tau N}(x,y,z) &= \vec{E}_\alpha^{\tau N}(x,y,z+D)e^{ih_n D}, \\ \vec{H}_\alpha^{\tau N}(x,y,z) &= \vec{H}_\alpha^{\tau N}(x,y,z+D)e^{ih_n D}, \end{aligned} \quad (3)$$

где h_n – постоянная распространения n -ой нормальной волны в ячейке с периодом D .

Принимая во внимание выражение (1), перепишем (3):

$$\begin{pmatrix} \vec{a}_2 \\ \dots \\ \vec{b}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{a}_1 \\ \dots \\ \vec{b}_1 \end{pmatrix} * e^{-ih_n D}. \quad (4)$$

Убирая из (1) векторы \vec{a}_2 , \vec{b}_2 , преобразуем его к виду:

$$A^N \begin{pmatrix} \vec{a}_1 \\ \dots \\ \vec{b}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{a}_1 \\ \dots \\ \vec{b}_1 \end{pmatrix} * e^{-ih_n D}. \quad (5)$$

Полученное уравнение (5) есть не что иное, как алгебраической формулировка задачи о собственных волнах исследуемой ЗС, причем её ячейка представлена в виде $2N$ -полюсника, параметры которого вычисляются при помощи оператора A_N .

Существование нетривиального решения для данной системы (5) связано с условием [3]:

$$\det(A^N - \lambda^N E) = 0, \quad (6)$$

в которой λ^N – собственные числа матрицы передачи A_N , позволяющие находить значения постоянных распространения h_n $2N$ -полюсника; E - единичная матрица. Согласно [4], выражение (6) является дисперсионным уравнением нормальных волн $2N$ -полюсника. Дисперсионное уравнение вида $\varphi=f(\omega)$ выводится из (6), при этом элементы матричного оператора A_N являются функциями циклической частоты ω .

Решениями, получаемыми при нахождении дисперсионных характеристик замедляющих систем, являются четыре моды, две из которых описывают прямую и обратную волны, а оставшиеся две – резонансные моды.

Путем 3D-моделирования можно получить элементы матрицы передачи. Применяем компьютерное моделирование с помощью программного пакета HFSS. Полученные на выходе расчета программы S-, Y- или Z-матрицы переводим в A-матрицу, которую и будем использовать при вычислении электродинамических характеристик.

Чтобы рассмотреть, каково влияние пролетного канала на получаемые дисперсионные характеристики ЗС, применялся способ расчета, при котором матрица передачи имеет размерность 4×4 . При этом использовались 3D-модели ячеек аксиально-симметричных ЗС, разрезанных в области щелей связи (рис. 1).

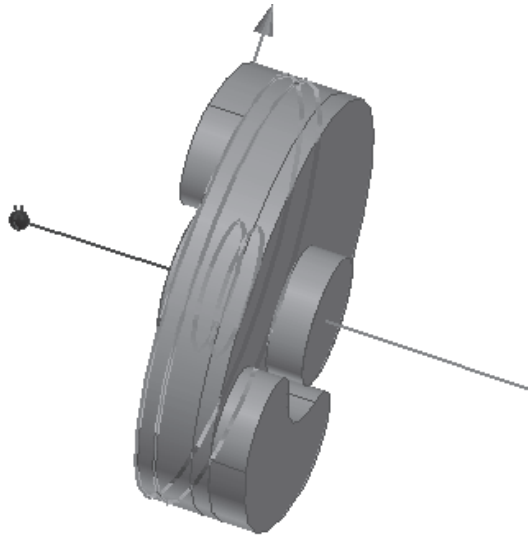


Рис. 1. Модель ячейки аксиально-симметричной ЗС.

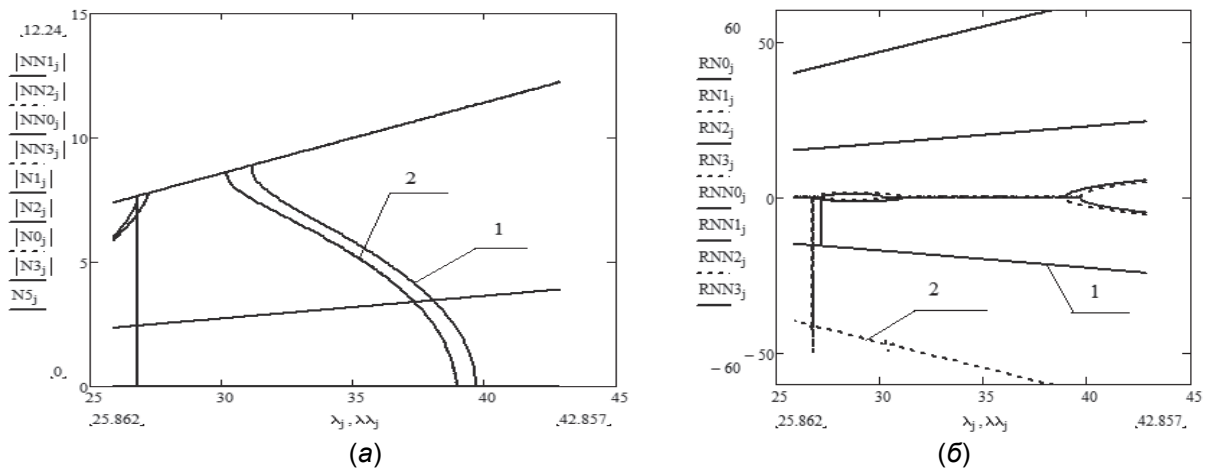


Рис. 2. Дисперсия (а) и реактивное затухание (б) для аксиально-симметричных ЗС с радиусом пролетного канала 0.75 мм - (1) и 2 мм - (2), разрезанных по щелям связи.

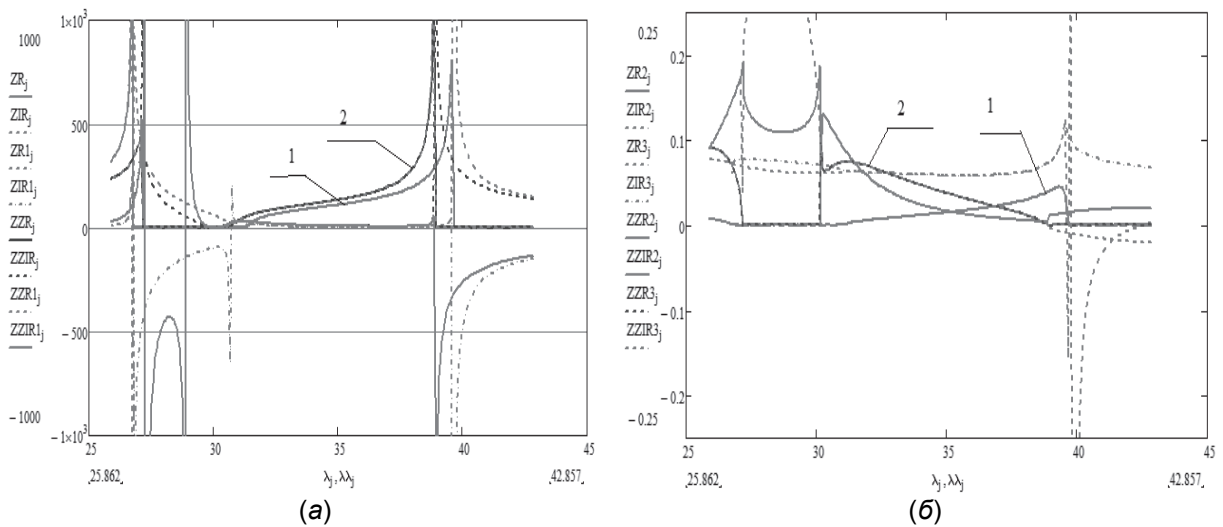


Рис. 3. Характеристические сопротивления прямой и обратной волн, возбуждаемых через 1 порт (а) и через пролетный канал 2 (б) аксиально-симметричной ЗС, с пролетным каналом 0.75 мм - (1) и 2 мм - (2).

В случае, когда радиус пролетного канала мал, его наличие слабо влияет на конечный результат расчета. Но чем больше радиус пролетного канала, тем заметнее дисперсионная кривая смещается в ВЧ-область, а значение характеристического сопротивления снижается.

Резонансные моды ЗС можно охарактеризовать с помощью волновых чисел, причем реактивное затухание получаем при помощи действительной части волнового числа (рис. 2, б).

Заключение

С повышением значения радиуса пролетного канала падает реактивное затухание (рис. 2, б), трансформируется полный характеристический импеданс. В границах полос пропускания импеданс имеет комплексный характер, при этом пропадают особенности у границ этих полос (рис. 3).

В результате исследования выяснилось, что при учете в расчетах величины радиуса пролетного канала могут существенно измениться дисперсионные характеристики резонаторной замедляющей системы даже при малых его значениях, что было показано на примере аксиально-симметричной замедляющей системы. Комплексный характер характеристического импеданса, а также отсутствие особенностей у границ полос пропускания дает нам возможность рассматривать процессы усиления в ЛБВ в виде одновременного влияния двух механизмов взаимодействия: клистронного и типа ЛБВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Никольский В.В.* Вариационные методы для задач дифракции (обзор). // Изв. вузов СССР, Радиофизика – 1977, т. 20, № I, с. 5-16.
2. *Никольский, В.В., Никольская, Т.И.* Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. // Наука, Москва (1983) – М.: 1983.
3. *Краснушкин П.Е.* Нормальные волны в цепочке многополюсных фильтров. // Журнал технической физики – 1947, т. 17, №6, с. 705-712.
4. *Mukhin S.V.* Analysis of the Dispersion Characteristics in the Vicinity of the Passband Boundaries of the Slow-Wave Structures That Represent Chained Cavities // Journal of Communications, Technology and Electronics – 2012, Vol. 57, No. 12, pp. 1276–1286.