НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ

II Всероссийская объединённая научная конференция "Проблемы СВЧ-Электроники" МИЭМ НИУ ВШЭ – "Инновационные решения" Keysight Technologies

СБОРНИК ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИИ

ISBN: 978-5-903650-31-6

Москва, 2015 г.

ВЛИЯНИЕ ПРОЛЕТНОГО КАНАЛА НА ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ РЕЗОНАТОРНЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Кравченко Н.П., Мухин С.В.. Пресняков С.А.
МИЭМ НИИ ВШЭ

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

Цельнометаллические резонаторные замедляющие системы представляют собой линии передачи, образованные соединением в цепочку ячеек с идентичной структурой.

Для исследования влияния пролетного канала на дисперсионные характеристики замедляющих систем использовался вариант программы, в котором матрица передачи имеет размерность 4х4.

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 и характеристическое сопротивление уменьшается.

При увеличении радиуса пролетного канала уменьшается реактивное затухание. Происходит трансформация полного характеристического сопротивления. В полосах пропускания оно остается комплексным, исчезают особенности на границах полос пропускания

При разработке СВЧ усилителей большой и средней мощности широко используются цельнометаллические резонаторные замедляющие системы, обеспечивающие необходимый теплоотвод. Эти замедляющие системы являются трехмерными и моделирование приборов создаваемых на их основе с использованием строгих электродинамических программ требует больших затрат вычислительных ресурсов.

Цельнометаллические резонаторные замедляющие системы представляют собой линии передачи, образованные соединением в цепочку ячеек с идентичной структурой. Ячейки соединяются друг с другом волноведущими каналами, которые можно разделить на входные в сечении S_α^1, α=1,2,....k и выходные в сечении S_α^2, α=1,2,...l. Поскольку ЗС периодичны, расстояние между входным S_α^1 и выходным S_α^2 сечениями ячейки равно периоду ЗС D, число входных каналов всегда равно числу выходных каналов (k=l=N).

Связь между компонентами полей на обеих границах $S_\alpha^{1,2}$ задаётся в виде

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

где $\vec{a}_{1(2)}, \vec{b}_{1(2)}$ – векторы, составленные из комплексных амплитуд в сечениях $S_\alpha^{1,2}$.
A^N – матричный линейный оператор, вида

$$A^N = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{12N} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{22N} \\ . & . & \cdots & . \\ A_{2N1} & A_{2N2} & \cdots & A_{2n2n} \end{pmatrix}. \qquad (2)$$

Матричный оператор A^N из (1) определяет все возможные режимы работы исследуемой замедляющей системы [1]. Если элементы матричного оператора A^N известны, замедляющая система полностью формализована, и можно определить все ее электродинамические характеристики [2] [3].

Тангенциальные составляющие поля в сечениях $S_\alpha^{1(2)}$, полностью определяют поле нормальной волны во всем объеме ячейки. В сечениях S_α^1 и S_α^2 они связаны условиями Флоке [4]:

$$\vec{E}_\alpha^{\tau N}(x,y,z)=\vec{E}_\alpha^{\tau N}(x,y,z+D)e^{ih_nD},$$

$$\vec{\mathrm{H}}_{\alpha}^{\tau N}(x,y,z)=\vec{\mathrm{H}}_{\alpha}^{\tau N}(x,y,z+D)e^{ih_n D}, \qquad (3)$$

где h_n – постоянная распространения n-ой нормальной волны в ячейке с периодом D. Условие (3) с учетом (1) записывается относительно векторов комплексных амплитуд как

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

Из (1) с учетом (4) исключив $\vec{a}_2$ и $\vec{b}_2$, получим

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

Выражение (5) является алгебраической формулировкой задачи о собственных волнах исследуемой замедляющей системы при представлении ее ячейки 2N-полюсником, который описывается линейным матричным оператором A^N.

Нетривиальное решение системы уравнений (5) существует, если выполняется условие [3]

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

где $\lambda^N = \exp(-ih_n D)$ - собственные числа матрицы передачи A^N, дающие возможность определять постоянные распространения h_n 2N-полюсника, моделирующего ячейку ЗС; Е – единичная матрица. Согласно [4] , выражение (6) является дисперсионным уравнением нормальных волн 2N-полюсника. Дисперсионное уравнение вида $\varphi=f(\omega)$ получается из (6), поскольку элементы матричного оператора A^N зависят от частоты ω.

В результате расчета дисперсионных характеристик ЗС получаются четыре решения (моды). Первая пара решений соответствует прямой и обратной волнам, распространяющимся по замедляющей системе, вторая резонансным модам.

Элементы матрицы передачи можно определить по результатам трехмерного моделирования ЗС, например, с помощью программы HFSS. Результат расчета приставляет

собой S-матрицу или эквивалентные ей Y и Z-матрицы. С помощью формул перехода можно преобразовать Z-матрицу в A-матрицу и рассчитать электродинамические характеристики.

Для исследования влияния пролетного канала на дисперсионные характеристики замедляющих систем использовался вариант программы, в котором матрица передачи имеет

размерность 4x4. Использовались трехмерные модели ячеек замедляющих систем, разрезанных по щелям связи (рис. 1)

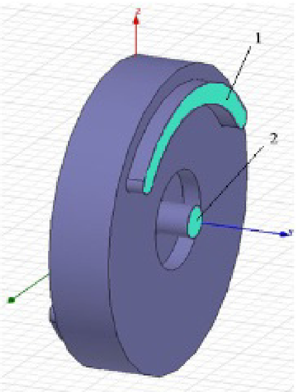
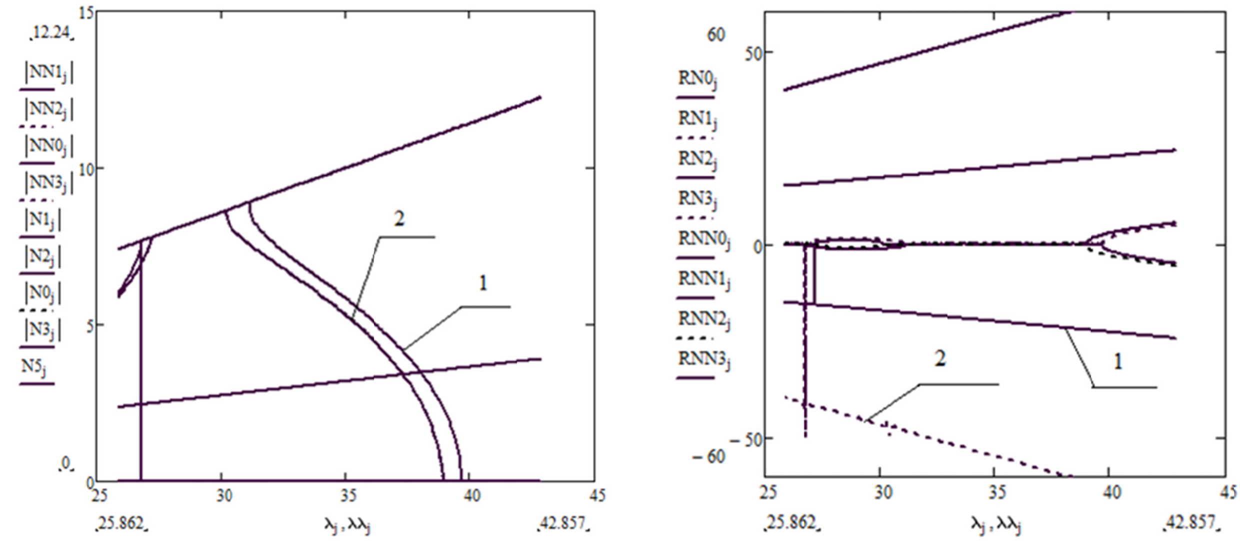


Рис. 1. *Модель ячейки аксиально-симметрчной ЗС, разрезанной по щелям связи. Цифрами обозначены входные порты ячейки*

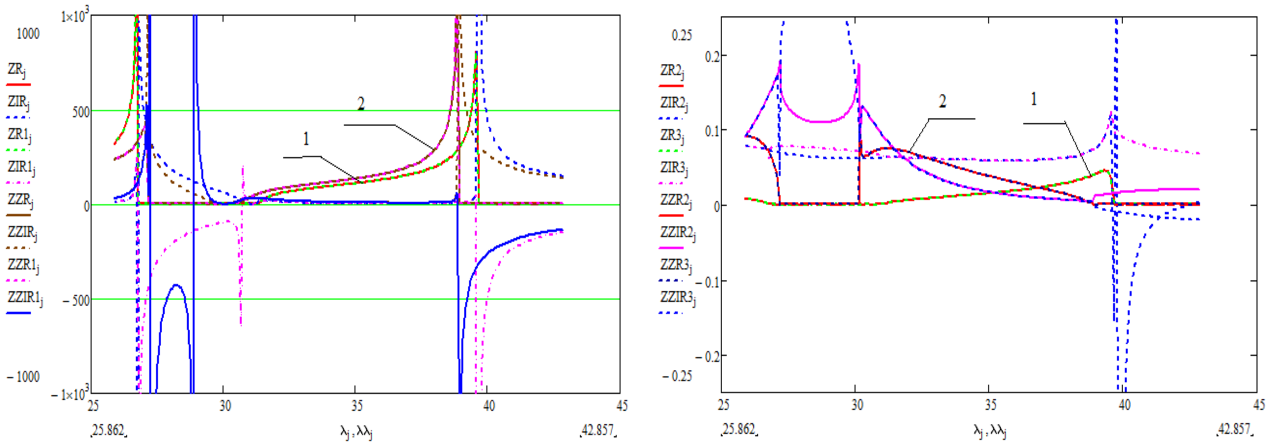
При небольших радиусах пролетного канала, решения для прямой и обратной волн практически совпадают с решениями, полученными для модели без учета пролетного канала. С увеличением радиуса пролетного канала дисперсионная характеристика немного смещается в область высоких частот и характеристическое сопротивление уменьшается.

Резонансные моды характеризуются комплексными волновыми числами. Набег фазы на ячейку составляет либо 0, либо $\pm\pi$. Фаза может меняться скачком на $\pm\pi$. Действительная часть волнового числа определяет реактивное затухание (рис. 2б).



а) б)

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



а) б)

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 0.75мм – (1) и 2 мм – (2)*

При увеличении радиуса пролетного канала уменьшается реактивное затухание (рис. 2б). Происходит трансформация полного характеристического сопротивления. В полосах пропускания оно остается комплексным, исчезают особенности на границах полос пропускания (рис. 3).

Полученные результаты показывают, что учет пролетного канала существенно изменяет дисперсионные характеристики резонаторной ЗС даже при небольших радиусах пролетного канала. Комплексность характеристического сопротивления и отсутствие особенностей на границах полос пропускания позволяет по новому рассмотреть процесс усиления на границе и за границей полосы пропускания.

Литература

1. *Никольский В.В., Никольская Т.И.* Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. М., Наука, 1983, с. 304.

2. *Никольский В.В*. Вариационные методы для задач дифракции // Известия Вузов. Радиофизика, 1977, т.20, №1, с.5.

3. *Краснушкин П.Е.* Парциальные волны в цепочке многополюсных фильтров // Журнал технической физики, 1947, т.17, №6, с.705.

4. *Мухин С.В*. Анализ дисперсионных характеристик замедляющих систем типа цепочек связанных резонаторов вблизи границ полосы пропускания. Радиотехника и электроника, 2012, том 57, №11. с. 1301.

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

КРАВЧЕНКО Н.П.[1], **МУХИН С.В.**[1]

[1] Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

Тип: статья в журнале - научная статья   Язык: русский

Том: 2   Номер: 1   Год: 2015   Страницы: 33-36

ЖУРНАЛ:

ПРОБЛЕМЫ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ
Издательство: Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" (Москва)

АННОТАЦИЯ:

Предметом рассмотрения данного доклада является разработка алгоритма и программы расчета дисперси- онных характеристик резонаторных замедляющих систем с использованием результатов их трехмерного мо- делирования в HFSS. Трехмерное моделирование замедляющих систем не позволяет вычислить их дисперсион- ные характеристики, оно лишь предоставляет некоторые исходные данные, которые требуют дальнейшее обработки, которую и осуществляет рассматриваемая программа. Для расчета необходимо получить данные трехмерного моделирования, а именно Z-матрицу полных сопротивлений. Затем с помощью матрицы перехо- да программа преобразует Z-матрицу в эквивалентную A-матрицу. Далее вычисляются собственные значенияA-матрицы которые представляют собой е

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Мухин С.В. Анализ дисперсионных характеристик замедляющих систем типа цепочек связанных резонаторов вблизи границ полосы пропускания//Радиотехника и электроника, 2012, том 57, №11. С. 1301

Контекст: *...Затем с помощью матрицы перехода программа преобразует Z-матрицу в эквивалентную A-матрицу [1].*