

С.В. Мухин, А. В. Панов

Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета
«Высшая школа экономики»,
e-mail: mukhin_sergey@yahoo.com.

**АНАЛИЗ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ТИПА ЦСР ВБЛИЗИ ГРАНИЦ
ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ**

S.V. Mukhin, A.V. Panov

Moscow Institute of Electronics and Mathematics National Research University «Higher School of Economics »

**THE ANALYSIS OF DISPERSION CHARACTERISTICS OF SLOW-WAVE
SYSTEMS OF CIS TYPE NEAR THE PASS-THROUGH BAND BORDER.**

The electrodynamicaly approved choice of resonator slow-wave system model which is equally suitable for describing the electrodynamic characteristics and excitation by given current was made. The possibility of calculation of electrodynamic characteristics of resonator slow-wave systems based on 3-d modeling results is shown. The results of the calculatuion of electrodynamic characteristics for slow-wave systems with two and four ports are given.

В последние годы наблюдается быстрое расширение области применения электромагнитных полей микроволнового диапазона, что стимулирует появление новых типов микроволновых устройств, развитие компьютерных методов их расчета и проектирования. В свою очередь, появление новых микроволновых генераторов, усилителей, преобразователей, разработка новых материалов, линий передачи, фильтров и других устройств позволяет продвигать микроволновые технологии в новые области науки и техники.

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.

Существуют различные методы расчета дисперсионных характеристик, однако полученные в данной работе модели в виде матриц передачи базируются на точном электродинамическом расчете и не

требуют настройки. Кроме того, полученные таким образом модели позволяют рассчитать локальный импеданс связи, используемый в разностной теории возбуждения.

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 , $\alpha=1,2,\dots,k$ и выходные в сечении S_α^2 , $\alpha=1,2,\dots,l$ (рис.1). 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 ($k=l=N$).

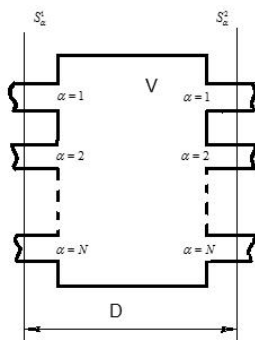


Рис.1

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

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

где $\vec{a}_{i(2)}$, $\vec{b}_{i(2)}$ - векторы, составленные из комплексных амплитуд в сечениях $S_\alpha^{1,2}$.

\mathbf{A}^N - матричный линейный оператор, вида

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

Матричный оператор \mathbf{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]:

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

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

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

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

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

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]

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

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; E - единичная матрица.

Согласно [3], 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 .

Элементы матрицы передачи можно определить по результатам трехмерного моделирования ЗС, например, с помощью программы

ISFIELD. Результат расчета представляет 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. 2) и по зазору взаимодействия (рис. 3).

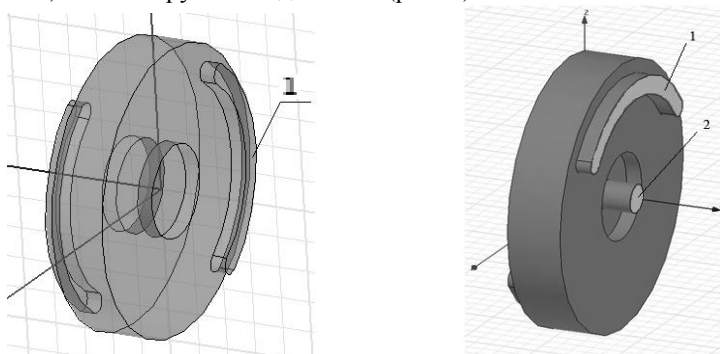


Рис. 2. Модели ячеек ЗС, разрезанные по щелям связи. Цифрами обозначены входные порты

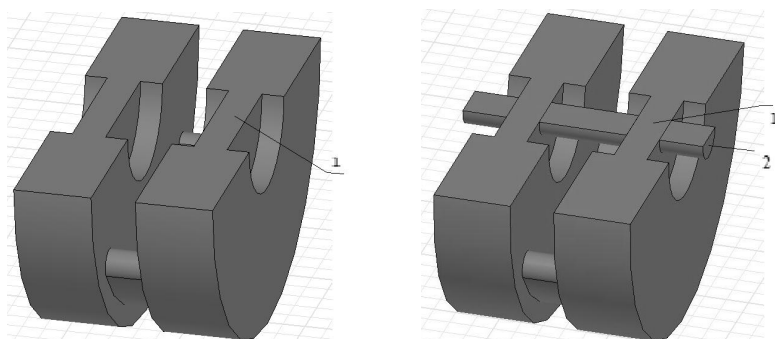


Рис. 3. Модели ячеек ЗС, разрезанные по зазору взаимодействия. Цифрами обозначены входные порты

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.

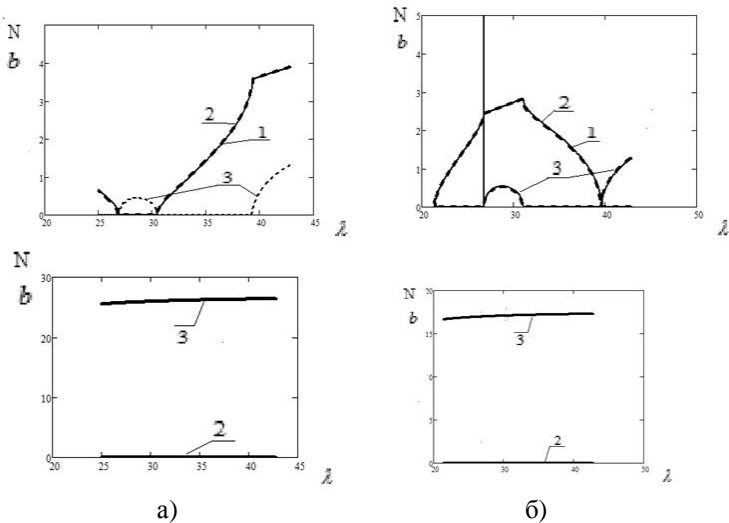


Рис. 4. Дисперсионные характеристики ячейки ЗС (N -замедление, b -реактивное затухание) с радиусом пролетного канала 0,75 мм, разрезанной по щелям связи (б) и по зазору взаимодействия (а)

При небольших радиусах пролетного канала, решения для прямой (2-рис.4) и обратной волн практически совпадают с решениями, полученными для модели без учета пролетного канала (1-рис.4). Резонансные моды характеризуются комплексными волновыми числами. Набег фазы на ячейку составляет либо 0, либо $\pm\pi$ (2-рис.4). Фаза может меняться скачком на $\pm\pi$. Действительная часть волнового числа определяет реактивное затухание (3-рис.4). С увеличением радиуса пролетного канала дисперсионная характеристика немного смещается в область высоких частот (рис.5).

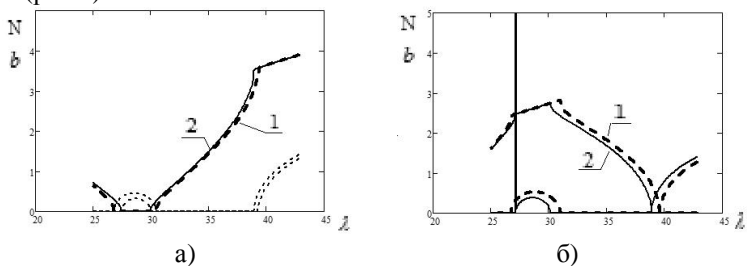


Рис. 5. Дисперсионные характеристики ячейки ЗС (N -замедление, b -реактивное затухание) с радиусом пролетного канала 0,75 мм (1) и 2 мм (2), разрезанной по щелям связи (б) и по зазору взаимодействия (а)

Каждому собственному числу (моду) соответствует собственный вектор матрицы A , определяющий напряжения и токи в сечении портов, через которые можно определить характеристические сопротивления для данной моды. На рис. 6 представлено характеристическое сопротивление прямой волны в зазоре взаимодействия, в ячейке ЗС, полученной сечением по зазорам взаимодействия.

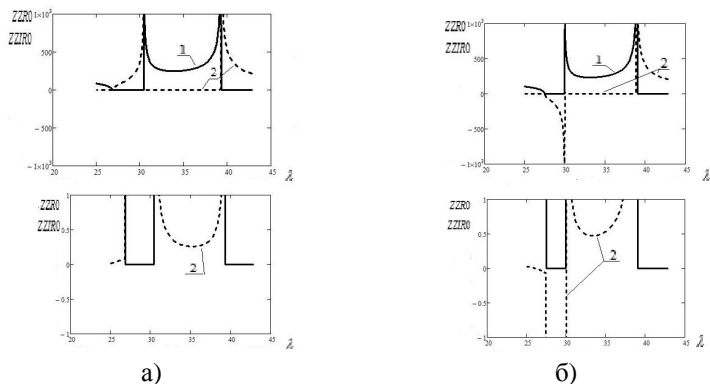


Рис. 6. $ZZR0$ -действительная (1), $ZZI0$ -мнимая (2) части характеристического сопротивления прямой волны в зазоре взаимодействия без учета пролетного канала (а) и при радиусе пролетного канала 2 мм (б)

Как видно из приведенных рисунков (рис.6), характеристическое сопротивление зазора взаимодействия в полосе пропускания комплексное с небольшой мнимой частью, за полосой чисто мнимое. На границах полосы пропускания сохраняются особенности. Мнимая часть растет при увеличении радиуса пролетного канала.

На рис. 7 представлены характеристические сопротивления резонансных мод первого порта для ячейки ЗС, разрезанной по щелям связи (а) и зазорам взаимодействия (б).

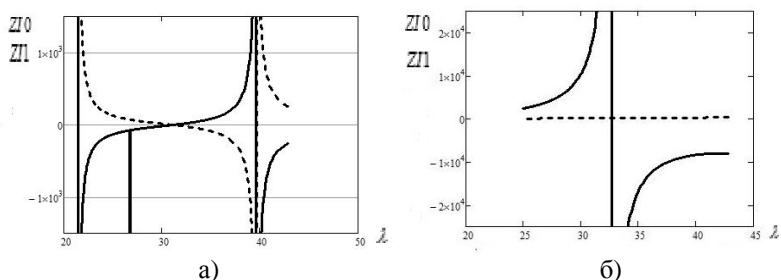


Рис. 7. Характеристические сопротивления резонансных мод первого порта

При возбуждении ячейки через щель связи и пролетный канал характеристическое сопротивление резонансных мод первого порта чисто мнимое и соответствует, в рассматриваемом диапазоне, трем резонансам (рис. 7,а). При выделении ячейки ЗС по зазорам взаимодействия резонансы разделяются, и в рассматриваемой области частот наблюдается только один резонанс (рис. 7,б).

Полное характеристическое сопротивление 1 порта определяется через сумму характеристических проводимостей резонансных мод и прямой или обратной волны.

При увеличении радиуса пролетного канала происходит трансформация полного характеристического сопротивления (рис. 8). В полосах пропускания оно остается комплексным и уменьшается, исчезают особенности на границах полос пропускания.

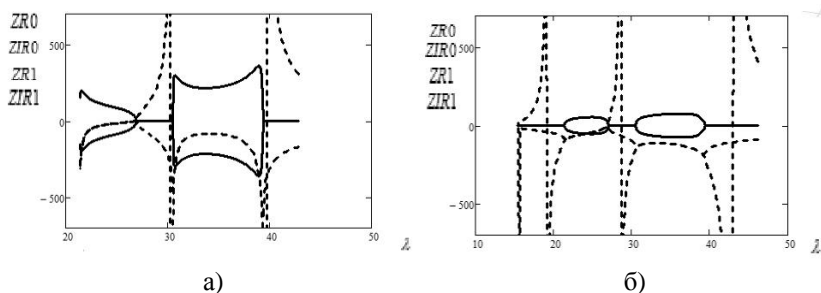


Рис. 8. Полное характеристическое сопротивление прямой и обратной волн 1 порта ячейки ЗС, выделенной по зазорам взаимодействия с радиусом пролетного канала 0,75 мм (а) и 1 мм (б)

Вне полос пропускания полное характеристическое сопротивление остается чисто мнимым, но ограниченным на границах полос пропускания. В полосах непропускания появляются дополнительные резонансы.

В работе было проведено исследование влияния угла раскрыва щели связи на дисперсионные характеристики.

При малых углах раскрыва щели связи больше проявляются резонансные свойства ЗС. С увеличением угла раскрыва щели происходит расширение полосы пропускания в область низких частот (рис. 9).

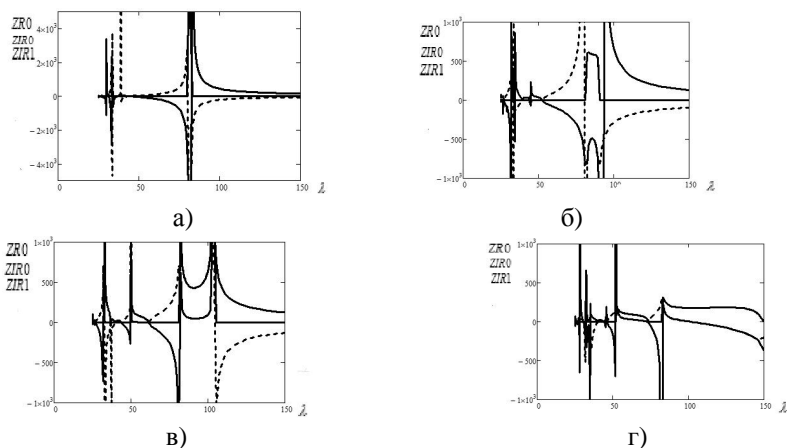


Рис. 9. Характеристическое сопротивление для ячейки ЗС, выделенной по зазорам взаимодействия с углом раскрыва щели связи 10° (а), 60° (б), 90° (в), 120° (г)

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 позволяют рассмотреть процесс усиления в ЛБВ как результат двух механизмов взаимодействия клистронного и ЛБВ-линейного.

Библиографический список

1. Никольский В.В. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. М.: Наука, 1983. 304 с.
2. Никольский В.В. Вариационные методы для задач дифракции / В.В. Никольский // Известия вузов. Радиофизика. 1977. Т.20. №1. С.5.
3. Краснушкин П.Е. Нормальные волны в цепочке многополюсных фильтров / П.Е. Краснушкин // Журнал технической физики. 1947. Т.17. №6. С. 705.
4. Wathins D.A. Topics in Electromagnetic Theory / D.A. Wathins. Wiley. USA. 1958. 62 p.