

УДК 538.311.001.24, 621.372.825.4, 621.385.6

Анализ электродинамических характеристик много- лучевой замедляющей структуры типа «клеверный лист»

Дано описание конструкции многолучевой замедляющей структуры типа «клеверный лист». Анализируются ее электродинамические характеристики, полученные в результате численного моделирования.

М. В. Кузьмичев, В. Б. Профе,
К. В. Троцюк

Введение

В настоящее время актуальна задача улучшения массогабаритных характеристик бортовых СВЧ приборов в совокупности с источниками питания. Одним из путей ее решения является понижение ускоряющего напряжения прибора, в результате чего достигается заметное снижение массы и размеров источников питания. Однако снижение ускоряющего напряжения при сохраняющихся требованиях к мощности прибора приводит к необходимости увеличения тока и, следовательно, пространственного заряда, препятствующего эффективному взаимодействию электронов с высокочастотным полем и повышению КПД. Применение многолучевой конструкции позволяет разрешить это противоречие. Поэтому целесообразно исследование многолучевой замедляющей структуры (ЗС) типа «клеверный лист» [1], ширина полосы которой предварительно оценивалась в 30 %. Кроме того, рассматриваемая ЗС перспективна с точки зрения применения магнитных периодических фокусирующих систем.

Цель работы – численный анализ электродинамических характеристик многолучевой ЗС типа «клеверный лист» в сантиметровом диапазоне волн, получение зависимостей центральной частоты и полосы пропускания от геометрических параметров конструкции.

Особенности конструкции ЗС

Исследуемая ЗС (рис. 1) содержит резонаторы 1, в которых перпендикулярно их осям установлены проводящие диски 2, соединенные с диафрагмами 3, разделяющими соседние резонаторы элементами 4 в форме листа клевера. Соседние резонаторы 1 повернуты по отношению друг к другу на угол π/n (n – число лепестков 5 элемента 4, соединяющего диски 2 и диафрагмы 3). В диафрагмах 3 вблизи их оси, там, где не перекрываются лепестки 5 соседних элементов 4, вы-

полнены радиальные щели b связи, общее число которых в каждой диафрагме 3 не менее числа лепестков 5 элемента 4 . Каналы 7 для электронных лучей выполнены в диафрагмах 3 и дисках 2 вдоль осей, проходящих вблизи краев дисков 2 .

Таким образом, ЗС обладает винтовой осью C_{8_4} , операция симметрии относительно которой представляет собой сочетание поворота на угол $\pi/4$ по часовой стрелке и трансляции вдоль оси на расстояние $d/2$. Двукратное повторение операции симметрии равносильно трансляции на расстояние периода ЗС (d) [2].

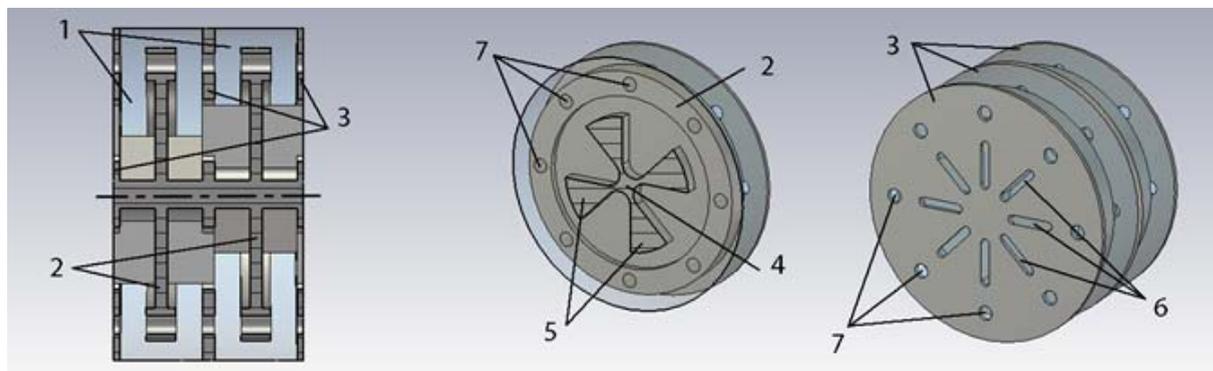


Рис. 1. Общий вид многолучевой ЗС типа «клеверный лист»

Численное моделирование

Оценка периода ЗС производилась из условия синхронизма электронного пучка и электромагнитной волны. Для повышения электрической прочности разработчики ЗС в качестве рабочей предлагают использовать $+1$ пространственную гармонику, что в силу особенностей симметрии ЗС соответствует фазовому сдвигу на резонатор $3\pi/2$. Период ЗС и область рабочих частот позволяют оценить радиус резонатора. Размеры пролетных каналов оценивались по значению тока пучка. Мощность прибора, а также технологический процесс изготовления накладывают ограничения на толщину стенок резонатора 1 и проводящего диска 2 , которые не могут быть слишком тонкими.

В результате первой серии численных расчетов обнаружилось, что основной проблемой для исследуемой структуры является получение широкой полосы пропускания (до 30 %) [1]. Моделирование распределения полей показывает, что линии магнитного поля направлены вдоль лепестков центрального элемента 4 . Для π вида колебаний магнитные поля в соседних резонаторах 1 имеют противоположные направления. Увеличение компоненты магнитного поля, параллельной щели связи b , расположенной вдоль лепестков, способствует увеличению магнитной связи между соседними резонаторами. Для 0 вида колебаний электрические поля на пролетных каналах в соседних резонаторах 1 имеют противоположное направление, т. е. каналы возмущают поля в резонаторах. Таким образом, расширение полосы пропускания возможно путем увеличения магнитной связи через радиальные щели b , а также электрической связи через пролетные каналы 7 .

Результаты моделирования

При исследовании ЗС важно установить особенности влияния отдельных конструктивных элементов на ее характеристики. Особый интерес представляет центральный проводник 4 (см. рис. 1), форма которого однозначно задается двумя параметрами: внешним и внутренним радиусами (рис. 2). Внутренний радиус соответствует радиусу окружности, вписанной в элемент. На первом этапе производилось моделирование структуры без проводящего дискового элемента 2.

На рис. 3 значения радиусов и частот представлены в нормированном виде. Ширина полосы определена в процентах. График демонстрирует пропорциональную зависимость частоты от радиуса «клевера» $R_{\text{внеш}}$. Эффект расширения полосы с увеличением внешнего радиуса связан с ростом магнитной связи соседних резонаторов, поскольку магнитное поле направлено вдоль боковой поверхности «лепестков клевера».

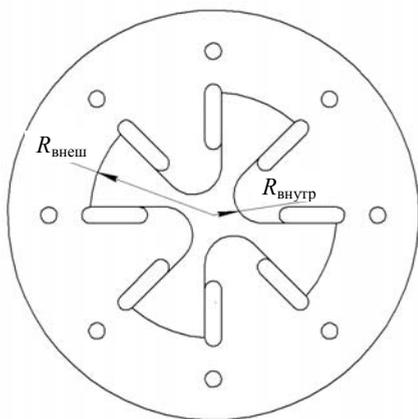


Рис. 2. Схема поперечного сечения ЗС

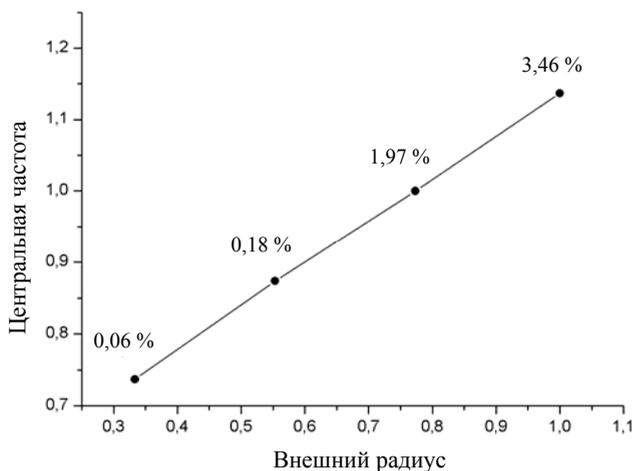


Рис. 3. Зависимость ширины полосы и центральной частоты от внешнего радиуса «лепестка клевера» при фиксированных остальных параметрах

Изменение внутреннего радиуса имеет незначительное влияние на частоту (менее 1 %) (рис. 4). С увеличением внутреннего радиуса происходит сужение полосы на 0,3 %. В целом на характеристики ЗС более существенное влияние оказывает внешний радиус «клевера».

На следующем этапе производилось исследование электродинамических характеристик ЗС в зависимости от топологии щелей связи.

Графики зависимости ширины полосы и центральной частоты от длины щели связи построены для двух случаев: при фиксированной координате ближнего к оси ЗС края щели (R_s) и при фиксированной координате дальнего края щели ($R_s + L$), где R – внешний радиус структуры, L – длина щели, R_s – удаление щели от оси (рис. 5). При увеличении длины щели связи происходит расширение полосы, сопровождающееся смещением частоты в низкочастотную область. Однако процесс расширения полосы при увеличении длины щели происходит до тех пор, пока боковая поверхность щели целиком граничит с боковой поверхностью «лепестка клевера», обеспечивающей направление магнитного поля вдоль щели связи.

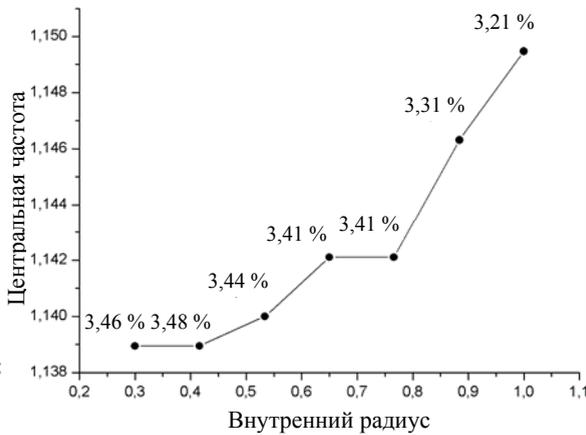


Рис. 4. Зависимость ширины полосы (ГГц) и центральной частоты от внутреннего радиуса «клевера»

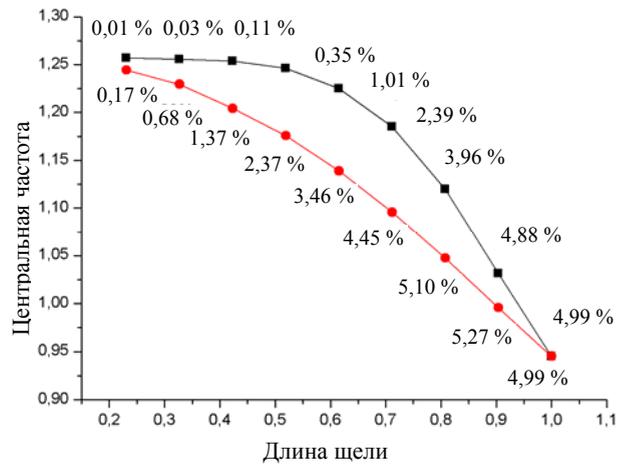


Рис. 5. Зависимость ширины полосы и центральной частоты от длины щели связи: ■ – $R_s/R = 0,22$; ● – $(R_s + L)/R = 0,64$

Анализируя зависимость на рис. 6, следует отметить, что при увеличении ширины щели связи происходит расширение полосы и ее смещение в низкочастотную область. При этом длина щели связи влияет на ширину полосы намного сильнее, чем ее ширина.

Увеличение электрической связи между резонаторами также возможно за счет изменения размера и положения пролетных каналов. Исходя из представленной на рис. 7 зависимости, можно сделать заключение, что изменение радиуса пролетных каналов влияет на центральную частоту и полосу ЗС незначительно.

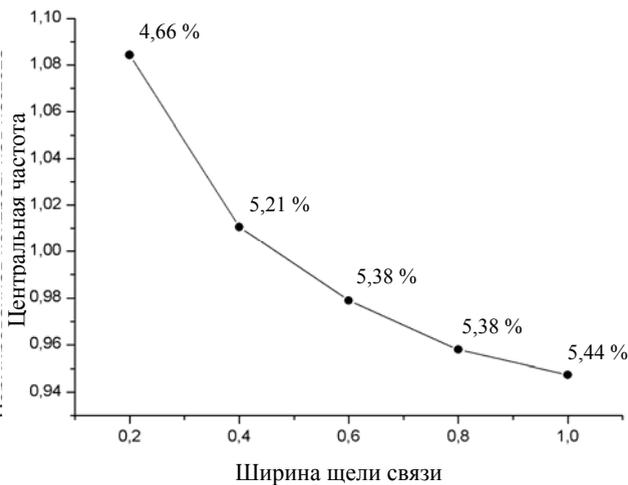


Рис. 6. Зависимость ширины полосы и центральной частоты от ширины щели связи

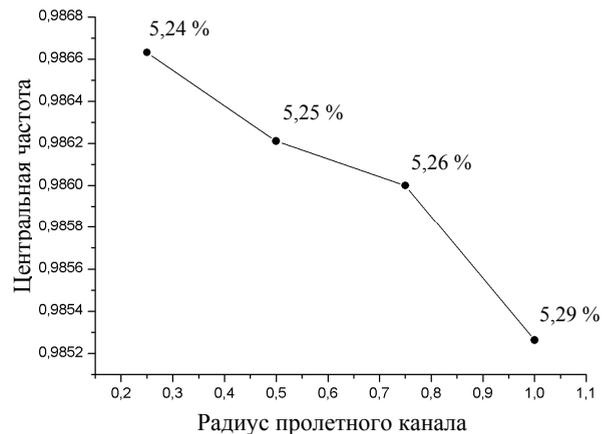


Рис. 7. Зависимость ширины полосы и центральной частоты от радиуса пролетного канала

Результаты моделирования, представленные выше, относятся к конфигурации ЗС при отсутствии проводящего диска. Далее приведены результаты, полученные при его внесении.

Проводящий дисковый элемент состоит из центральной и периферийной частей, обладающих различной высотой. В периферийной части выполнены пролетные каналы для многолучевого электронного потока. Таким образом, внешний радиус проводящего диска, внесенного в резонатор, зависит от удаления пролетных каналов от оси ЗС. Диск образует емкостный зазор с диафрагмами, увеличивая связь между соседними резонаторами.

На рис. 8 представлено схематическое изображение проводящего диска: R_1 – расстояние от центра пролетного канала до оси ЗС, d – высота периферийной части. Внешний радиус проводящего диска равен $R_1 + d/2$, радиус центральной части определяется соотношением $R_1 - d/2$.

С введением дисков в рассмотренную выше структуру происходит сужение полосы пропускания, а также ее смещение в низкочастотную область.

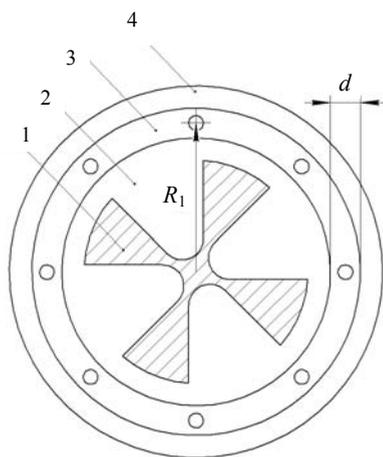


Рис. 8. Проводящий дисковый элемент: 1 – центральный проводник в форме «листа клевера», 2 – центральная часть проводящего диска, 3 – периферийная часть проводящего диска, 4 – стенка резонатора

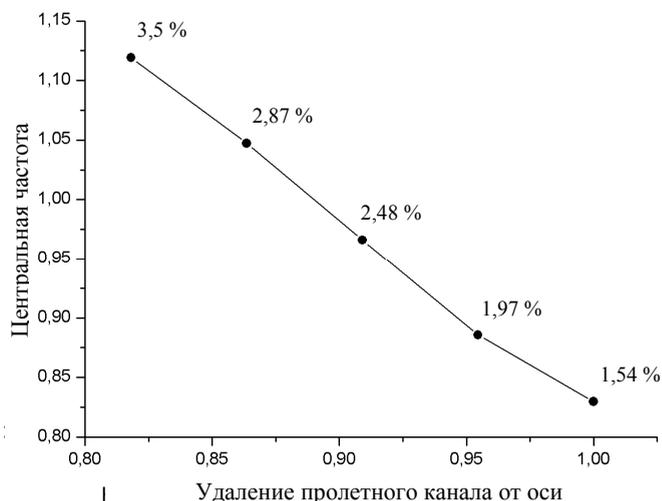


Рис. 9. Зависимость центральной частоты и полосы от положения пролетного канала

Поскольку положение пролетных каналов связано с размерами проводящего диска, сужение полосы при удалении пролетных каналов от оси можно объяснить сужением зазора между боковыми стенками резонатора и краем диска (рис. 9). Этим же объясняется эффект сужения полосы при увеличении ширины периферийной части диска (рис. 10, 11).

Процесс изготовления исследуемой ЗС из цельной заготовки металла на современном этапе развития техники связан с большими сложностями. Представляется возможным применение сборной конструкции, в которой осуществляется крепление диафрагм 3 к центральному элементу 4 (см. рис. 1). Возникающие в процессе сборки дефекты электрического контакта между конструктивными элементами могут оказывать на характеристики ЗС влияние, которое необходимо установить в результате численного моделирования. Для этого между диафрагмами 3 и элементом 4 был задан зазор, ширина которого изменялась в процессе моделирования. Полученные зависимости представлены на рис. 12. Ширина зазора пронормирована к толщине диафрагмы.

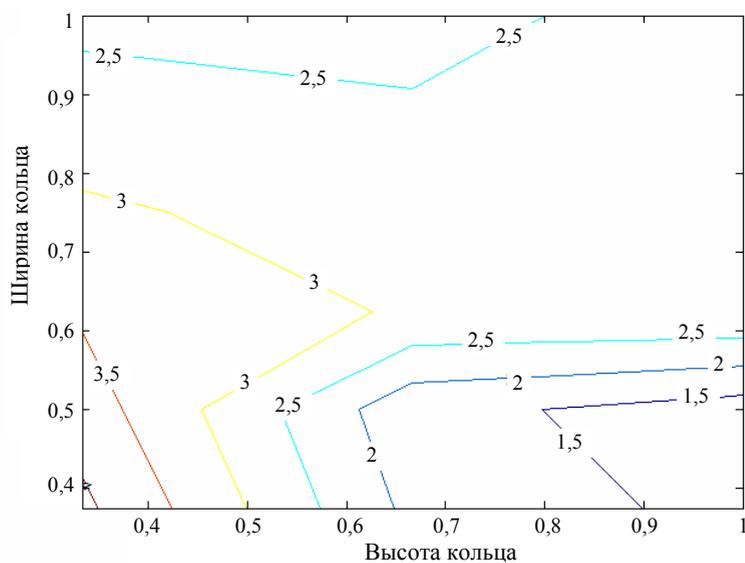


Рис. 10. Зависимость ширины полосы (%) от высоты и ширины кольца

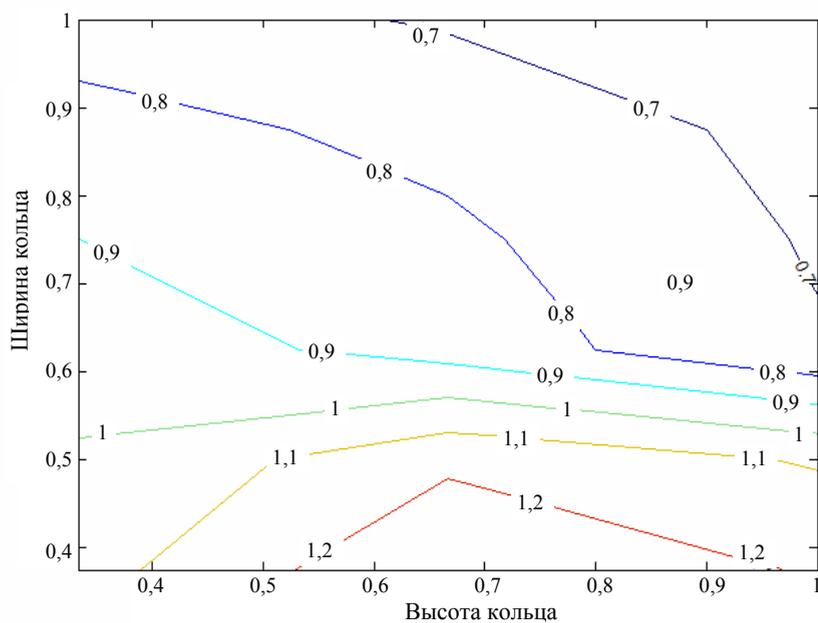


Рис. 11. Зависимость нормированной центральной частоты (изолинии) от высоты и ширины кольца

Видно, что при возникновении дефектов электрического контакта конструктивных элементов происходит существенное уменьшение центральной частоты и сужение полосы пропускания, поэтому при производстве ЗС необходимо следить за строгостью соблюдения технологии сборки и контроля качества изделия.

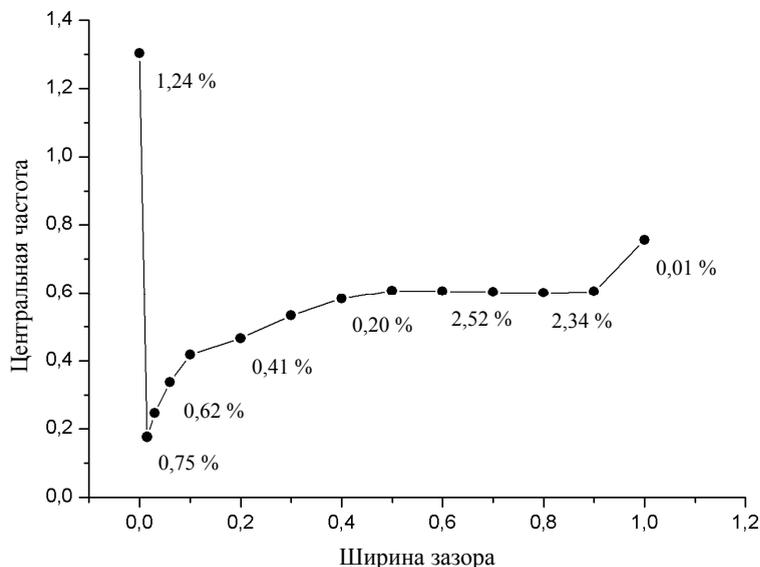


Рис. 12. Зависимость ширины полосы и центральной частоты от ширины зазора

Заключение

Проведен анализ электродинамических характеристик многолучевой ЗС типа «клеверный лист», полученных в результате численного моделирования. Основное внимание уделено получению зависимостей центральной частоты и полосы пропускания ЗС в сантиметровом диапазоне от геометрических параметров ЗС.

Внутренний радиус «клевера» (см. рис. 2) практически не влияет на центральную частоту и ширину полосы ЗС (см. рис. 4). При смещении щелей связи к периферии ЗС, начиная с определенного значения, расширение полосы пропускания переходит в область насыщения, что связано с ухудшением магнитной связи соседних резонаторов вследствие уменьшения границы боковой поверхности «лепестков клевера» с щелями связи. Размер пролетных каналов влияет на центральную частоту и ширину полосы в слабой степени (см. рис. 7).

Показано, что для верхней части сантиметрового диапазона характерная ширина полосы пропускания ЗС типа «клеверный лист» составляет 2–5 %.

Список литературы

1. А. с. 797442 СССР, МКИ Н 01 J 23/24, Н 01 J 25/34. Многолучевой СВЧ прибор с замедляющей системой типа цепочки связанных двухзазорных резонаторов / В. Ф. Письменко, Н. Н. Иванова, О. И. Курлычкин.
2. Силин Р. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы. – М.: Советское радио, 1966.

Multiple-Beam Cloverleaf Slow-Wave Structure «Cold Test» Simulation Results Analysis

M. V. Kuzmichev, V. B. Profe, K. V. Trotsyuk

The paper deals with multiple-beam cloverleaf slow-wave structure investigation. Engineering software was utilized for numerical simulation and «cold test» results obtaining. Finally, the results were analyzed in some detail.