

Особенности электродинамических характеристик замедляющих систем типа ЦСР многолучевых ЛБВ

А.Н. Савин, Е.А. Богомолова, Е.В. Медянцева

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Аннотация: в данной работе методами математического моделирования проведено исследование особенностей электродинамических характеристик (ЭДХ) замедляющих систем (ЗС) на ЦСР многолучевой ЛБВ, влияющих на процессы взаимодействия с электронным потоком.

Ключевые слова: ЦСР, электродинамические характеристики, многолучевая ЛБВ

1. Введение

На современном этапе развития вычислительной техники применение адекватного математического моделирования ЗС многомерными полевыми методами, основанными на решении системы уравнений Максвелла для заданных граничных условий, позволяет достаточно точно и относительно быстро рассчитывать ЭДХ резонаторных ЗС. Эти ЭДХ необходимы для моделирования в дискретном приближении процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями волноведущих систем в мощных ЛБВ. Как показано в [1], для повышения достоверности получаемых с помощью такого моделирования результатов для требуемого класса объектов желательно использовать экспериментальные данные при выборе параметров вычислительного процесса, отвечающих за его эффективность с точки зрения точности и вычислительных затрат. Указанное выше позволяет реализовывать в реальное время различные вычислительные эксперименты, требующие многократного определения ЭДХ резонаторных ЗС ЛБВ, например, статистический анализ влияния погрешностей изготовления отдельных узлов и деталей на параметры этих ЗС.

В данной работе проводилось исследование с использованием математического моделирования электродинамических характеристик ЗС на ЦСР многолучевой ЛБВ.

2. Электродинамические характеристики замедляющих систем ЛБВ

Волноведущая система многолучевой ЛБВ представляет собой неоднородную ЗС типа ЦСР [2], ячейки которой имеют незначительно отличающиеся продольные размеры для формирования требуемого закона изменения фазовой скорости замедленной рабочей волны (рис. 1). Для расчета выходных характеристик таких ЛБВ требуется знание параметров эквивалентной схемы каждой ячейки [3]. Параметры этих эквивалентных схем определяются по результатам измерения или расчёта ДХ и $R_{св}$ однородных (периодических) ЦСР, составленных из одинаковых ячеек, каждая из которых соответствует одной из ячеек неоднородной ЗС типа ЦСР.

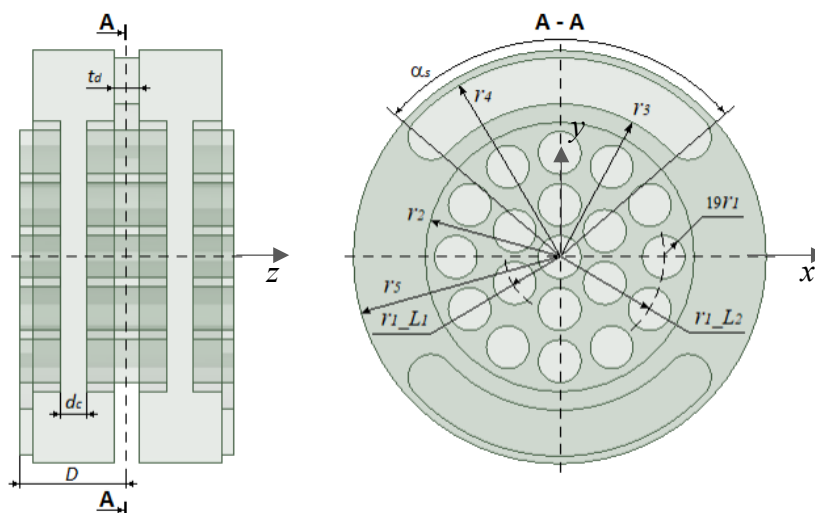


Рисунок 1. Продольный и поперечный разрезы вакуумной части двух ячеек многолучевой ЗС типа ЦСР с повернутыми на 180° фаселевидными щелями связи с симметричным расположением трубок дрейфа. D – полупериод ЗС, d_c – зазор, t_d – толщина диафрагмы, r_5 – внешний радиус ЗС, r_4 – внешний радиус щели связи, r_3 – внутренний радиус щели связи, α_s – угол раскрыва щели связи, r_2 – внешний радиус трубки дрейфа, r_1 – радиус канала, r_{1_L1} – радиус первого слоя каналов, r_{1_L2} – радиус второго слоя каналов.

Электромагнитные поля распространяющихся (бегущих) в периодических (бесконечных) ЦСР волн при определённых условиях соответствуют полям стоячих волн в короткозамкнутых по поперечным плоскостям зеркальной симметрии (резонансных) отрезках этих ЦСР. Соответственно требуемые ДХ и $R_{св}$ могут быть получены измерением или расчётом собственных частот таких отрезков ЦСР и распределения электромагнитных полей в них на этих частотах [2, 4, 5].

Одной из программ, реализующей трёхмерное (3D) моделирование электромагнитных полей в СВЧ структурах с помощью метода конечных элементов, является ANSYS HFSS [6]. В программе для нахождения распределения полей в ЗС требуется сформировать ограничивающие поверхности и плоскости симметрии (при наличии) моделируемой ЗС, задать на них граничные условия, осуществить расчёт и постпроцессорную обработку результатов определения собственных частот и распределений электромагнитных полей в ЗС, сохранить полученные результаты в виде соответствующих файлов. В процессе выполнения работы разработан скрипт на языке Python, реализующий методику определения ЭДХ ЗС типа ЦСР для многолучевой ЛБВ в программе ANSYS HFSS, аналогичную экспериментальному резонансному методу [4].

Скрипт использует предложенную в [7] технологию разделения близко расположенных видов колебаний резонансной структуры СВЧ, основанную на подстройке начальной частоты поиска собственных частот таким образом, чтобы исключить возможные перескоки между близко расположенными видами колебаний. Это позволяет надёжно определять ЭДХ ЗС в областях границ полос пропускания, т.е. на участках ДХ с большой крутизной и соответственно близким расположением собственных частот. Полученная в результате выполнения разработанного скрипта информация о собственных частотах и распределениях полей во всех каналах резонансного отрезка ЗС типа ЦСР многолучевой ЛБВ сохраняется программой ANSYS HFSS в виде соответствующих файлов.

Дальнейшая обработка этой информации с целью определения спектрального состава продольной компоненты электрического поля в каналах, ДХ и $R_{св}$ пространственных гармоник ЗС осуществляется с помощью разработанного

программного модуля, реализованного в среде графического программирования NI LabVIEW.

Как указывалось выше, все ячейки неоднородной ЗС типа ЦСР многолучевой ЛБВ имеют незначительно отличающиеся продольные размеры для формирования требуемого закона изменения фазовой скорости рабочей замедленной волны. Следовательно ЭДХ ячеек в цепочке также должны отличаться незначительно.

Исследуемая однородная ЗС типа ЦСР многолучевой ЛБВ является системой со скользящей плоскостью симметрии вдоль координаты z с периодом $2D$ и набегом фазы на период 2φ . Она образована с помощью применения к одной ячейке ЗС операции отражения в скользящей плоскости, переводящей координату z в $z+D$, а координату y в $-y$ [8].

Многолучевая ЛБВ имеет каналы для электронного потока, расположенные на значительном расстоянии по координате y от плоскости $y=0$. Поэтому взаимодействие электронного потока возможно не только с обычно учитываемыми четными («косинусоидальными») компонентами поля, но и с нечетными («синусоидальными»), что необходимо учитывать при проектировании ЛБВ. Как известно, тип дисперсии волн в ЗС (прямая или обратная) определяется типом дисперсии её основной (0-й) пространственной гармоники [2, 8]. При этом, когда направление фазовой и групповой скоростей 0-й пространственной гармоники совпадает, то имеет место прямая волна, а когда противоположны — обратная волна. В обоих случаях направление фазовой скорости 0-й пространственной гармоники считается положительным [10].

На рис. 2 приведены рассчитанные на оси каналов с координатами $(0, 0)$, $(0, -r1 _ L2)$, $(0, r1 _ L2)$ в плоскости xOy сопротивления связи $R_{св}$ «0», «-1», «+1» пространственных гармоник поля обратной волны в основной резонаторной полосе пропускания ЗС типа ЦСР многолучевой ЛБВ. Как видно из рис. 2, в областях близких к границам основной резонаторной полосы пропускания в каналах, расположенных на расстоянии $\pm r1 _ L2$ по координате y от плоскости $y=0$, $R_{св}$ пространственных гармоник незначительно ниже по сравнению с $R_{св}$ пространственных гармоник в канале на оси ЗС. Это объясняется снижением амплитуд четных («косинусоидальных») компонент поля, относящихся к обратной волне и, в частности, к её рабочей «-1» пространственной гармонике, при удалении от плоскости $y=0$.

В центре основной резонаторной полосы пропускания на фазовых сдвигах $\varphi = 0.5 \pi, 1.5 \pi, 2.5 \pi, \dots$ (т.е. при пересечении ветвей пространственных гармоник прямой и обратной волн) в каналах, расположенных на расстоянии $\pm r1 _ L2$ по координате y от плоскости $y=0$ замедляющей системы, происходит взаимодействие (вычитание/сложение) четных («косинусоидальных») компонент поля, относящихся к пространственным гармоникам обратной волны, и нечетных («синусоидальных») компонент поля, относящихся к пространственным гармоникам прямой волны. На одностороннем спектре электрического поля на фазовых сдвигах $\varphi = 0.5 \pi, 1.5 \pi, 2.5 \pi, \dots$ в канале $(0, r1 _ L2)$ в плоскости xOy замедляющей системы наблюдается разностная картина спектральных линии четных и нечетных компонент поля. Соответственно, на одностороннем спектре электрического поля на фазовых сдвигах $\varphi = 0.5 \pi, 1.5 \pi, 2.5 \pi, \dots$ в канале $(0, -r1 _ L2)$ в плоскости xOy замедляющей системы наблюдается суммарная картина спектральных линии четных и нечетных компонент поля.

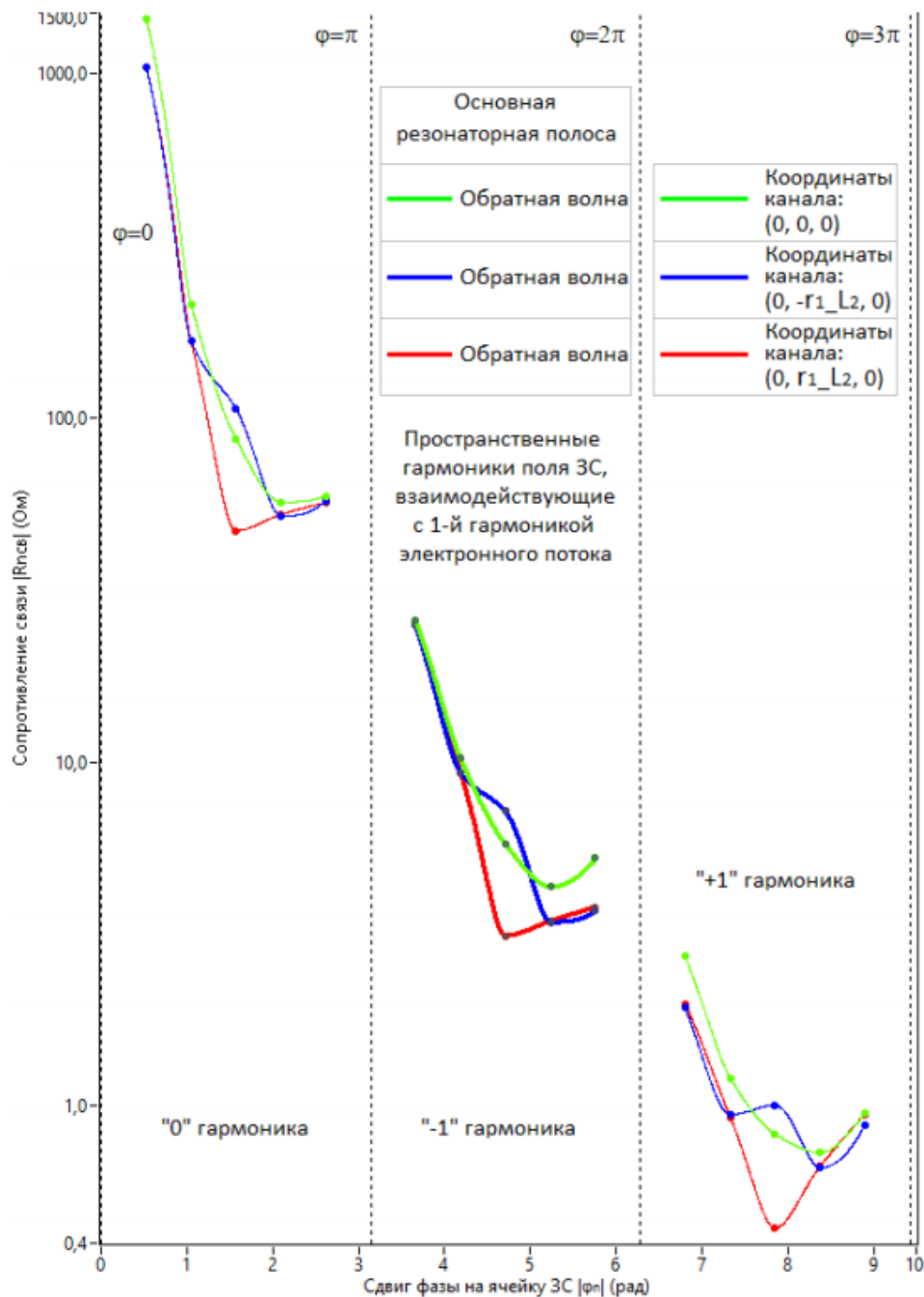


Рисунок 2. Рассчитанные на оси каналов с координатами $(0, 0)$, $(0, -r1_L2)$, $(0, r1_L2)$ в плоскости xOy сопротивления связи $R_{св}$ «0», «-1», «+1» пространственных гармоник поля обратной волны в основной резонаторной полосе пропускания ЗС типа ЦСР многолучевой ЛБВ.

Как видно из рис. 2, результаты рассмотренного взаимодействия чётных и нечётных компонент электрического поля в центре основной резонаторной полосы пропускания на фазовых сдвигах $\varphi = 0.5\pi, 1.5\pi, 2.5\pi, \dots$ в каналах, расположенных на расстоянии $\pm r1_L2$ по координате y от плоскости $y=0$, приводят к уменьшению/увеличению $R_{св}$ пространственных гармоник поля в указанных каналах исследуемой ЗС типа ЦСР многолучевой ЛБВ. Жирные зелёная, синяя и красная линии на рис. 2 соответствуют $R_{св}$ рабочей «-1» пространственной гармонике поля

обратной волны в исследуемой ЗС, взаимодействующей с 1-й гармоникой тока электронного потока в ЛБВ.

3. Заключение

Анализ ЭДХ распределения полей в пространстве взаимодействия и их спектров сопротивления связи R_{sv} пространственных гармоник полей в высшей резонаторной полосе показывает, что в каналах с координатами $(0, -rL \dots L2)$, $(0, rL \dots L2)$ в плоскости xOy исследуемой ЗС возможно значительное взаимодействие 2-й гармоникой тока электронного потока в ЛБВ с представленным нечётными компонентами электрическим полем «+1» пространственной гармоники обратной волны. Её фазовая скорость имеет направление противоположное фазовой скорости рабочей «-1» пространственной гармоники поля обратной волны основной резонаторной полосы, а замедление фазовой скорости, изменяющееся в диапазоне от 4 до 7.8, также соответствует замедлению фазовой скорости рабочей гармоники.

Также показано, что в исследуемой ЗС возможно незначительное взаимодействие 2-й гармоникой тока электронного потока в ЛБВ с представленным чётными компонентами электрическим полем «+1» пространственной гармоники прямой волны. Её фазовая скорость имеет направление такое же как у фазовой скорости рабочей «-1» пространственной гармоники поля обратной волны основной резонаторной полосы, а замедление фазовой скорости, изменяющееся в диапазоне от 5.3 до 5.9, также соответствует замедлению фазовой скорости рабочей гармоники.

Список литературы

1. Савин А.Н., Голованов Н.А., Богомолова Е.А. Сравнение программного обеспечения для решения внутренних краевых задач электродинамики методом конечных элементов // Сборник докладов XIII-ой Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 27-31 мая 2024, г. Санкт-Петербург, Россия, С. 409–413.
2. Григорьев А.Д., Янкевич В.Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. Численные методы расчёта и проектирования. – М. Радио и связь, 1984 – 248 с.
3. Батура М.П., Кураев А.А., Сеницын А.К. Моделирование и оптимизация мощных приборов СВЧ. – Минск: БГУИР, 2006. – 275 с.
4. Horsley W., Pearson A. Measurement of dispersion and interaction impedance characteristics of slow-wave structures by resonance methods // IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-13, pp. 962–969, Dec. 1966.
5. Дерюгин Л. Н. Электромагнитные замедляющие системы (методика измерения характеристик). – М.: МАИ, Оборонгиз. 1960. 126 с.
6. ANSYS HFSS Best-in-Class 3D High Frequency Structure Simulation Software. – URL: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> (30.12.2022).
7. Савин А.Н., Нахрап И.А., Вахлаева К.П. Метод разделения видов колебаний при расчете характеристик ЗС ЦСР в программе ANSYS HFSS // Ural Radio Engineering Journal. 2018. Т. 2. № 4. С. 41-51.
8. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. – М: Советское радио, 1966. 632 с.