

Оценка отклонений параметров неоднородных резонаторных замедляющих систем ЛБВ по измеренным методом резонансных возмущений распределениям электромагнитных полей

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

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

Аннотация: в данной работе разработана методика оценки величины отклонений размеров неоднородных резонаторных замедляющих систем (ЗС) и качества их изготовления по измеренным методами резонансных возмущений картинам распределений электромагнитных полей. Осуществлена программная реализация методики контроля параметров и отбраковки неоднородных резонаторных ЗС на этапе сборки ЛБВ и проведено её опробование на выходных секциях ЛБВ.

Ключевые слова: неоднородные ЗС, измерение электромагнитных полей, метод резонансных возмущений

1. Введение

Разработка перспективных в настоящее время электровакуумных СВЧ приборов сантиметрового, миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн предполагает точное знание электродинамических характеристик (ЭДХ) их волноведущих систем (ВС), учитывающее технологию изготовления, распределения полей в ВС для адекватного расчёта требуемых выходных характеристик приборов, влияние технологических разбросов размеров ВС на их ЭДХ. Данная информация может быть получена сочетанием расчётных и экспериментальных методов определения ЭДХ ВС. Экспериментальные методы определения ЭДХ реальных ВС позволяют в процессе проектирования – получать достоверную информацию о закономерностях распространения волн, необходимую для оценки и уменьшения погрешностей расчёта ЭДХ многомерными полевыми методами, построения требуемых для эффективной оптимизации адекватных математических моделей параметров ВС и их последующей корректировки. А также в процессе производства СВЧ приборов – контролировать точность изготовления, качество сборки и требуемые ЭДХ применяемых ВС.

Применение адекватного математического моделирования ЭДХ ВС многомерными полевыми методами с помощью современной вычислительной техники, позволяет значительно ускорить и удешевить процесс проектирования электровакуумных СВЧ приборов. В частности, использование математического моделирования позволяет получать достоверные результаты при оценке с помощью статистического анализа влияния погрешностей изготовления отдельных узлов и деталей на ЭДХ ВС, например, резонаторных замедляющих систем ЛБВ. Следовательно, актуальными являются задачи разработки специализированных аппаратных и программных средств, обеспечивающих автоматизацию как процессов определения ЭДХ ВС с помощью современных измерительных приборов, так и процессов математического моделирования и последующей обработки его результатов с помощью современных программных комплексов.

В данной работе проводилось исследование влияния технологических разбросов на измеряемые распределения полей и электродинамические характеристики

неоднородных резонаторных замедляющих систем ЛБВ с целью разработки методики контроля параметров и отбраковки замедляющих систем.

2. Оценка отклонений размеров замедляющих систем и качества их пайки по измеренным картинам распределений электромагнитных полей

Волноведущие системы мощных ЛБВ, как правило, включают в себя одну или несколько однородных или неоднородных секций, представляющих собой замедляющие системы (ЗС) на основе цепочек связанных резонаторов (ЦСР) [1]. Экспериментально распределение электромагнитного поля в таких ЗС может быть получено с помощью метода резонансных возмущений (МРВ), заключающегося в протягивании возмущающего тела (диэлектрика, проводника, магнетика и т.п.) вдоль требуемого направления резонатора, которым в данном случае будет являться закороченный отрезок ЗС и фиксации изменения собственной частоты, пропорционального квадратам компонент поля в той точке, в которую внесено тело [2]. В случае однородных ЗС, являющихся, как правило, периодическими структурами, закорачивание осуществляется по плоскостям зеркальной симметрии (при их наличии). При этом по результатам измерения распределения полей в таких закороченных отрезках можно определить требуемые для расчёта выходных параметров ЛБВ дисперсионные характеристики (ДХ) и сопротивления связи ($R_{св}$) пространственных гармоник однородных ЗС [1, 2, 3].

При измерениях с помощью МРВ в случае малых возмущений отклонение собственной частоты ω_c резонатора определяется следующим выражением [4]:

$$\frac{\delta\omega}{\omega_c} \approx \frac{\int_{\Delta V} (\chi_m \mu \dot{H} \dot{H}^* - \chi_e \epsilon \dot{E} \dot{E}^*) dV}{4W}. \quad (1)$$

Распределение электромагнитных полей в ВС электровакуумных СВЧ приборов, включающих в себя ЗС и выводы энергии с элементами согласования, могут быть определены экспериментально методом нерезонансных возмущений (МНВ), путём измерения на заданной частоте комплексного коэффициента отражения при протягивании возмущающего тела вдоль требуемого направления ВС, также пропорционального квадратам компонент поля в той точке, в которую внесено тело [5]. Комплексный коэффициент отражения и поля в месте расположения возмущающего тела связаны следующим соотношением [6]:

$$2P_i(\dot{\Gamma}_p - \dot{\Gamma}_a) = -j\omega[k_e \dot{E}_a^2 - k_m \dot{H}_a^2]. \quad (2)$$

Как видно из (1) и (2), используя возмущающие тела из различных материалов и различной формы, можно определять требуемые компоненты поля в исследуемых резонансных и нерезонансных структурах [4, 6, 7, 8]. В обоих случаях процесс измерений и объём получаемой информации для последующей оперативной обработки предполагают использование автоматизированных установок. Определение распределения полей в неоднородных резонаторных ЗС ЛБВ в ходе выполнения данной работы предполагается осуществлять с помощью автоматизированного измерительного комплекса, обеспечивающего относительную погрешность измерения собственных частот исследуемых резонансных структур не более $1 \cdot 10^{-7}$.

На рисунке 1 представлена исследуемая выходная секция ЛБВ, подключенная к автоматизированному комплексу.

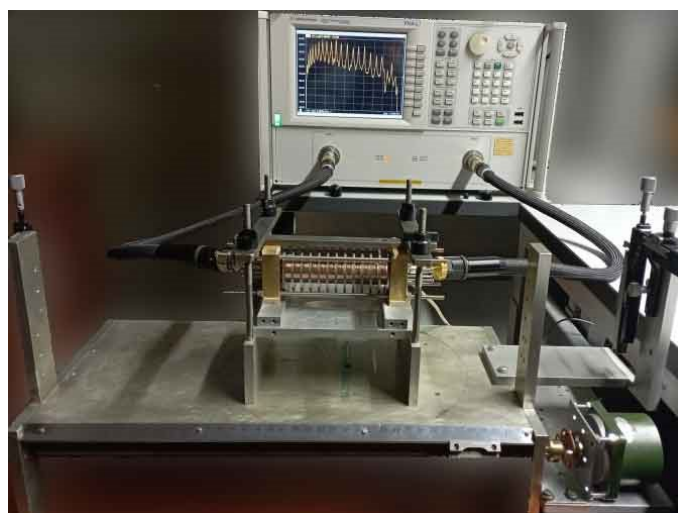


Рисунок 1. Автоматизированный комплекс с расположенной на измерительном столе и подключенной к векторному анализатору N5320C закороченной выходной секцией ЛБВ.

Измерение распределения полей осуществлялось на собственных частотах короткозамкнутых выходных секций ЛБВ в основной (рабочей) полосе пропускания. Шаг перемещения возмущающего тела, имеющего длину 0.3 мм (т.е. ~ 0.08 длины ячейки ЗС), составлял 0.1 мм (т.е. $36 \div 40$ отсчётов на ячейку ЗС), что обеспечило достаточную разрешающую способность по продольной координате. Максимальный относительный уход $\delta f/f_c$ составил $|-3 \cdot 10^{-5}|$, а относительные погрешности его измерения находились в пределах $[1 \cdot 10^{-7}, 2 \cdot 10^{-7}]$.

В среде графического программирования NI LabVIEW 2021 [9] разработан и реализован программный модуль, использующий результаты измерений МРВ – собственные частоты f_c закороченных неоднородных отрезков резонаторных ЗС и распределения полей на этих частотах для контроля параметров резонаторных замедляющих систем.

На рис. 2 приведены измеренные с помощью МРВ пропорциональные продольной компоненте электрического поля распределения относительных уходов собственных частот $\delta f/f_c$ вдоль оси канала электронного потока соответственно 1-й и 2-й закороченных выходных секций ЛБВ на частотах, соответствующих началу низкочастотной полосы пропускания каждой секции.

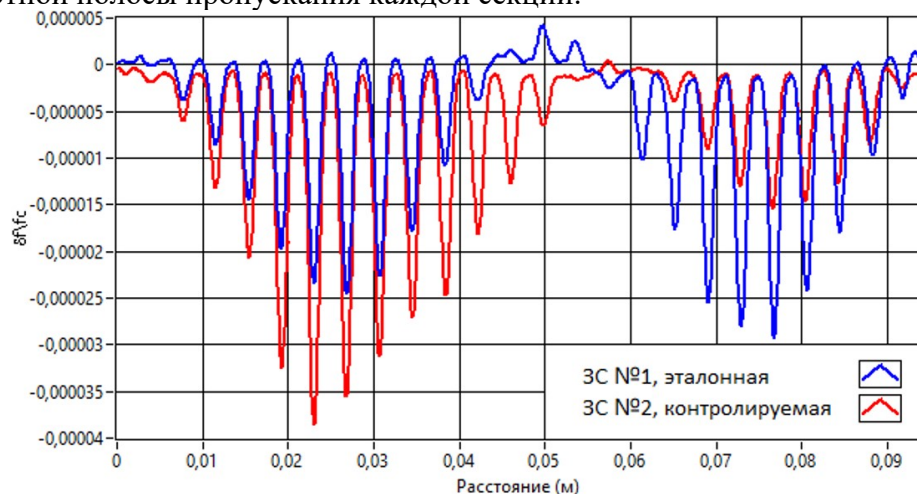


Рисунок 2. Распределения относительных уходов собственных частот $\delta f/f_c$ вдоль оси канала электронного потока 1-й (эталонной) и 2-й (контролируемой) закороченных выходных секций ЛБВ.

Как видно из рис. 2, отклонения координат пиков относительных уходов собственных частот $\delta f/f_c$ в первой половине (выходной части) макетов ЗС №1 и ЗС №2 незначительны и имеют разнонаправленный характер. Их величины находятся в пределах допуска изготовления деталей ЗС и разрешающей способности измерений, которая в данном случае, с учётом шага возмущающего тела 0.1 мм и использования квадратичной аппроксимации при поиске пиков, составляет 0.01÷0.005 мм. Во второй половине (входной части) макетов ЗС №1 и ЗС №2 отклонения координат пиков относительных уходов собственных частот $\delta f/f_c$ имеют величины на порядок больше чем в первой (достигают 10% от длины ячейки ЗС) и один знак. Соответственно, длина ячеек входной части макета ЗС №2 значительно меньше чем у аналогичных ячеек «эталонного» макета ЗС №1 (см. рис. 2), что можно трактовать как выявление брака на этапе сборки ЛБВ.

3. Заключение

Обнаруженные по результатам математической обработки измерений МРВ уменьшения длины части ячеек закороченной выходной секций ЛБВ объясняют повышение собственных частот f_c и изменение на этих частотах картин распределения квадрата модуля комплексной амплитуды продольной компоненты электрического поля $|\vec{E}_z|^2$ на оси канала электронного потока по сравнению с соответствующими параметрами «эталонной» закороченной выходной секций ЛБВ.

Таким образом показано, что применение измерений с помощью МРВ и последующей математической обработки его результатов позволяют организовать контроль параметров и отбраковку неоднородных секций резонаторных замедляющих систем на этапе сборки ЛБВ. Разработанный программный модуль, реализующий рассмотренную выше методику, предполагается использовать в автоматизированном измерительном комплексе при анализе результатов, полученных методами МРВ и МНВ.

Список литературы

1. Григорьев А.Д., Янкевич В.Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. Численные методы расчёта и проектирования. – М. Радио и связь, 1984 – 248 с.
2. 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.
3. Дерюгин Л. Н. Электромагнитные замедляющие системы (методика измерения характеристик). – М.: МАИ, Оборонгиз. 1960. 126 с.
4. Ginzton, E.L. Microwave Measurements. New York: McGraw-Hill. 1957.
5. C.W. Steele, A nonresonant perturbation theory, IEEE Trans. Micro. Theory Tech. N 2, P. 70–74, 1966.
6. Tan J., Tong D., Gu Q., Fang W., Zhao Z. Development of a nonresonant perturbation technique and its application to multicell traveling-wave deflectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 835(2016), 148–156.
7. L. C. Maier, Jr., and J. C. Slater, “Field strength measurements in resonant cavities,” J. APP1. Phys., vol. 23, p. 68, 1952.
8. Amato, J.C. & Herrmann H. 1985. Improved method for measuring the electric fields in microwave cavity resonators. Review of Scientific Instruments 56(5): 696-699.
9. What Is LabVIEW? – URL: <https://www.ni.com/en/shop/labview.html> (16.11.2024).