

Проектирование пространства взаимодействия лампы бегущей волны X-диапазона частот для перспективных радиолокационных систем

С.А. Нефедов¹, И.В. Поляков¹, Н.В. Ржевин^{1,2}

¹АО «НПП «Алмаз»

²СГУ им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: Работа посвящена проектированию ЛБВ для перспективных радиолокационных систем в X-диапазоне частот. Дисперсионные характеристики рассчитывались с использованием программного обеспечения CST Studio. Конструкция замедляющей системы включает в себя медный резонатор, с формой цилиндрического тороида с фасолевидной щелью связи.

Ключевые слова: лампа бегущей волны (ЛБВ), замедляющая система (ЗС), цепочка связанных резонаторов (ЦСР), CST Studio, неоднородная замедляющая система, скачок замедления.

1. Введение

Расширение рабочей полосы мощной импульсной лампы бегущей волны является приоритетной задачей при модернизации или разработке радиолокационной аппаратуры, так как существенно расширяются её функциональные возможности, в частности, за счёт возможности внедрения широкополосной внутриимпульсной линейной частотной модуляции.

Как известно, в качестве замедляющих систем (ЗС) для мощных ЛБВ, как правило, применяются ЗС типа «цепочки связанных резонаторов» (ЦСР). При этом одной из основных задач при проектировании пространства взаимодействия данных замедляющих систем для ЛБВ является определение оптимальной конфигурации резонаторов для наиболее эффективного усиления СВЧ-сигнала в заданном диапазоне частот.

Опыт разработки и эксплуатации аналогов свидетельствует о том, что в ходе решения задачи получения высокого уровня выходной мощности при сравнительно высоком усилении в широкой полосе частот была выявлена склонность односекционной ЛБВ с однородной замедляющей структурой к самовозбуждению на границе полосы пропускания щелевой моды ЗС. С целью повышения устойчивости к самовозбуждению предложена конструкция неоднородной ЗС, имеющей участки пространства взаимодействия с примерно одинаковым замедлением в основной полосе пропускания при разнесении граничных частот щелевых мод.

Для решения данного вопроса были рассчитаны дисперсионные характеристики двух участков ЗС при помощи современного программного обеспечения CST Microwave Studio (CST) [1], по результатам расчётов были изготовлены и исследованы макеты для экспериментальной проверки расчётных результатов, с применением оптимальной методики исследования ЭДХ ЗС.

2. Описание программного пакета расчёта ЭДХ

На сегодня, одной из наиболее используемых программ расчёта ЭДХ является CST. Моделирование в этой программе основано на встроенных модулях поиска собственных видов колебаний замкнутых структур и осуществляется путем решения систем дифференциальных уравнений Максвелла с помощью метода конечных

элементов (FEM) с дискретизацией гексагональными или тетрагональными элементами разбиения. Учитывается периодичность структуры с граничными условиями Флоке и заданным фазовым сдвигом высокочастотного поля на его торцах [2-4]. Для заданной геометрии резонатора решается задача для определения собственных резонансных частот, соответствующих задаваемому фазовому сдвигу на период замедляющей системы. По рассчитанным значениям резонансных частот в дальнейшем определяется дисперсионная характеристика.

3. Подбор оптимальной конфигурации резонатора ЗС в X-диапазоне.

Оптимальная конфигурация резонатора подбиралась при моделировании в CST путём последовательного изменения геометрии резонатора. После проведения более 30 итераций были выбраны два оптимальных варианта конфигурации резонатора для двух участков замедляющей системы с разной площадью щели связи (рисунок 1). Результаты расчётов приведены на рисунке 2-3, также для сравнения эффективности расширения полосы на рисунке 4 приведена расчётная дисперсионная характеристика однородной замедляющей системы существующей ЛБВ, имеющую на сегодняшний день ширину рабочей полосы 800 МГц.

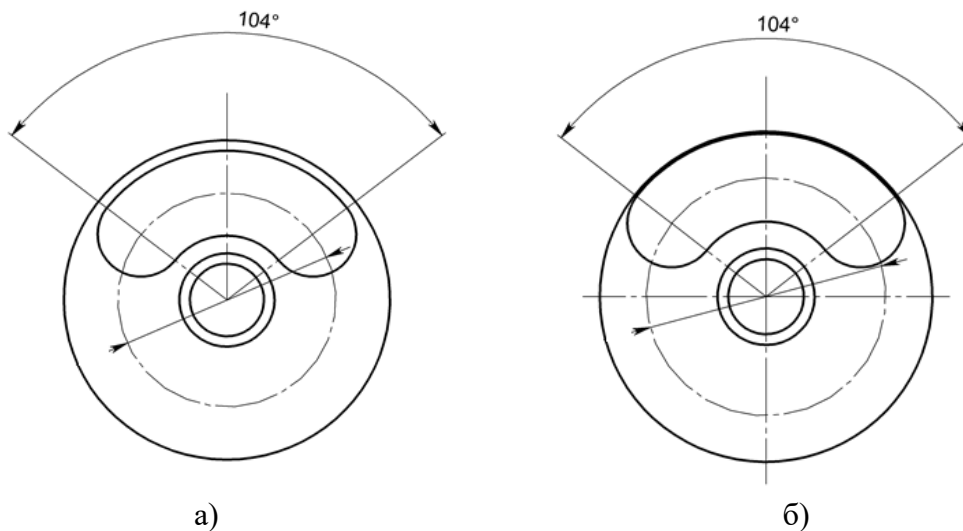


Рисунок 1. а) вариант резонатора с меньшей площадью щели связи, б) вариант резонатора с большей площадью щели связи.

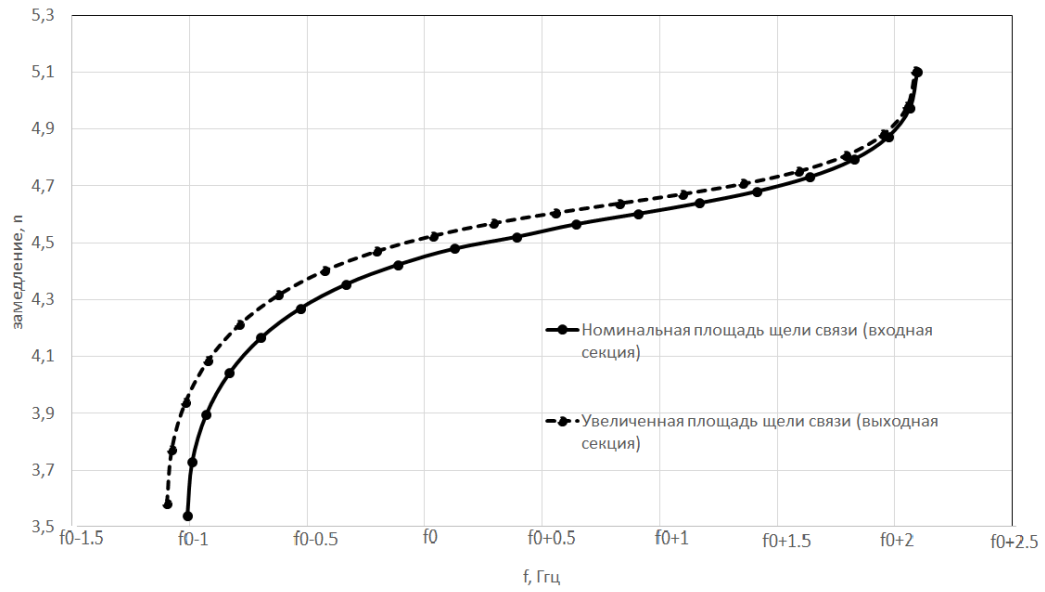


Рисунок 2. Дисперсионные характеристики участков замедляющей системы мощной ЛБВ.

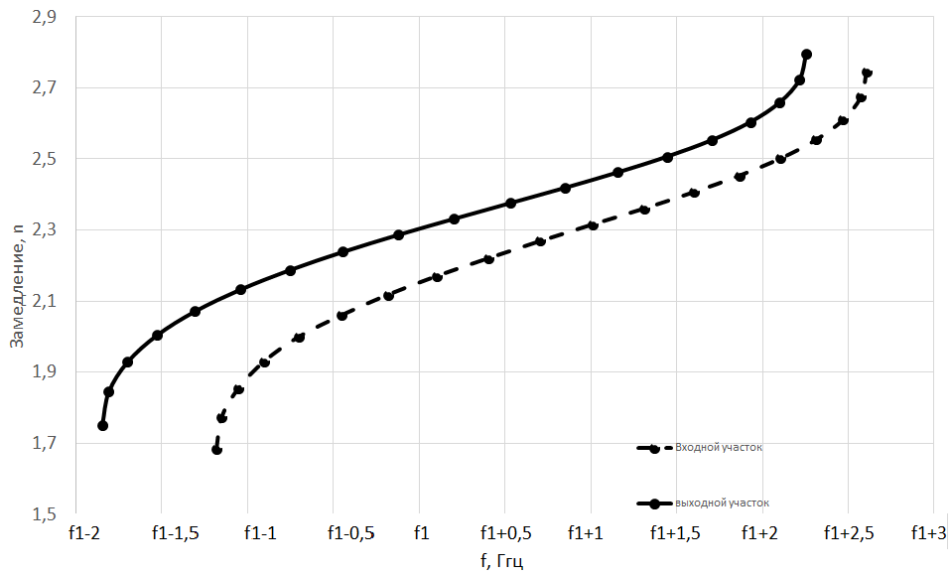


Рисунок 3. Дисперсионные характеристики щелевых мод участков замедляющей системы мощной ЛБВ.

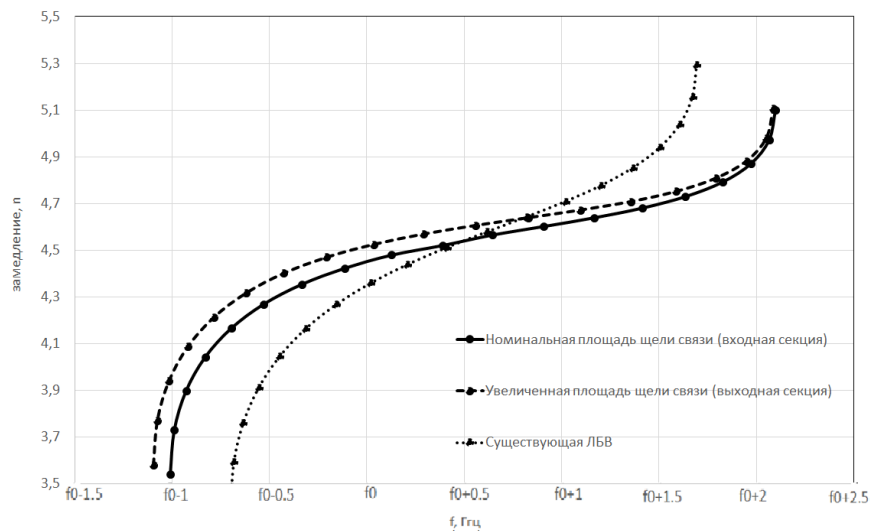


Рисунок 4. Дисперсионная характеристика однородной замедляющей системы, существующей ЛБВ в сравнении с дисперсионными характеристиками участков замедляющей системы перспективной ЛБВ.

4. Оценка сопоставимости расчётных результатов и экспериментальных данных

Для оценки достоверности результатов расчёта дисперсионных характеристик при помощи современного САПР был спроектирован и собран макет (рисунок 5) для измерения электродинамических характеристик. Макет представляет собой отрезок ЗС из 16 однородных резонаторов. Торцы макета, то есть щели связи и пролётный канал, фиксировались короткозамыкателем. Для возбуждения стоячей волны в системе использовался зонд с индуктивной петлей связи, вводимый через специальное отверстие в одном из короткозамыкателей и расположенное в районе щели связи резонаторов макета ЗС. Измерения полученного двухполосника проводились в нормальных условиях, в режиме «холодных» панорамных измерений на панорамном измерителе КСВ и затухания P2M-18A. Частоты «провалов» на общей картине КСВН соответствовали собственным резонансным частотам, возбуждаемым в ЗС с соответствующими фазовыми сдвигами (рисунок 6) [4]. По полученным значениям были построены дисперсионные характеристики резонаторов, результаты расчетных и экспериментальных дисперсионных характеристик сопоставлены и приведены на рисунках 7-8.



Рисунок 5. Макет ЗС, для «холодных» измерений электродинамических характеристик, в сборе.

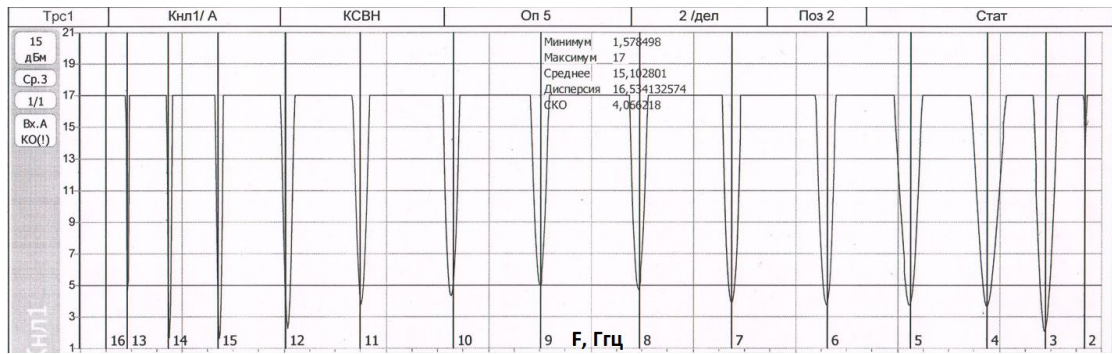


Рисунок 6. Общая картина КСВН

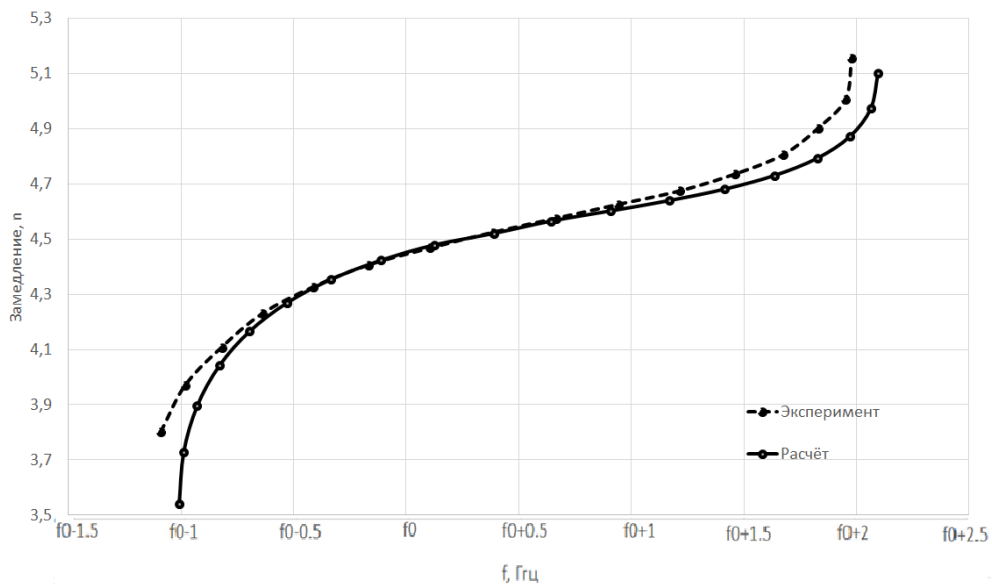


Рисунок 7. Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов дисперсионных характеристик входного участка замедляющей системы мощной ЛБВ.

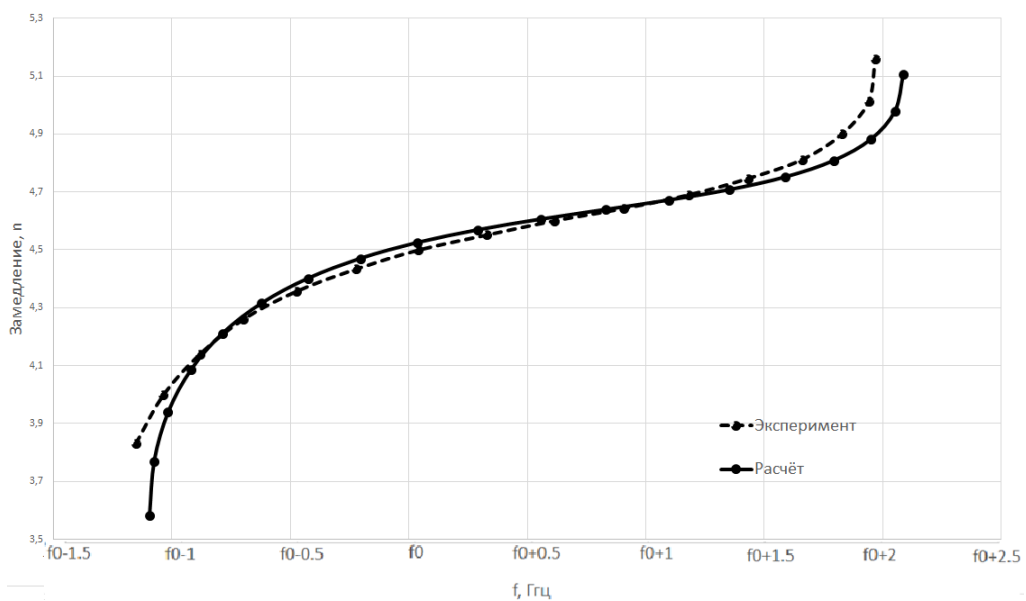


Рисунок 8. Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов дисперсионных характеристик выходного участка замедляющей системы мощной ЛБВ.

Построенная по экспериментальным данным дисперсионная характеристика замедляющей системы типа «цепочка связанных резонаторов» соответствует расчетным данным с высокой точностью. Максимальное расхождение в рабочем диапазоне по частоте не превосходит 0,1%.

5. Заключение

Проведенные расчёты входного и выходного участков пространства взаимодействия мощной ЛБВ с замедляющей системой на ЦСР позволили подобрать оптимальную конфигурацию резонаторов неоднородной ЗС, обеспечивающих практически одинаковое замедление в основной полосе пропускания и существенное разнесение полос пропускания щелевых мод, что должно обеспечить необходимую устойчивость к самовозбуждению ЛБВ.

Результаты расчетов подтверждены «холодными» измерениями, при этом обеспечена необходимая для инженерных расчетов точность. Это позволит в дальнейшем не прибегать к макетированию и значительно сократить время на дополнительную оптимизацию конструкции ЗС.

Кроме этого результаты расчетов показывают принципиальную возможность создания мощной ЛБВ с замедляющей системой на ЦСР с полосой рабочих частот 15% и более.

Список литературы

1. Dassault Systemes. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
2. Aloisio M., Waller P. Analysis of helical slow-wave structures for space TWTs using 3-D electromagnetic simulators //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2005. – Т. 52. – №. 5. – С. 749-754.
3. Kory C. L., Dayton J. A. Effect of helical slow-wave circuit variations on TWT cold-test characteristics //IEEE Transactions on Electron Devices. – 1998. – Т. 45. – №. 4. – С. 972-976.
4. ЛАЗЕРСОН А. Г., ШУЛЬМАН Л. И. Способ измерения дисперсионных характеристик замедляющих систем. – 1982.