УДК 621.385.632

Исследование лампы бегущей волны с неоднородной замедляющей системой типа «цепочка связанных резонаторов» с шириной рабочей полосы частот более 1ГГц и выходной импульсной мощностью более 20 кВт

С.А. Нефедов[1], Н.В. Ржевин[1,2]

[1]АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
[2]Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования лампы бегущей волны (ЛБВ) с широкой полосой рабочих частот. В конструкции использована неоднородная
замедляющая система, обеспечивающая эффективное взаимодействие с электронным пучком. Основное внимание уделено анализу характеристик усиления, выходной мощности. В ходе экспериментов была получена выходная импульсная мощность более 20 кВт в полосе 1 ГГц X-диапазона частот, что подтверждает высокую эффективность конструкции.

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

1. Введение

Лампы бегущей волны с замедляющими системами типа «цепочка связанных резонаторов» (ЦСР) являются ключевым компонентом СВЧ-техники среднего и высокого уровня мощности, применяемым в различных системах, включая радиолокацию.

Предъявляемые требования для совершенствования радиолокационных систем различного назначения, нуждаются постоянном совершенствование систем параметров ЛБВ. В первую очередь расширение полосы рабочих частот, максимальное увеличение минимальной наработки до отказа, снижение энергопотребления. Оптимальным решением для ЛБВ с высоким уровнем импульсной мощности (10 кВт и более) с точки зрения обеспечения максимально достижимой ширины рабочей полосы при высоком электронном КПД является применение односекционной («прозрачной») замедляющей системы на цепочке связанных резонаторов с невысоким усилением (10 - 12 дБ).

Основной задачей при решении данного вопроса является определение конфигурации пространства взаимодействия.

Однако мощные односекционные ЛБВ на ЦСР не позволяют выйти на значения ширины рабочей полосы 12 - 15% из-за потери устойчивости на границах щелевой полосы пропускания при существенном расширении холодной полосы рабочей моды. При этом повышение электронного КПД взаимодействия и расширение рабочей полосы частот существенно усугубляют потерю устойчивости по щелевой моде из-за роста доли замедленных электронов в пучке. Как средство расширения рабочей полосы, а также повышения устойчивости к самовозбуждению [1] было применено разбиение односекционной замедляющей системы на участки имеющие одинаковые частоты отсечки для рабочей полосы, но с разнесением граничных частот для щелевой

моды.

В ходе эксперимента была получена импульсная выходная мощность 20 кВт при ширине рабочей полосы 1 ГГц, что подтверждает высокую эффективность предложенной конструкции.

2. Подбор конструкции пространства взаимодействия макета

Для подбора конструкции пространства взаимодействия макета были рассчитаны в CST Studio [2] дисперсионные характеристики резонаторов для двух секций. При моделировании корректировка геометрии осуществлялась таким образом, чтобы обеспечивалось примерно одинаковое замедление в основной полосе пропускания при разнесении граничных частот щелевых мод. Результаты расчётов приведены на рисунке 2-3. По результатам расчётов была разработана и выпущена конструкторская документация (КД) на неоднородную замедляющую систему типа цепочка связанных резонаторов для мощной «прозрачной» ЛБВ, состоящая из двух участков, содержащих одинаковое количество резонаторов. Эскиз ЗС представлен на рисунке 4. С собранной по данной КД замедляющей системой был изготовлен макет ЛБВ.

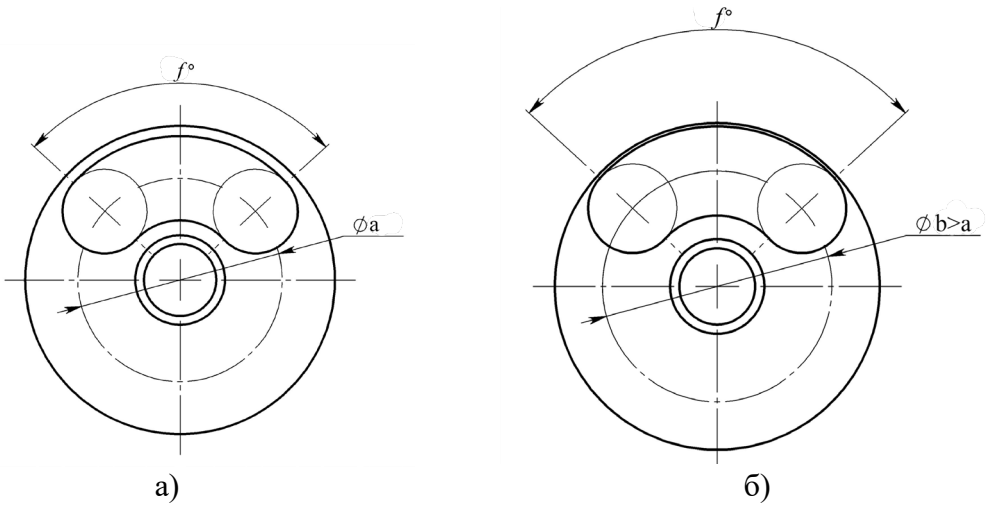

Рисунок 1. а) вариант резонатора с меньшей площадью щели связи (входная секция), б) вариант резонатора с большей площадью щели связи (выходная секция).

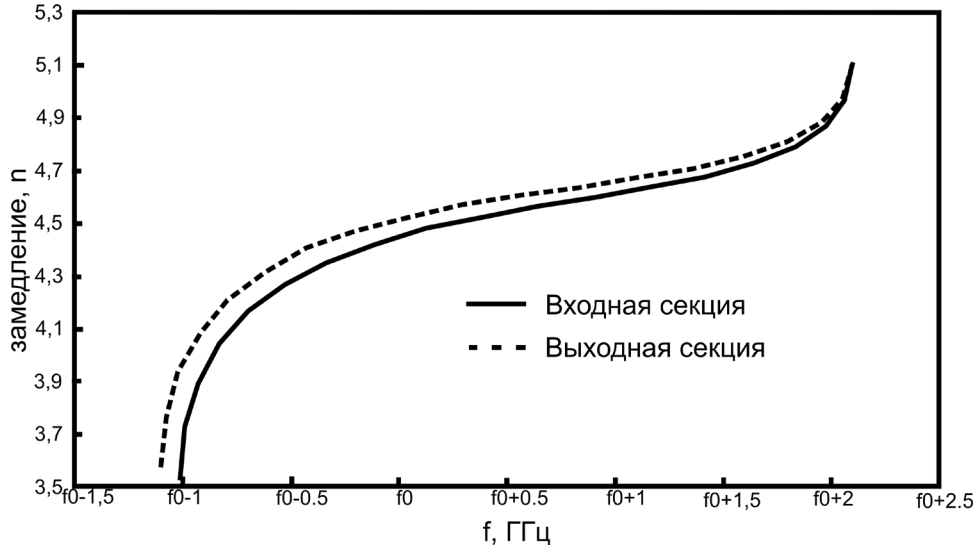

Рисунок 2. Дисперсионные характеристики участков замедляющей системы мощной ЛБВ.

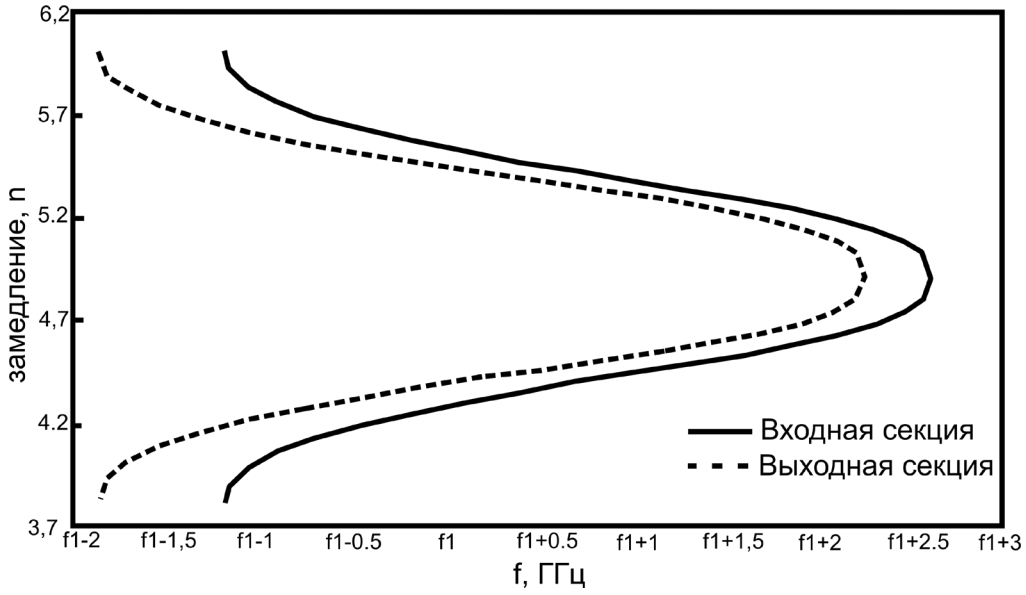

Рисунок 3. Дисперсионные характеристики щелевых мод участков замедляющей системы мощной ЛБВ на ЦСР.

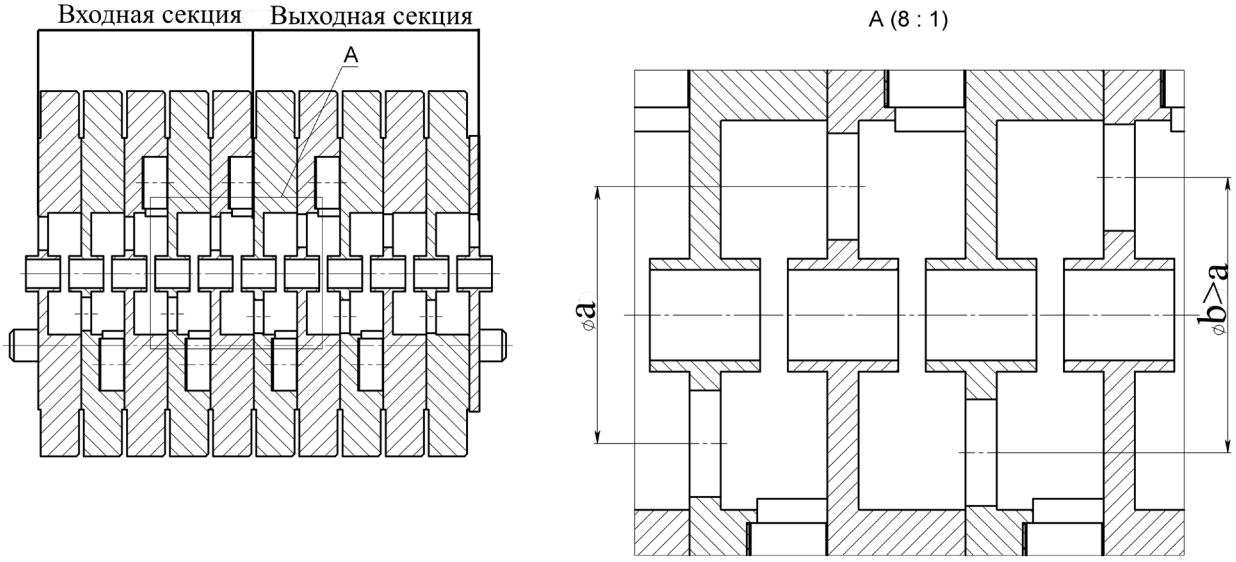

Рисунок 4. Чертёж неоднородной замедляющей системы типа цепочка связанных резонаторов.

3. Результаты измерений

На рисунках 5-7 представлены экспериментально полученные зависимости выходной мощности, КПД и коэффициента усиления от частоты. Было зафиксировано устойчивое усиление в полосе частот шириной более 1 ГГц. Максимальная импульсная выходная мощность составила 22 кВт, максимальное значение электронного КПД составляет 29% Относительно стабильная амплитудно-частотная характеристика подтверждает корректность конструкции замедляющей системы и эффективное взаимодействие с электронным пучком.

Измерения проводились в импульсном режиме на скважности 4. Рабочий ток катода макета 3.8 А при ускоряющем напряжение 20 кВ.

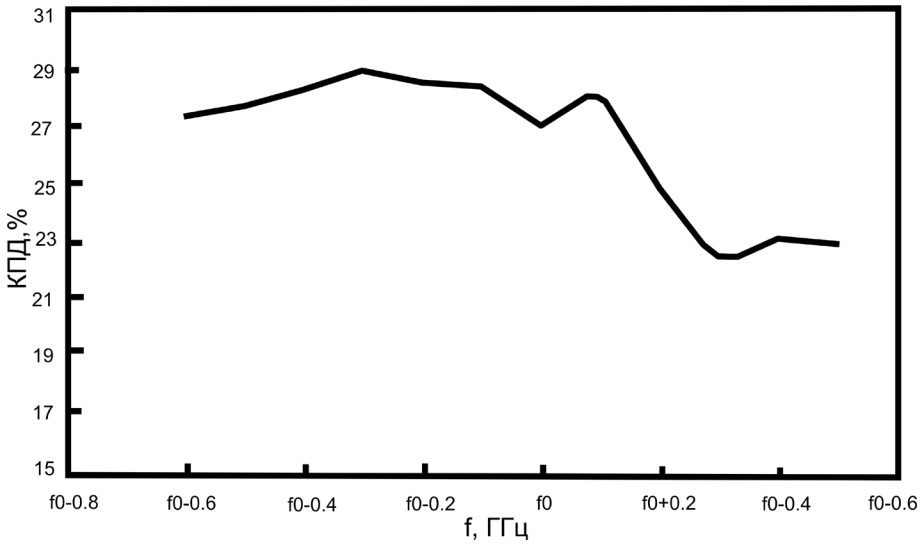

Рисунок 5. Зависимость КПД от частоты.

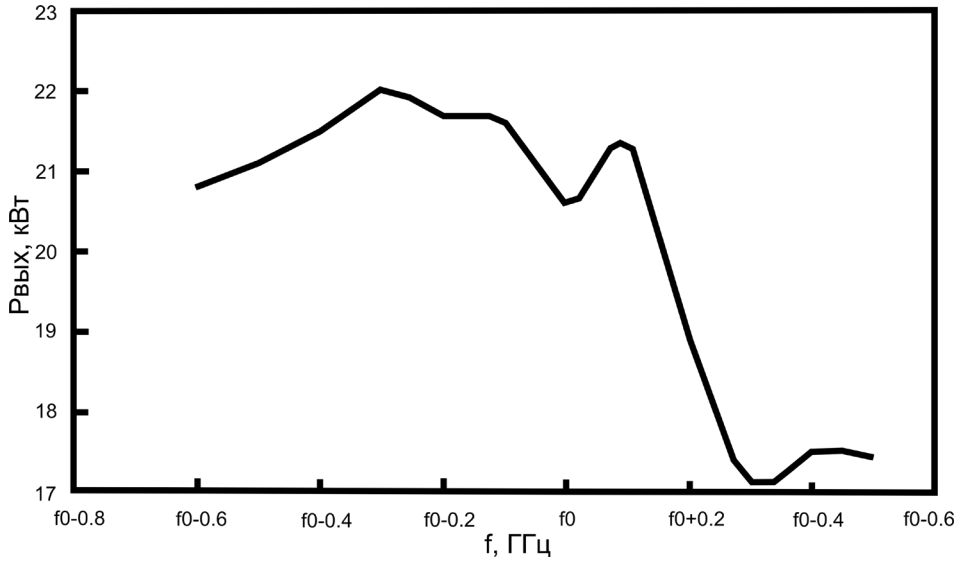

Рисунок 6. Зависимость выходной мощности от частоты.

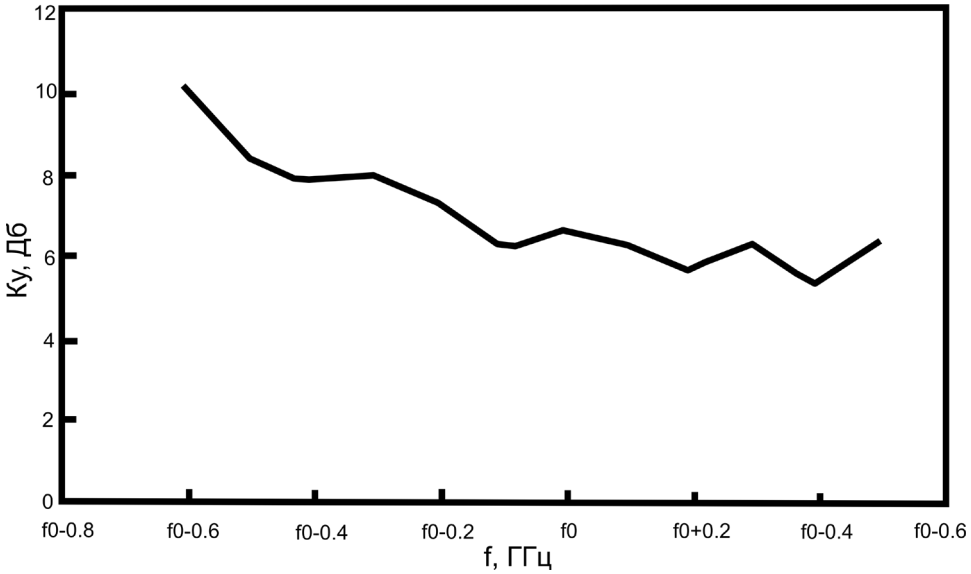

Рисунок 7. Зависимость коэффициента усиления от частоты.

Для повышения достоверности анализа и сравнения полученных результатов в таблице 1 предоставлены характеристики нескольких аналогов разрабатываемой ЛБВ. Эти данные позволяют более объективно оценить преимущества предлагаемой конструкции по критериям ширины полосы усиления и выходной мощности.

Таблица 1 - Сравнение основных параметров аналогов.

Изделие	Ширина полосы частот, МГц	Выходная имп. (средняя) мощность, кВт
Разрабатываемая ЛБВ	1000	20 (5)
Аналог 1	800	20 (5)
ET961 (Leonardo)	900	20 (0,3)
VTX-5786K (CPI)	600	15

5. Заключение

Высокая мощность и широкий диапазон частот достигнуты благодаря подбору конструкции неоднородной замедляющей системы.

Эксперимент подтвердил возможность создания ЛБВ с широкой полосой рабочих частот (1 ГГц) и высокой выходной импульсной мощностью (20 кВт). Результаты демонстрируют перспективность дальнейшей разработки таких усилителей для применения в системах связи и радиолокации.

Список литературы

1. Нефедов С.А., Поляков И.В., Ржевин Н.В. Исследование возможности повышения устойчивости к самовозбуждению лампы бегущей волны с замедляющей системой типа цепочка связанных резонаторов / "Вопросы прикладной физики" 2025 г., вып. 31. с. 10-14.
2. Dassault Systemes. URL: https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/
3. Нефедов С.А., Поляков И.В., Ржевин Н.В. Проектирование пространства взаимодействия лампы бегущей волны X-диапазона частот для перспективных радиолокационных систем/XIII Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ". Сборник докладов. Санкт-Петербург. 27 - 31 мая 2024 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 160-165 с.