

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ЛБВ ВАКУУМНО-ТВЕРДОТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ X/Ku-ДИАПАЗОНА

<sup>1</sup>Азов Г.А., <sup>1</sup>Ефремова М.В., <sup>1,2</sup>Хриткин С.А.

<sup>1</sup>ОАО «Плутон», Москва

<sup>2</sup>Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета

«Высшая школа экономики» (МИЭМ НИУ ВШЭ)

*Приводятся результаты численного моделирования замедляющей системы и электронно-оптической системы широкополосной ЛБВ непрерывного действия с выходной мощностью 250 Вт и коэффициенте усиления 23 дБ, предназначенной для использования в вакуумно-твердотельном усилительном модуле X/Ku-диапазона.*

**Ключевые слова:** лампа бегущей волны, вакуумно-твердотельный усилитель, спиральная замедляющая система, электронно-оптическая система, электронные пучки, электронные пучки.

В настоящее время одной из основных тенденций развития микроволновой электроники является создание широкополосных вакуумно-твердотельных усилительных модулей СВЧ, в которых усиление распределяется между предварительным твердотельным и мощным выходным вакуумным усилителями. Такое совместное использование твердотельного усилителя и ЛБВ в едином модуле в конечном итоге приводит к значительному улучшению ряда параметров по сравнению с использованием непосредственно ЛБВ, в том числе позволяет уменьшить размеры и массу устройства, снизить уровень шума, уменьшить неравномерность амплитудно-частотной характеристики, повысить надежность и другие. В частности, известны данные о малогабаритных широкополосных усилительных модулях СВЧ непрерывного действия с выходной мощностью 50-150 Вт, рекламируемых зарубежными фирмами такими, как L-3 Communication Corporation (США), Thales (Франция), e2V (Англия) [1]. В настоящее время предприятием «Плутон» проводится разработка компактной широкополосной ЛБВ непрерывного действия нового поколения, обеспечивающей в X/Ku-диапазоне выходную мощность 250-300 Вт при коэффициенте усиления 23-25 дБ, на базе которой в дальнейшем предполагается создать вакуумно-твердотельный усилительный модуль.

В данном докладе приводятся некоторые результаты проектирования таких основных узлов, как спиральная замедляющая система (ЗС) и электронно-оптическая система (ЭОС) разрабатываемой ЛБВ.

### Спиральная замедляющая система

При разработке мощных широкополосных ЛБВ сантиметрового диапазона на нашем предприятии используется конструктивная схема, приведенная в [2], в которой спиральная ЗС, состоящая из собственно спирали, изготовленной из молибденовой «плющенко» и трех металлокерамических опор, закрепляется во внутреннем канале пазного корпуса методом «горячей посадки» в вакууме. Использование такой конструктивной схемы позволяет за счет изменения зазора между наружной поверхностью спирали и боковыми металлическими ребрами опор управлять дисперсионной характеристикой ЗС, а также значительно улучшает теплопередачу от спирали на корпус прибора. С целью сокращения габаритов ЛБВ, а в дальнейшем и модуля в целом, проектирование замедляющей системы проводилось на рабочее напряжение 7,5 кВ, что на 25% меньше по сравнению с ЛБВ УВ-372, разработанной в начале 90-х годов. Такой переход в настоящее время оказался возможным в результате использования при проектировании изделий новых программ численного моделирования.

Расчет электродинамических характеристик (коэффициента замедления и сопротивления связи) ЗС с диаметром пролетного канала  $d=1.2$  мм проводился с использованием программ трехмерного моделирования [3]. На рис. 1 представлена модель исследуемой спиральной ЗС. Для определения электродинамических параметров рассматривается один виток спиральной ЗС с учетом периодических граничных условий на торцах. Решая задачу на собственные значения для заданного сдвига фаз  $\Delta\varphi$  на период системы (шаг спирали)  $h$ , получаем значение собственной частоты  $f$ . Коэффициент замедления  $n$  рассчитывается по формуле

$$n = \frac{c}{v_\varphi} = \frac{\beta}{k} = \frac{\Delta\varphi \cdot c}{h \cdot 2\pi f},$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

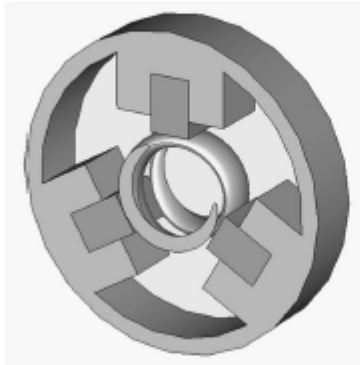


Рис. 1. Модель спиральной ЗС

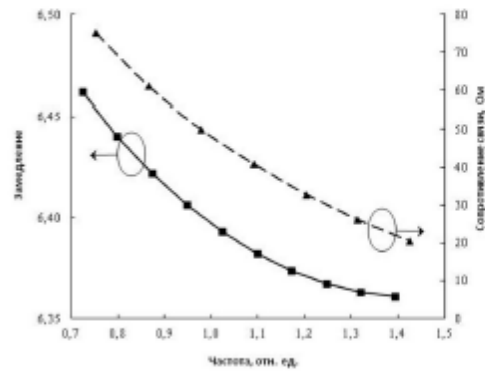


Рис. 2. Зависимости коэффициента задержки и усредненного по сечению пучка сопротивления связи от частоты ( $d_{\text{китр}}=1.2$  мм,  $h=0.89$  мм,  $\Delta=0.25$  мм)

Величина сопротивления связи определяется с помощью разложения в ряд Фурье продольной составляющей вектора напряженности электрического поля на оси спирали. Остальные параметры, входящие в выражение для расчета сопротивления связи определяются из дисперсионной характеристики ЗС.

На рис. 2 приведены результаты расчета коэффициента задержки исследуемой спиральной замедляющей системы, а также даны рассчитанные зависимости усредненного по сечению пучка сопротивления связи от частоты.

Расчет пространства взаимодействия с распределением шага спирали и удельного затухания, вносимого локальным поглотителем (рис. 3), осуществлялся с помощью разработанной на предприятии программы HelixTWT [4], основанной на использовании метода крупных частиц в рамках одномерной дисковой модели.

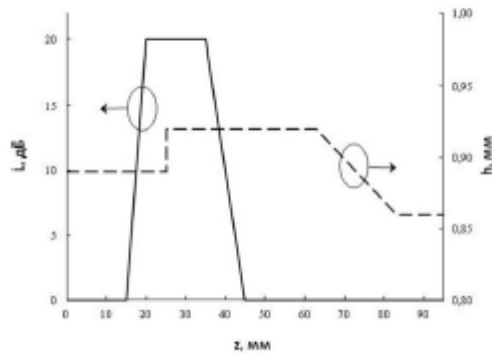


Рис. 3. Распределения шага спирали и затухания, вносимого локальным поглотителем по длине ЗС

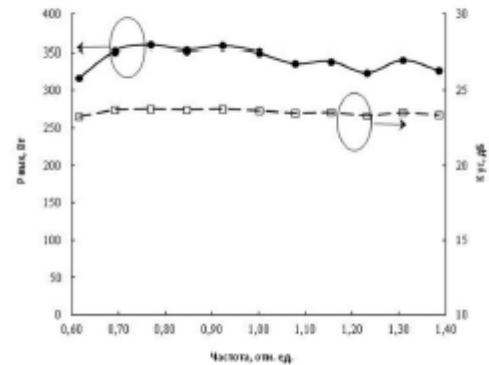


Рис. 4. Расчетные зависимости уровня выходной мощности и коэффициента усиления от частоты ( $U_0=7.5$  кВ,  $I_0=0.26$  А,  $P_{\text{вх}}=1.5$  Вт)

Приведенные на рис. 4 расчетные зависимости уровня выходной мощности и коэффициента усиления от частоты при токе электронного пучка  $I=260$  мА, ускоряющем напряжении  $U=7500$  В и при входном сигнале мощностью  $P=1.5$  Вт удовлетворяют требованиям поставленной задачи.

#### Электронно-оптическая система

При проектировании ЭОС разрабатываемой ЛБВ в качестве основы была выбрана электронная пушка с диаметром катода  $D=4.5$  мм, формирующая электронный поток с первенсом  $P=0.4$  мкА/В<sup>3/2</sup> в пролетном канале 1.45 мм при напряжении 9.5-10 кВ.

Основные параметры электронной пушки и магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) проектируемой ЛБВ представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры электронной пушки и МПФС

Ток пучка	260 мА
Ускоряющий потенциал	7500 В
Радиус пролетного канала	0,6 мм
Компрессия пучка по площади	56
Амплитуда поля в МПФС	280 мТ
Период МПФС	7,5 мм
Параметр магнитного поля	0,16

В связи с необходимостью получения пучка со средним радиусом  $R=0,3$  мм в пролетном канале при компрессии пучка по площади  $S=56$  расчет электронно-оптической системы проводился по программе численного моделирования как без учета, так и с учетом влияния начальных тепловых скоростей электронов.

При расчете параметров ЭОС без учета поперечных скоростей значение радиуса пучка в кроссовере по отношению к радиусу пролетного канала составляет величину равную 0,6. При амплитуде магнитного поля МПФС  $B = 2800$  Гс средний радиус пучка в пролетном канале составил  $R = 0,25$  мм, что соответствует коэффициенту заполнения 0,42 (рис. 5).

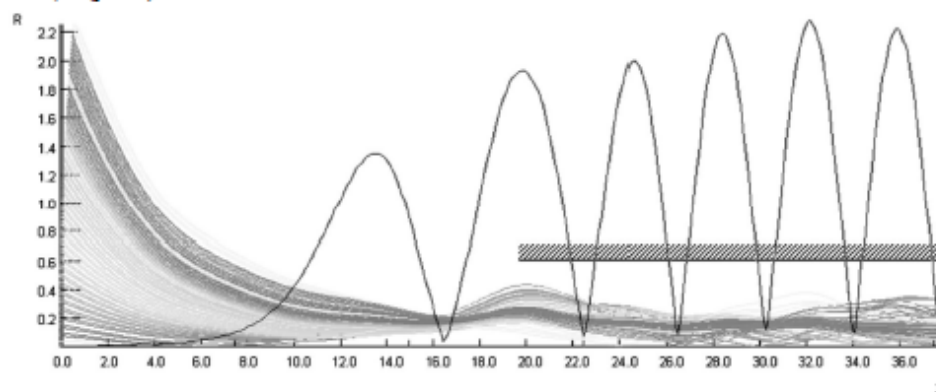


Рис. 5. Контур пучка в магнитном поле без учета начальных тепловых скоростей электронов

Однако расчет контура пучка с учетом поперечных составляющих скоростей показал, что влияние тепловых скоростей при данных параметрах ЭОС приводит к изменению радиуса пучка в кроссовере на 30% и расположения плоскости кроссовера на 12% и, соответственно, к значительному расширению пучка в пролетном канале.

Оптимизация амплитуды магнитного поля в переходной области МПФС позволила несколько уменьшить радиус пучка в пролетном канале. При этом величина коэффициента заполнения пучком пролетного канала составляла 0,7, что значительно превышало величину, оговоренную при постановке задачи.

Для уменьшения расплывания пучка под действием тепловых скоростей было предложено снизить компрессию за счет уменьшения диаметра катода на 10%. В результате корректировки размеров электродов пушки коэффициент заполнения пучком пролетного канала составил 0,6 (рис. 6).

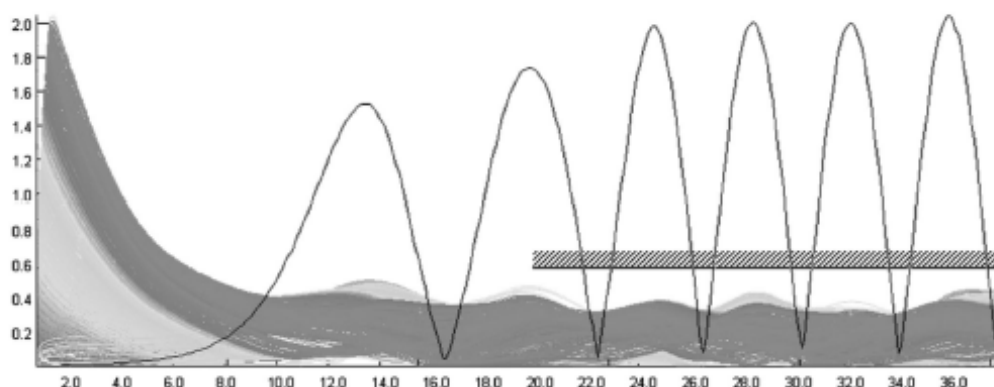


Рис. 6. Контур пучка с уменьшенным диаметром катода ( $D=4$  мм) и скорректированным магнитным полем

По результатам проведенных расчетов изготовлен и испытан макет разрабатываемой ЛБВ. Полученные первые экспериментальные результаты измерений его параметров:

токопрохождение в статическом режиме составило 98,5% ( $I_{\text{min}}=260$  мА,  $I_{\text{ЭС}}=3,5$  мА);

токопрохождение в режиме усиления составило 97% ( $I_{\text{min}}=254$  мА,  $I_{\text{ЭС}}=7,5$  мА);

выходная мощность в средней части исследуемого диапазона около 220 Вт.

#### Заключение

Проведено численное моделирование основных узлов мощной широкополосной ЛБВ непрерывного действия, предназначенной для использования в вакуумно-твердотельном усилительном модуле X/Ku-диапазона. Представлены результаты расчета основных электродинамических характеристик замедляющей системы (зависимости замедления и сопротивления связи от частоты) и параметров электронно-оптической системы, полученные с помощью программ трехмерного моделирования. Показано, что при моделировании электронных пучков, формирующих высокоперевансные пучки с большой компрессией, необходимо учитывать влияние начальных тепловых скоростей электронов. Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

#### Список используемой литературы

1. МРМ-модули в докладах международной конференции IVEC-2012. // Новости СВЧ-техники. 2012. №8. С. 4.
2. Азов Г.А., Райс Ю.Э., Тихомиров С.А. //Проблемы машиностроения и автоматизации. 2001. №4. С. 80.
3. Азов Г.А., Хриткин С.А. //Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 3. С. 369.
4. Азов Г.А., Хриткин С.А. //Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 6. С. 686.

## ДИСКРЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КЛИСТРОНА И МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Байков А.Ю\*, Грушина О.А.\*\*

\*Московский финансово-юридический университет МФЮА,

\*\*НИИЯУ МИФИ

*Рассматривается дискретно-аналитическая модель клистрона, программный комплекс KurWin на ее основе, а также методы многопараметрической оптимизации, позволяющие эффективно находить глобальный экстремум в сверхмногоэкстремальных задачах с количеством локальных экстремумов 10 в 12-й степени и более.*