

УДК

Оптимизация конструкции спиральной замедляющей системы для ЛБВ в X-, Ku- и K-диапазонах частот

И.А. Чистяков^{1,2}, В.И. Роговин^{1,2}

¹АО «НПП «Алмаз»

²СГУ им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: в данной работе рассмотрены особенности оптимизации конструкции спиральной замедляющей системы (СЗС) для ЛБВ в X-, Ku- и K-диапазонах частот. В X-диапазоне для получения высоких КПД допускается использование стержней из BeO прямоугольной конфигурации. Отражены преимущества использования T-образных профилированных стержней в Ku- и K-диапазонах частот. Получено оптимальное соотношение между диаметром экрана и пролетного канала для ЛБВ Ku-диапазона. Показаны преимущества прямоугольных стержней из NB.

Ключевые слова: электродинамические характеристики, СЗС, ЛБВ, X-диапазон, Ku-диапазон, K-диапазон.

1. Введение

В последнее время проявляется повышенный интерес к развитию систем космической связи, локации, навигации, что в свою очередь вызывает значительный рост исследований и разработок усилителей СВЧ, одним из основных элементов которых является лампа бегущей волны (ЛБВ). Наибольшее применение в настоящее время ЛБВ для космических спутниковых систем находят в X-, Ku и K-диапазонах.

Как известно, одной из основных задач при проектировании спиральных замедляющих систем (СЗС) для ЛБВ является определение оптимальной конфигурации ВЧ-пакета для наиболее эффективного усиления СВЧ-сигнала в выбранном диапазоне частот.

На первом этапе проектирования приближенно определяются основные размеры СЗС, чтобы обеспечить значения обобщенного параметра спирали $\gamma_{\text{св}}$ от 0.9 до 1.2, отношения ширины спирали к шагу $W_{\text{спир}}/h$ от 0.35 до 0.45, а также отношение диаметра экрана к диаметру канала $D_{\text{э}}/D_{\text{к}}$ от 2 до 3 единиц.

В работе осуществлена оптимизация электродинамических характеристик (ЭДХ) СЗС в современных программных пакетах ANSYS Electronics Suite (HFSS) [1] и CST Microwave Studio (CST) [2].

2. Описание программных пакетов расчёта ЭДХ

На сегодня, одними из наиболее используемых программ расчёта ЭДХ являются HFSS и CST.

Моделирование в этих программах основано на встроенных модулях поиска собственных видов колебаний замкнутых структур и осуществляется путем решения дифференциальной формы 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 [3-4]. Для полученного резонатора решается задача на собственные значения, определяются резонансные частоты, по которым в дальнейшем вычисляются

требуемые ЭДХ.

3. Подбор оптимальной конфигурации ВЧ-пакета СЗС в X-, Ku и K-диапазоне

Для рассматриваемых диапазонов частот и выходной мощности на уровне 150 Вт выбраны производственно-ориентированные варианты ВЧ-пакета с СЗС типа спираль в гладком медном экране, спираль представляет собой плющенную микроленту с прямоугольным поперечным сечением из сплава МАГТ-02 (медь – 99.98%, алюминий, гафний, титан – 0.02%) и поддерживается тремя диэлектрическими опорными стержнями различной конфигурации. Рассмотрены стержни из оксида бериллия BeO (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 6.8$) и нитрида бора NB (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 4.8$).

В оптимизации использовались пролетные каналы диаметрами от 0.8 до 1.4 мм, комбинированные экраны от 2.5 до 5.0 мм, диэлектрические опорные стержни: прямоугольные с шириной от 0.2 до 0.4 мм, Т-образные с размерами от 0.2 до 0.3 мм у спирали и 0.45 – 0.60 мм у экрана, трапецеидальные стержни с шириной 0.2 мм у спирали и углом расхождения 15° , микроленты прямоугольного сечения 0.10×0.20 мм, 0.10×0.25 мм, 0.15×0.25 мм.

В таблице 1 представлены соотношения для обобщенного параметра спирали, отношения ширины спирали к шагу и отношения диаметра экрана к каналу для вариантов конфигурации ВЧ-пакетов различных диапазонов.

Таблица 1. Первоначальная конфигурация

	X-диапазон	Ku-диапазон	K-диапазон
γ_{ca}	0.66	1.18	1.20
$W_{спир}/h$	0.31	0.44	0.43
$D_э/D_к$	3.20	2.80	3.13

Следует отметить, что основным критерием выбора оптимальной конфигурации ВЧ-пакета является минимизация распределенных ВЧ-потерь (затухания α) и увеличение сопротивления связи ($R_{связи}$). Расчёты для каждого варианта СЗС проведены при строгом соблюдении резонансной частоты и уровня замедления.

На рисунке 1 изображено поперечное сечение рассматриваемых вариантов конструкции ЗС.

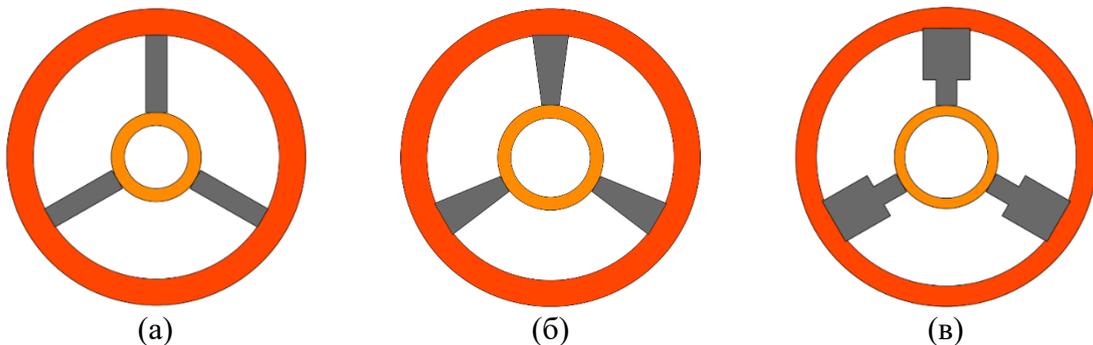


Рисунок 1. Первоначальный вариант поперечного сечения СЗС для ЛБВ, где (а) – прямоугольные стержни, (б) – трапецеидальные стержни, (в) – Т-образные стержни

Ограничения размеров поперечного сечения плющенной микроленты обусловлены теплорассеивающей способностью СЗС. Любое увеличение размеров, при заданном ускоряющем напряжении и диаметрах пролетного канала и экрана приводят к увеличению распределенных потерь и уменьшению сопротивления связи. Показано, что использование микроленты сечением 0.10×0.20 мм дает 15% прирост по

сопротивлению связи относительно других типоразмеров.

На рис. 2 представлена гистограмма рассматриваемых вариантов конструкции ВЧ-пакета для ЛБВ X-диапазона.

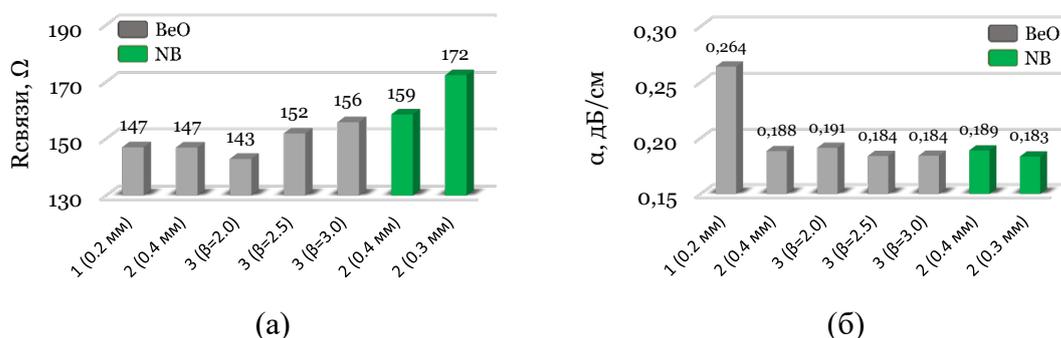


Рисунок 2. Гистограмма (а) сопротивления связи и (б) распределенных ВЧ потерь для СЗС X-диапазона в зависимости от конфигурации и материала диэлектрических опорных стержней, где 1 – трапецидальные стержни; 2 – прямоугольные; 3 – Т-образные; β – отношение высоты ножки стержня у основания спирали к ширине; в скобках указана ширина стержня у спирали

Результаты расчётов проведенных вариантов конфигурации, представленные на рис. 2 показали, что использование Т-образных профилированных стержней ВеО обеспечивают прирост сопротивления связи на 6.1%. Прямоугольные стержни из NB с толщиной 0.4 и 0.3 мм увеличивают сопротивление связи на 8 и 17% относительно ВеО соответственно. В X-диапазоне прирост сопротивления связи и уменьшение распределенных потерь невелики с переходом Т-образные варианты опорных стержней, поэтому для получения высоких КПД допускается использование прямоугольных стержней с толщиной 0.4 мм из ВеО.

Для Ку-диапазона анализировалось влияние диаметров пролетного канала и экрана на сопротивление связи (рис. 3 (а)) и распределенное затухание (рис. 3 (б)).

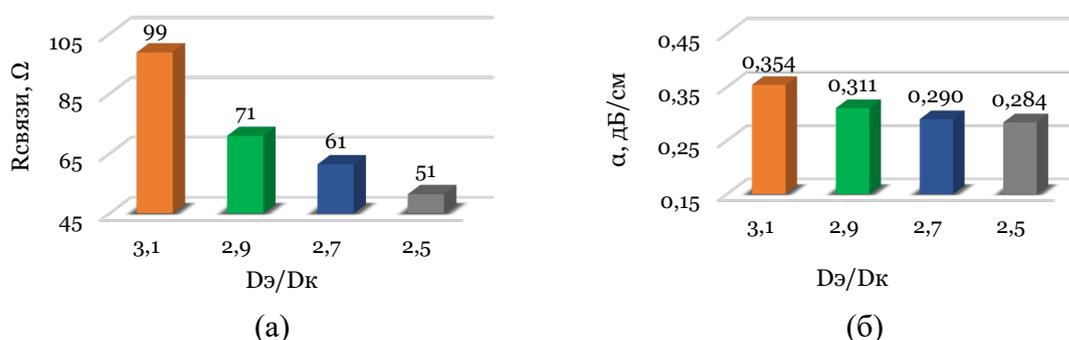
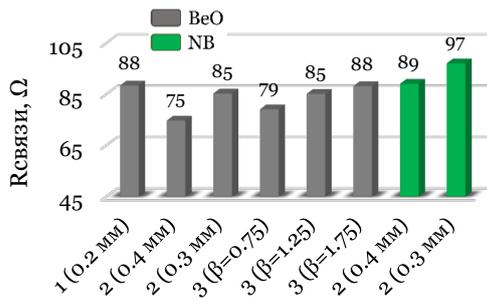


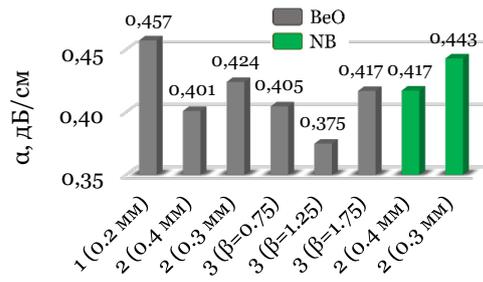
Рисунок 3. Гистограмма (а) сопротивления связи и (б) распределенных ВЧ потерь для СЗС Ку-диапазона в зависимости от отношения диаметров экрана и пролетного канала

Оптимизация диаметров пролетного канала и экрана, представленная на рис. 3, показала прирост сопротивления связи на 92.2%, однако распределенное затухание увеличилось на 24.6% относительно первоначального варианта.

На рис. 4 показана поэтапная оптимизация конструкции опорных стержней для ЛБВ Ку-диапазона частот.



(a)

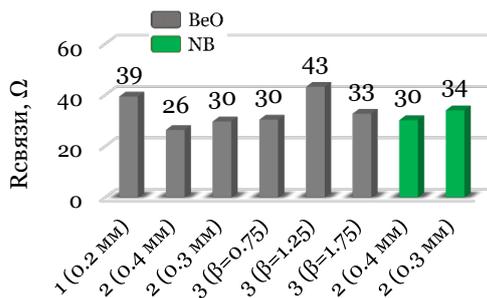


(б)

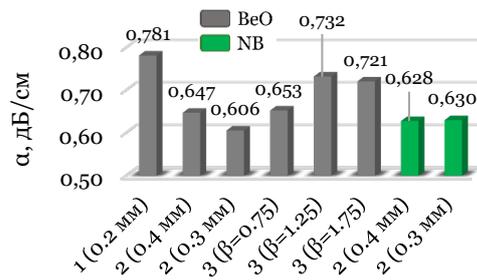
Рисунок 4. Гистограмма (а) сопротивления связи и (б) распределенных ВЧ потерь для СЗС Ку-диапазона в зависимости от конфигурации и материала диэлектрических опорных стержней, где 1 – трапецидальные стержни; 2 – прямоугольные; 3 – Т-образные; β – отношение высоты ножки стержня у основания спирали к ширине; в скобках указана ширина стержня у спирали

В Ку-диапазоне использование Т-образных профилированных стержней из ВеО позволяет увеличить сопротивление связи на 17.3%. Прямоугольные стержни из NB с предельно допустимой толщиной обеспечивают прирост по сопротивлению связи 29.3% и увеличивают распределенное затухание не более чем на 10%.

На рис. 5 представлено сопоставление вариантов конструкций СЗС для ЛБВ К-диапазона.



(a)



(б)

Рисунок 5. Гистограмма (а) сопротивления связи и (б) распределенных ВЧ потерь для СЗС К-диапазона в зависимости от конфигурации и материала диэлектрических опорных стержней, где 1 – трапецидальные стержни; 2 – прямоугольные; 3 – Т-образные; β – отношение высоты ножки стержня у основания спирали к ширине; в скобках указана ширина стержня у спирали

Исходя из полученных результатов видно, что в К-диапазоне наибольший прирост по сопротивлению связи дает конструкция на Т-образных стержнях из ВеО с $\beta=1.25$.

3. Заключение

Проведенные исследования показывают, что оптимальным по выходным параметрам, с учетом сложности производственных процессов изготовления СЗС, в Х – диапазоне является использование стержней из ВеО прямоугольной формы. В Ку- и К – диапазоне целесообразно использование стержней Т-образной формы. Стержни из NB имеют преимущество, однако их теплорассеивающая способность ниже, чем у ВеО.

Список литературы

1. CADFEM. URL: <https://www.cadferm-cis.ru/products/ansys/electronics/electronics-desktop/>
2. Dassault Systemes. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
3. M. Aloisio and P. Waller, "Analysis of helical slow-wave structures for space TWTs using 3-D electromagnetic simulators," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 52, no. 5, pp. 749-754, May 2005, doi: 10.1109/TED.2005.845866.
4. C. L. Kory and J. A. Dayton, "Effect of helical slow-wave circuit variations on TWT cold-test characteristics," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 45, no. 4, pp. 972-976, April 1998, doi: 10.1109/16.662813.