СПИРАЛЬНАЯ ЛБВ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА: МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ

Г.Азов, к.т.н., Э.Ганеев, С.Хриткин, к.т.н. g.azov@pluton.msk.ru

Лампы бегущей волны (ЛБВ) непрерывного действия сантиметрового диапазона длин волн широко используются в качестве выходных усилителей передающих устройств радиоэлектронной аппаратуры разного назначения. В ОАО "Плутон" разработаны методы проектирования, позволяющие создавать ЛБВ с различными характеристиками. О методах и результатах их применения для проектирования мощных ЛБВ сантиметрового диапазона со спиральными замедляющими системами рассказывается в статье.

КОНСТРУКЦИЯ СПИРАЛЬНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МОЩНОЙ ЛБВ

Один из основных узлов ЛБВ – замедляющая система (ЗС). Ее конструкция во многом определяет эффективность взаимодействия электронов с замедленной электромагнитной волной. Предприятием "Плутон" создана базовая конструкция спиральной ЗС (рис.1), позволяющая разрабатывать устройства, которые эффективно усиливают СВЧ-сигналы сантиметрового диапазона в полосах частот различной ширины и обеспечивают выходную мощность 300–600 Вт [1]. Она включает в себя спираль, изготовленную из проволоки тугоплавкого металла с сечением, близким к прямоугольному (плющенки), и три металлокерамические комбинированные опоры спирали. Собранная ЗС устанавливается в корпус методом "горячей посадки" в вакууме, при этом обеспечивается ее закрепление с натягом 0,04–0,05 мм.



Рис.1. Конструкция спиральной ЗС мощной ЛБВ

Комбинированные опоры спирали (рис.2) состоят из керамического стержня прямоугольного сечения и металлического держателя, соединенных между собой посредством термокомпрессионной сварки. Держатель опоры имеет внутренний паз, предназначенный для размещения керамического стержня, а его боковые поверхности представляют собой элементы, создающие продольную проводимость в системе.

При изменении высоты боковых металлических поверхностей опоры I_г и неизменной ее общей высоте, что эквивалентно изменению зазора ∆ между наружной поверхностью спирали и элементами, создающими продольную проводимость в системе, обеспечивается возможность эффективного управления дисперсионной характеристикой 3С. Это важно для создания широкополосных ЛБВ, работающих в октавной и более широких полосах частот [1–5].





Кроме того, в результате использования опоры такой конструкции совместно с горячей посадкой 3С в корпус ЛБВ формируются значительно лучшие тепловые контакты между элементами, входящими в 3С, чем в обычных конструкциях 3С, собранных с применением чисто керамических опор и закрепленных путем упругой или термической деформации корпуса. Благодаря этому улучшается теплопередача от спирали на корпус устройства, что позволяет создавать широкополосные ЛБВ с выходной мощностью в несколько сотен ватт в непрерывном режиме.

Подробно особенности описанной конструкции 3С и ее преимущества по сравнению с другими конструкциями спиральных 3С, используемыми в мощных широкополосных ЛБВ, изложены в [1].

Целью данной работы стала разработка ЛБВ непрерывного действия с выходной мощностью 400 Вт и коэффициентом усиления не менее 30 дБ в диапазоне частот 5700–7300 МГц, в которой используется вышеописанная 3С. Для этого были выполнены численное моделирование пространства взаимодействия ЛБВ и сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ

В ходе работы по проектированию спиральной 3С использовались программы трехмерного моделирования СВЧ-структур. Для определения электродинамических параметров при трехмерном моделировании, учитывая периодичность 3С, рассматривается отрезок электродинамической структуры длиной, равной шагу спирали h и, следовательно, соответствующий одному периоду 3С, с периодическими граничными условиями и заданным фазовым сдвигом дф высокочастотного



Рис.3. Зависимости коэффициента замедления (синяя линия) и сопротивления связи на оси спиральной замедляющей системы (оранжевая линия) от частоты

поля на его торцах [6, 7]. Для полученного таким образом резонатора решается задача на собственные значения, позволяющая определить его резонансные частоты. Значение низшей резонансной частоты f, соответствующее заданному сдвигу фаз, дает возможность найти величину коэффициента замедления п основной пространственной гармоники:

$$1 = \frac{c}{v_{\phi}} = \frac{\beta}{k} = \frac{\Delta \phi \cdot c}{h \cdot 2\pi f},$$

где с – скорость света в вакууме, v_φ – фазовая скорость электромагнитной волны, β – фазовая постоянная замедленной волны, k – волновое число.

Сопротивление связи основной пространственной гармоники дается выражением:

$$R_{CB} = \frac{|E|^2}{2\beta^2 P}$$

где E – амплитуда напряженности электрического поля основной пространственной гармоники, определяемая разложением в ряд Фурье распределения продольной компоненты электрического поля на оси спирали,

 $P = v_{rp} \frac{W}{h}$ – средний по времени поток энергии волны

основной пространственной гармоники, зависящий от групповой скорости v_{гр} распространения волны и энергии W, запасенной на периоде 3С. Величина групповой скорости определяется дисперсионной характеристикой замедляющей системы β(ω):

$$v_{rp} = \frac{d\omega}{d\beta}.$$

На основе приведенных уравнений были получены зависимости коэффициента замедления и сопротивления связи от частоты (рис.3) для спиральной 3С со следующими характеристиками (обозначения соответствуют рис.1 и 2):

- диаметр пролетного канала d_{внутр}: 2,7 мм;
- шаг спирали входной секции h: 1,68 мм;
- диаметр экрана d_к: 6,2 мм;
- поперечные размеры диэлектрического стержня из BeO w_q×l_q: 0,8×1,1 мм;
- зазор между наружной поверхностью спирали и продольным ребром экрана Δ: 0,8 мм;
- поперечные размеры проводника спирали: 0,8×0,225 мм.

Из рис.3 видно, что рассматриваемая спиральная 3С в диапазоне частот 5,7–7,3 ГГц обеспечивает замедление электромагнитной волны, равное 6,48–6,55, и величину сопротивления связи на оси системы, характеризующую эффективность взаимодействия, в пределах 40–23 Ом. Полученные результаты расчета спиральной 3С были использованы для численного моделирования пространства взаимодействия спиральной ЛБВ с целью определения ее выходных характеристик. Для этого применялась методика на основе метода крупных частиц и эквивалентного описания электродинамической системы в рамках нелинейной теории. Метод позволяет совместно решать уравнения возбуждения волн в замедляющей системе и уравнения движения крупных частиц [8]. Процессы взаимодействия рассматриваются с учетом двух временных гармоник высокочастотного поля, возбуждаемых в ЛБВ.

Уравнения возбуждения замедляющей системы высокочастотным током электронного пучка на основной ω и удвоенной 2 ω частотах имеют вид:

$$\frac{dF_1}{d\theta} + jr_1F_1 = -(1+b_1C)^2 J_1,$$

$$\frac{dF_2}{d\theta} + j2r_2F_2 = -4(1+b_2C)^2 \frac{R_{cB2}}{R_{cB1}} J_2,$$
(1)

где θ=β_eCz – безразмерная координата по длине ЛБВ,

z – размерная координата, C = $\left(\frac{I_0}{4U_0}R_{CB1}\right)^{\frac{1}{3}}$ – параметр уси-

ления Пирса, I₀ – ток пучка, $\beta_e = \omega/v_0$, v_0 – скорость частиц в немодулированном электронном потоке, определяемая ускоряющим напряжением U₀, $r_1 = b_1 - jd_1$, $r_2 = b_2 - jd_2$, b_1 , b_2 – параметры несинхронности, d_1 и d_2 – параметры затухания, R_{cB1} и R_{cB2} – сопротивления связи



Рис.4. Интерфейс программы численного моделирования пространства взаимодействия спиральных ЛБВ

на частотах ω и 2ω, F₁ и F₂ – безразмерные медленно меняющиеся амплитуды напряженности высокочастотного поля первой и второй гармоник, J₁ и J₂ – нормированные комплексные амплитуды первой и второй гармоник тока пучка.

Амплитуды гармоник тока электронного пучка определяются соотношением:

$$J_{k} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{2\pi} e^{-jk\Phi} d(\omega t_{0})$$
⁽²⁾

и вычисляются с помощью фаз крупных частиц Ф, определяемых из решения уравнений движения:

$$\frac{d^{2}\Phi}{d\theta^{2}} = -\left(1 + C\frac{d\Phi}{d\theta}\right)^{3} \times \\ \times \operatorname{Re}\left(F_{1}\exp(j\Phi) + F_{2}\exp(j2\Phi) + j\left(\frac{\omega_{p}}{\omega C}\right)^{2}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{p_{k}}{k}J_{k}\exp(jk\Phi)\right),$$
(3)

где Φ=ωt-β_ez – фаза крупной частицы, ω_p – плазменная частота бесконечно широкого потока, p_k – коэффициент депрессии сил пространственного заряда.

Начальные условия для решения системы (1) – (3) таковы:

$$\theta = 0, \ F_1|_{\theta=0} = F_{01}, \ F_2|_{\theta=0} = F_{02}, \ \frac{d\Phi}{d\theta}|_{\theta=0} = 0.$$

Мощность высокочастотного сигнала Р на частоте ω определяется из решения системы (1) – (3) и связана с безразмерными параметрами соотношением:

$$P = \frac{|F_1|^2 - |F_{01}|^2}{2(1+b_1C)^2} CI_0 U_0.$$

Изложенная модель легла в основу реализованной на предприятии "Плутон" программы численного моделирования выходных характеристик спиральных ЛБВ [9] (рис.4). Исходные параметры, задаваемые в программе, геометрические размеры элементов конструкции отдельных секций ЗС. физические свойства используемых материалов, распределение по длине ЗС удельного затухания, вносимого локальными поглотителями, а также параметры электронного потока и режима работы ЛБВ. В результате численного моделирования выдаются (в числовом и графическом виде) распределения уровней мощности усиливаемого сигнала на основной и удвоенной частотах, коэффициента усиления,

ТЕМА ГОДА: ОТЕЧЕСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО



Рис.5. Распределения шага спирали h (синяя линия) и затухания L (оранжевая линия), вносимого локальными поглотителями по длине 3C

гармоник тока пучка, фазовых траекторий и скоростей крупных частиц по длине ЛБВ. Зависимости коэффициента замедления и сопротивления связи от частоты в программе вычисляются из решения дисперсионного уравнения [10], могут быть использованы также электродинамические характеристики, полученные в результате более строгого электромагнитного моделирования или экспериментальных измерений.

Результаты расчетов пространства взаимодействия были использованы в качестве основы для создания конструкции ЛБВ, опытные образцы которой проверены по выходным параметрам и уровню требуемой надежности. При этом пространство взаимодействия представляет собой трехсекционную спиральную замедляющую систему с разрывом под вторым локальным поглотителем, в выходной секции которой имеется участок с линейно изменяющимся шагом, предназначенный для Электрический режим опытных образцов ЛБВ

Nº	U _H , B	I _H , A	U _a , B	I _а , мА	U _{3C} , B	I _{зс} , мА	U _{кол} , В	I _{кол} , мА
1	12,6	1,3	5750	0,08	8100	1,1	5400	390
2	12,6	1,275	6200	0,12	8250	1,3	5400	410

снижения вероятности ее возбуждения на минус первой пространственной гармонике (рис.5).

Полученные на основе численного моделирования амплитудные и частотные характеристики опытных образцов ЛБВ были сопоставлены с экспериментальными данными. Сопоставление показало приемлемое совпадение результатов расчетов и экспериментов (рис.6, 7).

Из параметров электрического режима (см. таблицу) и представленных на рис.66, 7 характеристик видно, что изготовленные изделия обеспечивают заданный уровень выходной мощности (не менее 400 Вт) при токе коллектора I_{кол} 390–410 мА, напряжении замедляющей системы U_{зс} 8100–8250 В и мощности входного сигнала 0,3–0,35 Вт. При этом величина тока замедляющей системы I_{зс} в статическом режиме, то есть при отсутствии входного сигнала, не превышает 1,5 мА, а в режиме усиления при подаче входного сигнала, мощность которого выбирается в пределах 350–370 мВт, – 4,0 мА.

Испытания образцов ЛБВ на безотказность проводились при работе на нагрузку с коэффициентом стоячей волны по напряжению 1,8±10% в часовом циклическом режиме при температуре окружающей среды 70±5°С. В ходе испытаний получены временные зависимости минимальной выходной мощности и максимального тока замедляющей системы в диапазоне частот



Рис.6. Расчетные (а) и измеренные (б) амплитудные характеристики опытного образца ЛБВ №1 в рабочем диапазоне частот

ТЕМА ГОДА: ОТЕЧЕСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО



Рис.7. Расчетные (синия линия) и измеренные (оранжевая линия) частотные характеристики опытного образца ЛБВ в рабочем диапазоне частот при постоянной мощности входного сигнала Р_{вх}=350 мВт

5,7-7,3 ГГц (рис.8). После наработки 3000 ч (3370 циклов) минимальная выходная мощность практически не изменилась и составляет 420 Вт на частоте 5,7 ГГц, а максимальный ток 3С возрос до 9 мА, но не превышает максимально допустимую величину (15 мА).

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволило создать ЛБВ УВ-393 (рис.9) со следующими основными характеристиками:

- диапазон рабочих частот: 5,7-7,3 ГГц;
- выходная мощность: не менее 400 Вт;
- коэффициент усиления: не менее 30 дБ;
- максимальное рабочее напряжение: не более 9,0 кВ;
- максимальный ток коллектора: не более 420 мА;
- габариты: 420×110×80 мм;
- масса: не более 7 кг;
- охлаждение: воздушное принудительное с расходом воздуха не менее 3 кг/мин.

Наработка ЛБВ на отказ составила 3250 ч.

Программное обеспечение успешно применяется для улучшения выходных характеристик существующих и создаваемых ЛБВ подобного класса.







Рис.8. Изменение минимальной выходной мощности (синяя линия) и максимального тока 3С (оранжевая линия) в течение испытаний образца ЛБВ на наработку от времени

ЛИТЕРАТУРА

- Азов Г.А., Райс Ю.Э., Тихомиров С.А. Конструкция замедляющей системы мощной спиральной ЛБВ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2001. №4. С. 80.
- Силин Р.А. Периодические волноводы. М.: ФАЗИС, 2002. 438 с.
- Пчельников Ю.Н. Лекции по электронике СВЧ (4-ая зимняя школа-семинар). – Саратов: Изд. Саратовского университета, 1978. С. 44.
- Азов Г.А., Мозговой Ю.Д., Тихомиров С.А., Хриткин С.А. Исследование дисперсионных характеристик спиральной замедляющей системы с продольной проводимостью для широкополосной лампы бегущей волны //Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 7. С. 877.
- Азов Г.А., Хриткин С.А. Моделирование спиральной замедляющей системы мощной лампы бегущей волны // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 3. С. 369–373.
- Kory C.L., Dayton J.A. Accurate cold-test model of helical TWT slow-wave circuits. // IEEE Transaction of Electron Devices. 1998. V. 45. № 4. P. 966.
- Allosio M. Analysis of helix SWS for space TWT using 3-D EM Simulator // IEEE Transaction of Electron Devices. 2005. V. 52. № 5. P. 749.
- Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин И.А. Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием. – М.: Сов. радио. 1975. 296 с.
- Азов Г.А., Хриткин С.А. Моделирование выходных характеристик мощных спиральных ламп бегущей волны // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 6. С. 686.
- 10. Азов Г.А., Хриткин С.А. Исследование электродинамических параметров спиральных замедляющих систем мощных широкополосных ламп бегущей волны // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15. № 11. С. 14–21.