

УДК 621.365.5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛБВ Ку ДИАПАЗОНА С ПОЛОСОЙ РАБОЧИХ ЧАСТОТ НЕ МЕНЕЕ 16,5% И КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ НЕ МЕНЕЕ 30 дБ

Т. И. Полянская, В. И. Паницков, С. В. Жарихин

АО «НПП «Исток» им. Шокина», 141190, Фрязино Моск. обл., Вокзальная ул., 2а-1

Статья поступила в редакцию 14 июня 2019 г.

Аннотация. В данной статье представлены результаты проектирования замедляющей системы на цепочке связанных резонаторов для ЛБВ Ку диапазона с полосой рабочих частот не менее 16,5%, выходной непрерывной мощностью несколько кВт и усилением 30 дБ. Рассмотрены варианты построения ЗС данного типа, определены оптимальные отсечки секций замедляющей системы, наклон дисперсионных характеристик входной и выходной секций, а также отсечки и периоды средней секции.

В результате проведенных расчетов были получены 3 варианта проектов секционированных ЗС.

1 вариант: 3-х секционная ЗС на основе ЗС типа ЦСР с резонаторным типом волны в основной полосе пропускания; ЗС рассчитана на пониженное напряжение и повышенный первеанс : напряжение ЗС $U_{зс}=14 \text{ кВ} \pm 1\%$, ток катода $I_{кат.}=2,3 \text{ А}$;

2 вариант: 3-х секционная ЗС на основе ЗС типа ЦСР с резонаторным типом волны в основной полосе пропускания: напряжение ЗС $U_{зс}=18.8 \text{ кВ} \pm 1\%$, ток катода $I_{кат.}=1,7 \text{ А}$.

В обоих вариантах выходная секция ЛБВ имеет пологую дисперсионную характеристику, что может потребовать дополнительных конструктивных мер в узле выходной секции для устранения паразитной генерации в высокочастотной области основной полосы пропускания. Кроме того, в 1 варианте могут

возникнуть сложности с фокусировкой высокоперевансного электронного пучка.

3 вариант: 4-х секционная ЗС на основе ЗС типа ЦСР с щелевым типом волны в основной полосе пропускания; напряжение ЗС $U_{зс}=18,85 \text{ кВ} \pm 1\%$, ток катода $I_{кат.}=1,7 \text{ А}$. Выходная секция имеет достаточно пологую дисперсионную характеристику, с наклоном, характерным для широкополосных ЛБВ на ЗС типа ВШ; специальных мер для подавления паразитной генерации в высокочастотной области основной полосы пропускания ЗС не требует, однако общая длина секционированной ЗС существенно увеличилась за счет добавления еще одной секции.

Сборка, настройка и испытания мощных непрерывных широкополосных ЛБВ являются достаточно трудоемким процессом. Это показал опыт разработки и производства ЛБВ, полосы рабочих частот которых приближаются к 10% и уже являются достаточно широкими при совокупности требуемых выходных параметров и массо-габаритных характеристик. Увеличение рабочей полосы частот более чем в 1,5 раза значительно увеличивает трудоемкость ее изготовления. Насколько это преодолимо и какой из трех вариантов ЗС предпочтительнее, должна показать экспериментальная проработка в ходе специально поставленной работы.

Ключевые слова: мощная широкополосная лампа бегущей волны (ЛБВ), ЗС типа цепочки связанных резонаторов (ЦСР) и встречных штырей (ВШ), основная полоса, резонаторный и щелевой тип волны, зоны генерации, амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), трудоемкость производства.

Abstract. This article presents results of the design of a slow-wave system on coupled cavity circuit (CCC) of the Ku-band with operating frequency band 16.5% with output constant power of several kW and a gain of at least 30 dB. Variants of the slow-wave system (SWS) are considered, the optimal cutoffs of the sections of the slow-wave system, slope of the dispersion characteristics of the input and output sections, as well as the cutoffs and the period of the middle section are determined.

As a result of the calculations, 3 variants of projects of partitioned slow-wave system for TWT were obtained.

Option 1: 3-section SWS based on CCC with a resonator type of wave in the main passband; slow-wave system is designed for undervoltage and increased perveance: slow-wave system voltage $U_{sw} = 14 \text{ kV} \pm 1\%$, cathode current $I_{cat.} = 2.3 \text{ A}$;

Option 2: 3-section slow-wave system on the basis of a SWS type CCC with a resonator type of wave in the main passband: a voltage of slow-wave system $U_{sw} = 18.8 \text{ kV} \pm 1\%$, the cathode current $I_{cat.} = 1.7 \text{ A}$.

In both cases, the output section of the TWT has a flat dispersion characteristic, which may require additional design measures in the node of the output section to eliminate spurious generation in the high-frequency region of the main bandwidth. In addition, in version 1, difficulties may arise with focusing a high- perveance electron beam.

Option 3: 4-section slow-wave system based on SWS type CCC with a slit type of wave in the main passband; $U_{sw} = 18.85 \text{ kV} \pm 1\%$, cathode current $I_{cat.} = 1.7 \text{ A}$. The output section has a rather flat dispersion characteristic, with a slope characteristic of broadband TWT on SWS of counter pin structures type; No special measures are needed to suppress parasitic generation in the high-frequency region of the base bandwidth of the SWS, however, the total length of the partitioned SWS has increased significantly by adding another section.

Building, configuring, and testing high-power continuous broadband TWTs is a fairly time-consuming process. This was demonstrated by the experience in the development and production of TWTs, the operating frequency bands of which approach 10% and are already quite wide with the required output parameters and mass-dimensional characteristics. The increase in the working frequency band of more than 1.5 times significantly increases the complexity of its manufacture. How much is surmountable and which of the three options for SWS should preferably be shown by an experimental study during a specially designed work.

Key words: powerful broadband TWT, coupled cavity circuit and counter pins, zones of generation, main band, amplitude-frequency characteristics.

1. Введение

В выходных усилительных каскадах часто используются мощные широкополосные ЛБВ непрерывного действия. Основные требования, предъявляемые к таким ЛБВ: сочетание широкой полосы усиливаемых частот с высокой выходной непрерывной мощностью, а также относительно малые габаритные размеры и масса. В настоящее время в ЛБВ Ку диапазона полоса рабочих частот приближается к 10%. Основной сложностью при создании приборов такого типа являются:

- совокупностью физико-технических факторов, делающих такие рабочие полосы практически предельно достижимыми;
- большой трудоемкостью сборки и настройки ЛБВ такого типа (чем шире полоса, тем больше трудоемкость);
- необходимостью гарантированно обеспечивать полосы усиления при изготовлении ЛБВ в условиях промышленного производства при достаточно высоком проценте выхода годных приборов (не менее 60%).

В конструкциях ЛБВ применяются секционированные замедляющие системы (ЗС) типа «встречные штыри» (ВШ) и типа «цепочки связанных резонаторов» (ЦСР), пакетированные с магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС). ЗС типа ЦСР имеет резонаторный тип волны в основной (наиболее длинноволновой) полосе пропускания, а ЗС типа ВШ – щелевой тип. На Рис.1а,б и Рис.2а,б изображены отрезки 2-х типов ЗС для ЛБВ 2-х см диапазона длин волн и наглядное распределение электрической компоненты СВЧ поля вдоль продольной оси прибора на π виде колебаний, возле которого располагается рабочая полоса ЛБВ.

ЗС ЦСР – одна из наиболее часто применяемых систем при проектировании мощных ЛБВ. Она обладает приемлемыми электродинамическими характеристиками, большой теплоустойчивостью и достаточной технологичностью при производстве приборов на ее основе. При применении МПФС полюсные наконечники, изготовленные из магнитомягкой стали, встраиваются в ЗС, одновременно являясь стенками резонаторов. На рис.3

ЗС типа ВШ имеет меньший диаметр, чем ЦСР, что позволяет существенно снизить массогабаритные характеристики прибора. Кроме того, в отличие от ЦСР, она не имеет склонности к генерации вблизи высокочастотной границы полосы прозрачности, когда фазовый сдвиг электромагнитной волны на период ЗС близок к 2π .

На рис. 4а,б изображены ячейки ЗС ЦСР и ВШ с распределением электрической компоненты СВЧ поля на 2π виде колебаний. Как видно из рисунков, при щелевом типе распространяющейся волны практически отсутствует составляющая поля на оси системы, следовательно, сопротивление связи (параметр, характеризующий взаимодействие) стремится к нулю или достаточно мал.

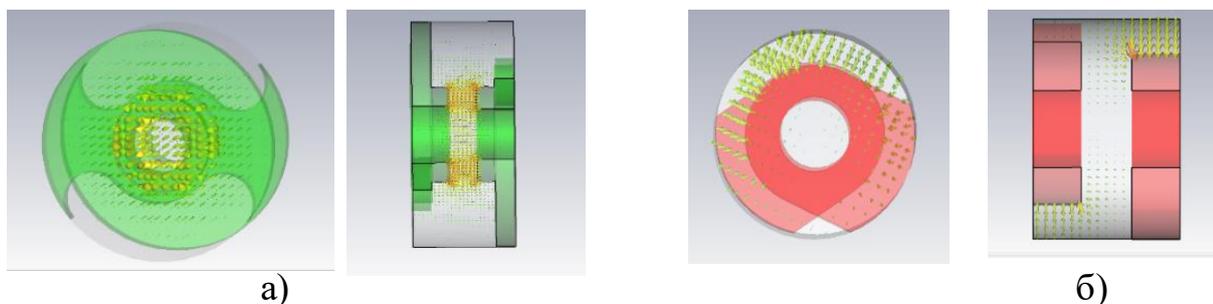


Рис. 4. Распределение электрической компоненты СВЧ поля на 2π виде вдоль продольной оси ЗС: а) для ЗС типа ЦСР(резонаторный тип), б) для ЗС типа ВШ (щелевой тип).

На рис.5 изображен ход зависимости сопротивления связи от величины фазового сдвига на период ЗС для ЗС ЦСР и ВШ с идентичными дисперсионными характеристиками.

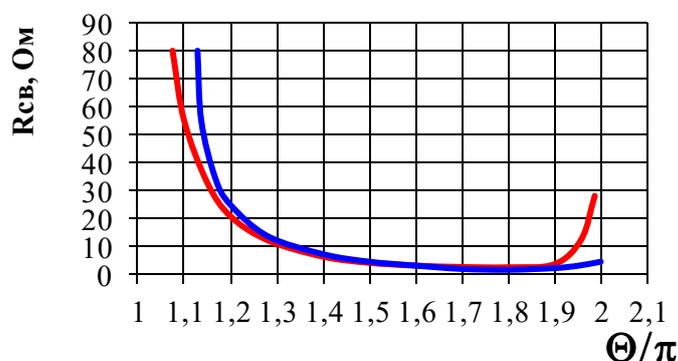


Рис. 5. Зависимость сопротивления связи от величины фазового сдвига на период ЗС для ЗС ЦСР и ВШ: красная кривая-ЦСР; синяя кривая-ВШ.

Отсутствие склонности к генерации вблизи 2π вида позволяет проектировать ЗС с достаточно пологими дисперсионными характеристиками и получать более широкие рабочие полосы, чем на ЗС типа ЦСР.

В качестве ЗС для ЛБВ Ку диапазона применена ЗС типа ЦСР, изображенная на рис.1а. Данный тип ЗС более оптимален для непрерывных ЛБВ, работающих в 2-х см диапазоне длин волн с уровнем мощности несколько киловатт.

Для прибора с полосой рабочих частот не менее 16,5% были рассмотрены 3 варианта секционированных замедляющих систем. Расчет амплитудных и амплитудно-частотных характеристик ЛБВ проводился в условиях реальной геометрии резонаторов ЗС. Геометрия ЗС и ее электродинамические характеристики рассчитывались по CST STUDIO, а динамические характеристики – по программе DEV5.1, позволяющей рассчитывать взаимодействие в секционированных ЗС с «запредельными» секциями и учитывать тип полосы пропускания.

2. Результаты расчетов

Вариант 1

В этом варианте рассчитана 3-х секционная ЗС на ЦСР с расстройками отсечек секций так, как описано в работе [1]. Использована упрощенная расстановка отсечек с подбором наклона дисперсионных характеристик входной и выходной секций, а также отсечки и периоды средней секции. Период входной и выходной секций равен 3 мм, отсечки также равны между собой и составляют $0,9784 \cdot F_n$, где F_n – нижняя частота рабочего диапазона; период средней секции 2,8 мм, отсечка – $1,078 \cdot F_n$; при этом напряжение ЗС $U_{зс} = 14$ кВ; ток катода $I_{кат.} = 2,3$ А; микропервееанс электронного пучка $1,3$ А/В^{3/2}; диаметр канала - 2,1 мм в медной диафрагме, 2,4 мм в стальной диафрагме. При радиусе пучка 0,63 мм рабочее магнитное поле на оси прибора должно быть не менее 3400 Гс, максимальная величина параметра устойчивости электронного пучка в поле МПФС $\alpha = 0,33$. На рис.6а,б представлены расчетные АЧХ ЛБВ по вар.1.

Расчетный электронный коэффициент полезного действия $\Pi_{эл.}$ находится в

пределах (11-16)% в рабочей полосе частот. На рис.7а изображена расчетная дисперсионная характеристика, а на рис.7б представлены результаты расчета зон генерации в выходной секции ЗС. Жирные кривые на графиках зон генерации соответствуют амплитудным условиям генерации, а тонкие – фазовым условиям; их пересечение означает наличие генерации при заданных условиях тока катода, напряжения ЗС и высокочастотного согласования секции (КСВн). Красные кривые на рис.7б соответствуют рабочему режиму по напряжению -14 кВ; коричневые кривые – режиму с напряжением, меньшим на 16%. С помощью расчета на меньшем напряжении оценивается возможность генерации вблизи 2π вида в динамическом режиме работы ЛБВ. Из рис.7б видно, что такая возможность в этой системе существует, так как существуют точки пересечения кривых фазовых и амплитудных условий при токах катода меньше рабочего.

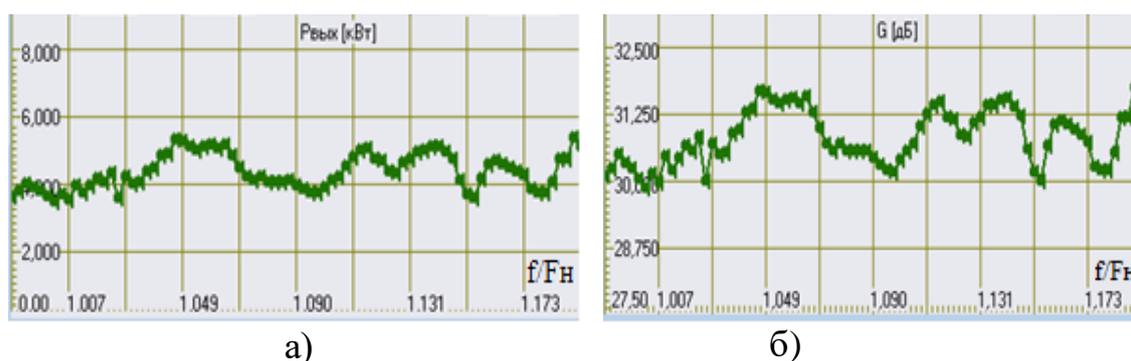


Рис. 6. Расчетные АЧХ ЛБВ с ЗС по вар.1 с напряжением катода 14 кВ, током катода 2,3 А: а-зависимость выходной мощности $P_{\text{вых}}=F(f)$ от частоты, б-зависимость усиления $G=F(f)$ от частоты; максимальный перепад по коэффициенту усиления при постоянном входном сигнале 1,75 дБ.

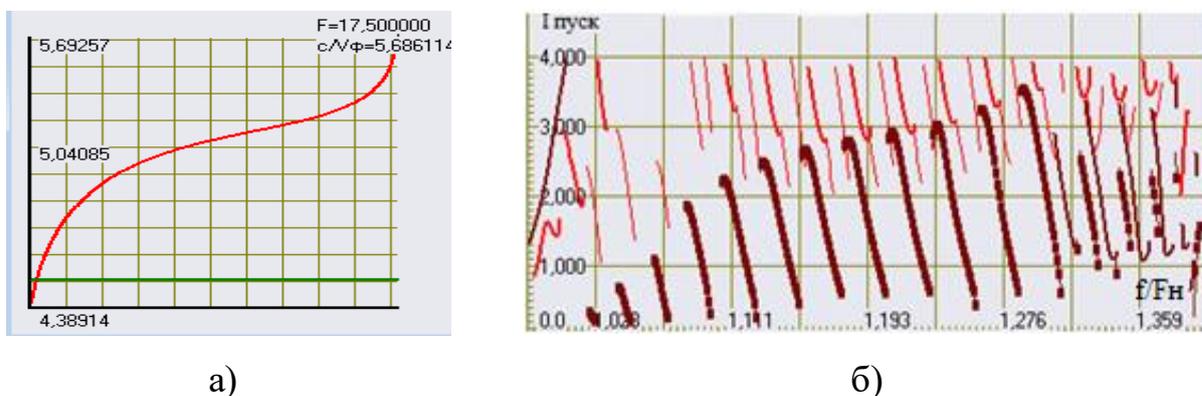


Рис. 7. а) дисперсионная характеристика ЗС $n(f)$ выходной секции; б) расчет зон генерации $I_{\text{пуск}}(f/F_n)$ для выходной секции ЗС ЛБВ варианта 1:

а-красная кривая – рабочее напряжение 14 кВ ; б-коричневая кривая – уменьшенное напряжение 11, 8 кВ.

Вариант 2

В данном варианте рассчитана 3-х секционная ЗС на ЦСР с подбором дисперсионных характеристик каждой из трех секций. Период входной и выходной секций равен 3,5 мм, отсечки входной и выходной секций составляют $1,0064 \cdot F_H$ и $0,976 \cdot F_H$ соответственно; период средней секции 2,95 мм, отсечка – $1,1688 \cdot F_H$. В отличие от первого варианта режимы по напряжениям и токам выбираются в пределах $-U_{зс}=(17-20)$ кВ, $I_{кат.} \leq 1,7$ А. Диаметры каналов в стальной и медной стенке выбраны 2,4 мм и 2,1 мм соответственно. На рис.8а,б представлены АЧХ по выходной мощности и усилению при напряжении ЗС $U_{зс} = 17,65 \pm 1\%$ кВ и токе катода $I_{кат.} = 1,7$ А; заполнение канала такое же, как в первом варианте – $R = 0,63$ мм.

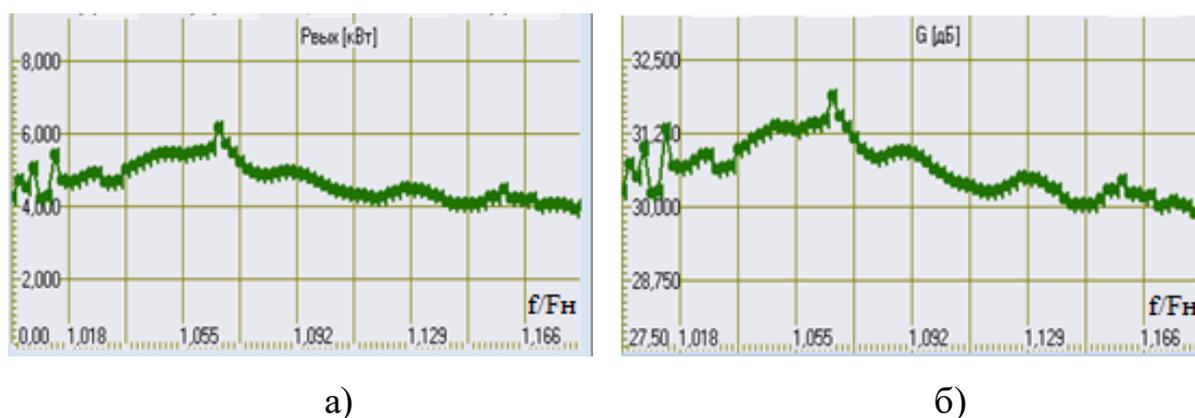


Рис. 8. Расчетные АЧХ ЛБВ с ЗС по вар.2 с напряжением катода $17,65 \pm 1\%$ кВ, током катода 1,7 А: а) зависимость выходной мощности $P_{вых} = F(f)$ от частоты; б) зависимость усиления $G = F(f)$ от частоты; максимальный перепад по коэффициенту усиления при постоянном входном сигнале 1,65 дБ.

Рабочее магнитное поле на оси прибора должно быть не менее 3000 Гс, максимальная величина параметра устойчивости электронного пучка в поле МПФС $\alpha = 0,26$

Расчетный электронный коэффициент полезного действия $\Pi_{эл.}$ находится в пределах (13-18)% . На рис.9а,б представлены дисперсионная характеристика и результаты расчета зон генерации в выходной секции ЗС. Красные кривые

соответствуют рабочему режиму по напряжению -17,65 кВ; розовые кривые – режиму с напряжением, меньшим на 18 % .

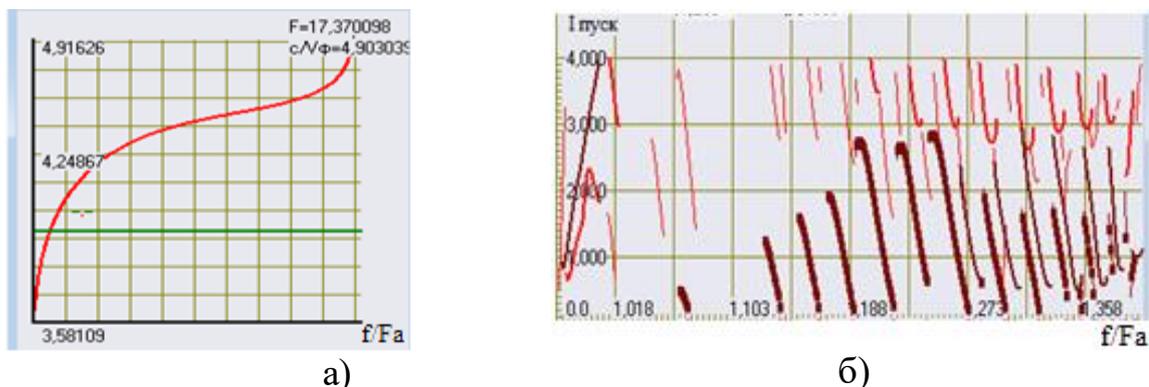
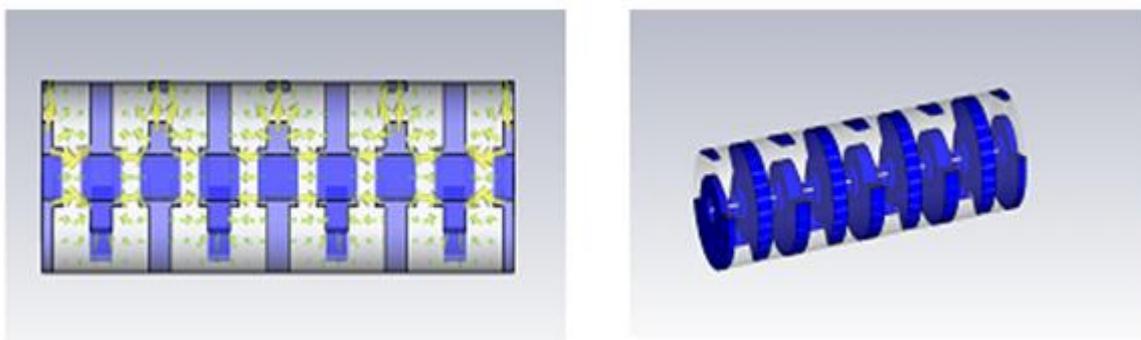


Рис. 9. а) дисперсионная характеристика ЗС $n(f)$ выходной секции; б) расчет зон генерации $I_{\text{пуск}}(f/F_n)$ для выходной секции ЗС для ЛБВ варианта 2: красная кривая – рабочее напряжение 17,65 кВ; коричневая кривая – уменьшенное напряжение 14,47 кВ.

Как видно из рисунка 9б, в этом варианте также существует возможность возбуждения ЛБВ вблизи 2π вида в динамическом режиме работы прибора.

Вариант 3

В данном варианте рассчитана 4-х секционная ЗС для ЛБВ, в которой основной полосой является щелевая полоса пропускания, так же, как в ЗС типа ВШ. Расчет ЛБВ на системе ВШ «классического» вида, изображенной на рис.1б, не показал достаточного уровня выходной мощности в рассматриваемой полосе рабочих частот. Кроме того, данный вариант встречно-штыревой системы не имеет достаточной тепловой устойчивости. На Рис.10а,б представлена ЗС с основной щелевой полосой пропускания, которая получена путем геометрических преобразований с осуществлением смены (инверсии) полос с последующей коррекцией дисперсионной характеристики. Коррекция дисперсионной характеристики производилась путем введения дополнительных элементов в геометрию резонатора и подбором расположения смежных стенок относительно друг друга, так, как описано в патенте АО «Исток» для ЗС типа ВШ [2].

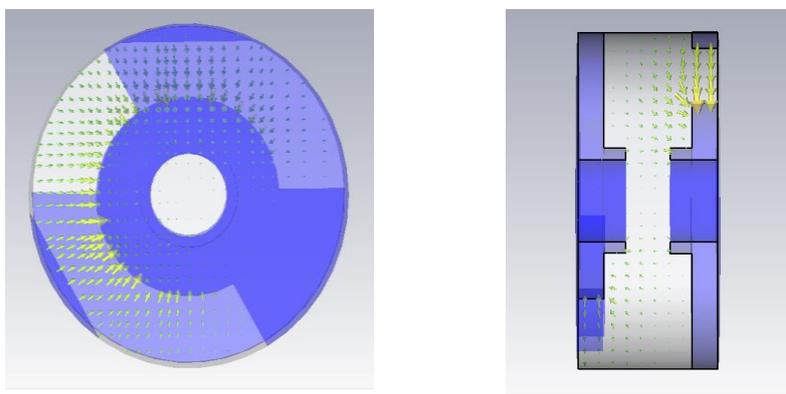


а)

б)

Рис. 10. а) замедляющая система с основной полосой щелевого типа, период ЗС 3,5 мм диаметр резонатора 8,5 мм, толщина стенки-1,3 мм, диаметр канала 2,1 мм, б) распределение электрической компоненты СВЧ поля на π виде вдоль продольной оси ЗС, отражающее щелевой тип основной полосы.

Данная ЗС, имея вид ЗС типа ЦСР, обладает свойством системы типа ВШ – практическим отсутствием продольной составляющей электрического поля на оси системы в области 2π вида колебаний. Это показано на рис.11.



а)

б)

Рис. 11. Распределение электрической компоненты СВЧ поля на 2π виде вдоль продольной оси ЗС с основной полосой щелевого типа.

В результате не требуется дополнительных мер для предотвращения генерации на этих частотах.

Наклон дисперсионной характеристики выходной секции выбирался из условия получения полной полосы усиления и отсутствия паразитной генерации при реально достижимых условиях согласования концов секции ЗС. На рис. 12 представлены расчетные дисперсионная характеристика выходной секции и

расчетное согласование выходной секции в пределах этой полосы.

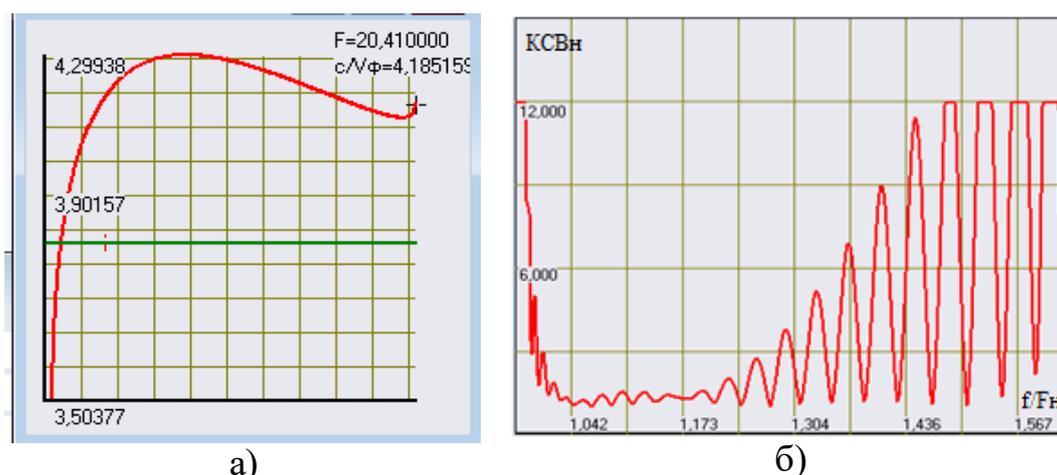


Рис. 12. а) расчетная дисперсионная характеристика $n(f)$ выходной секции ЗС по вар.3; б) расчетное согласование выходной секции в пределах основной полосы пропускания.

На рис.13 представлены результаты расчета зон генерации в выходной секции ЗС по вар. 3. Рис.13а соответствует расчету в основной щелевой полосе пропускания при рабочем напряжении 18,85 кВ; рис.13б,в соответствуют расчету во второй, резонаторной, полосе пропускания при напряжениях 18,85 кВ и уменьшенном напряжении 16,2 кВ (по аналогии с ЗС по вар.1 и 2).

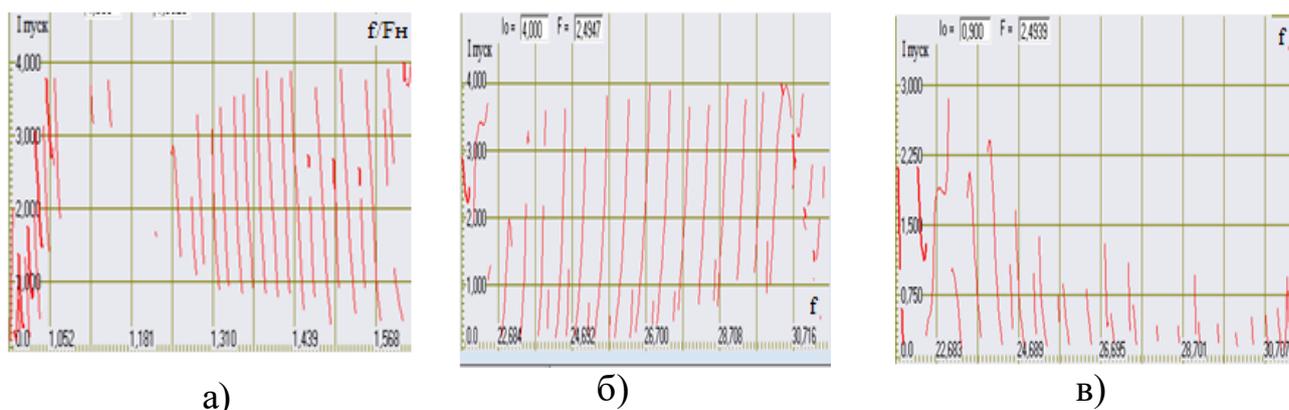


Рис. 13. Расчет зон генерации $I_{пуск}(f/F_n)$: а) в щелевой полосе пропускания при напряжении ЗС $U_{zc}=18,85$ кВ, б) ,в) в резонаторной полосе при напряжениях $U_{zc}=18,85$ кВ и 16,2 кВ.

Как видно из рис. 13а, пересечение графиков фазовых и амплитудных условий генерации наблюдается при токах выше рабочего тока 1,7 А на частотах за рабочей полосой в области плохого согласования секции; из рис.13б,в видно, что нет пересечения графиков фазовых и амплитудных условий генерации при

рабочем токе катода. Таким образом, можно сделать вывод о том, что выбранная дисперсия выходной секции, отступление второй резонаторной полосы пропускания от основной щелевой, уровень согласования секции, показанные на рис.13а,б,в, достаточны для работоспособности данного узла в ЛБВ. Период входной и выходной секций равен 3,5 мм, отсечки входной и выходной секций составляют $1,0032 \cdot F_n$ и $0,988 \cdot F_n$ соответственно; период второй секции 2,9 мм, отсечка – $1,1856 \cdot F_n$; период третьей секции 3 мм, отсечка – $1,1272 \cdot F_n$. На рис.14 представлены АЧХ по выходной мощности и усилению при напряжении $3C U_{зс} = 18,85 \pm 1\%$ кВ и токе катода $I_{кат.} = 1,7$ А; заполнение канала $R_{зап.} = 0,66$ мм.

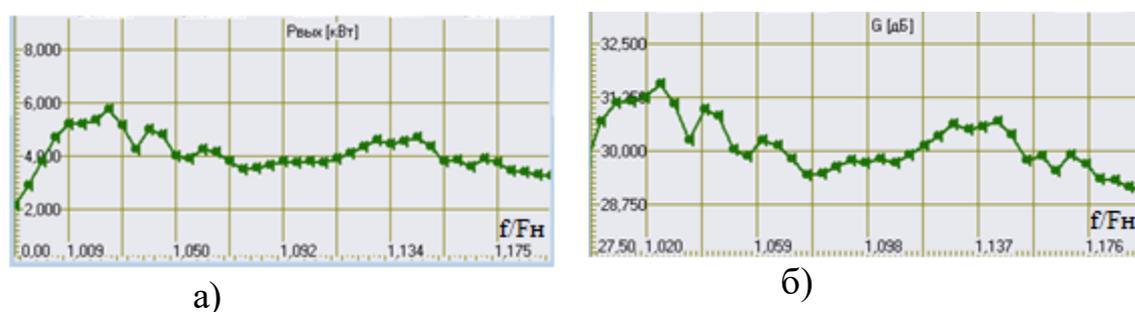


Рис. 14. Расчетные АЧХ однолитерной ЛБВ с 3С по вар.3 с напряжением катода $18,85 \pm 1\%$ кВ, током катода 1,7 А. а) зависимость выходной мощности $P_{вых} = F(f)$ от частоты, б) зависимость усиления $G = F(f)$ от частоты; максимальный перепад по коэффициенту усиления при постоянном входном сигнале 1,8 дБ.

Встроенная МПФС в данной системе может формироваться так же, как и в обычной системе на ЦСР: стальная стенка чередуется с медной; геометрия стальной стенки позволяет обеспечивать необходимое магнитное поле на оси прибора – около 3000 Гс при канале 2,1 мм, что подтверждается при 3-х мерном моделировании МПФС с полученной геометрией стальных полюсных наконечников. На рис.15 представлено расчетное периодическое магнитное поле на оси данной системы, формируемое полученными полюсными наконечниками при максимальной намагниченности самарий кобальтовых магнитов, которые применяются в данной ЛБВ. Как видно из рисунка, расчетная максимальная амплитуда магнитного поля при размерах магнитов $40 \times 4 \times 22,5$ мм приближается к 5000 Гс.

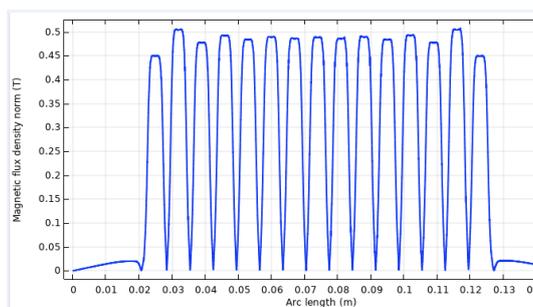


Рис. 15. Расчетное периодическое магнитное поле на оси ЗС с полюсными наконечниками по вар.3 при максимальной намагниченности самарий - кобальтовых магнитов.

3. Заключение

Таким образом, в результате проведенных расчетов были получены 3 варианта проектов секционированных ЗС для ЛБВ с полосой рабочих частот не менее 16,5% , выходной мощностью несколько киловатт и усилением не менее 30 дБ.

1 вариант: 3-х секционная ЗС на основе ЗС типа ЦСР с резонаторным типом волны в основной полосе пропускания; ЗС рассчитана на пониженное напряжение и повышенный первеанс: напряжение ЗС $U_{зс}=14 \text{ кВ} \pm 1\%$, ток катода $I_{кат.}=2,3 \text{ А}$;

2 вариант: 3-х секционная ЗС на основе ЗС типа ЦСР с резонаторным типом волны в основной полосе пропускания: напряжение ЗС $U_{зс}=18.8 \text{ кВ} \pm 1\%$, ток катода $I_{кат.}=1,7 \text{ А}$.

В обоих вариантах выходная секция ЛБВ имеет пологую дисперсионную характеристику, что может потребовать дополнительных конструктивных мер в узле выходной секции для устранения паразитной генерации в высокочастотной области основной полосы пропускания. Кроме того, в 1 варианте могут возникнуть сложности с фокусировкой высокопервеансного электронного пучка.

3 вариант – 4-х секционная ЗС на основе ЗС типа ЦСР с щелевым типом волны в основной полосе пропускания; напряжение ЗС $U_{зс}=18,85 \text{ кВ} \pm 1\%$, ток катода $I_{кат.}=1,7 \text{ А}$. Выходная секция имеет достаточно пологую дисперсионную характеристику с наклоном, характерным для широкополосных ЛБВ на ЗС типа

ВШ; специальных мер для подавления паразитной генерации в высокочастотной области основной полосы пропускания ЗС не требует, однако общая длина секционированной ЗС существенно увеличилась за счет добавления еще одной секции.

Сборка, настройка и испытания мощных непрерывных широкополосных ЛБВ являются достаточно трудоемким процессом. Это показал опыт разработки и производства ЛБВ, полосы рабочих частот которых приближаются к 10% и уже являются достаточно широкими при совокупности требуемых выходных параметров и массо-габаритных характеристик. Увеличение рабочей полосы частот более чем в 1,5 раза значительно увеличивает трудоемкость ее изготовления. Насколько это преодолимо и какой из трех вариантов ЗС предпочтительнее, должна показать экспериментальная проработка в ходе специально поставленной ОКР.

Литература

1. Стройков Е.А., Полянская Т.И., Жарихин С.В., Паницков В.И. Особенности разработки мощных широкополосных ЛБВ на секционированных встречно-штыревых замедляющих структурах и цепочке связанных резонаторов с фокусировкой магнитной периодической фокусирующей системой. Сборник статей конференции «VI Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»», Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2017, т.1, стр. 287-294.
2. Патент РФ RU №2263375, приоритет 11.11.2003 г. «Замедляющая система лампы бегущей волны». Аристархова О.Н., Мазурова Л.Г., Крючков В.В., Андрианова Е.П., Чернобай Т.И., Рувинский Г.В., Щелкунов Г.П.

Для цитирования:

Т. И. Полянская, В. И. Паницков, С. В. Жарихин. Проектирование замедляющей системы для ЛБВ К_и диапазона с полосой рабочих частот не менее 16,5% и коэффициентом усиления не менее 30 дБ. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/10/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.6.10