

Проектирование замедляющей системы для непрерывных 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»

Аннотация: Представлены результаты проектирования замедляющей системы для ЛБВ Ку диапазона с полосой рабочих частот не менее 16,5%, выходной непрерывной мощностью несколько кВт и усилением 30 дБ.

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.

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 в 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 изображен фрагмент ЗС на ЦСР, совмещенный с МПФС.

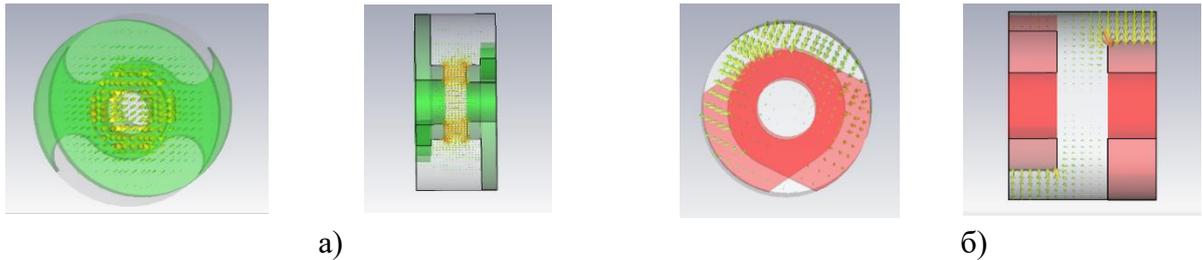


Рисунок 4. Распределение электрической компоненты СВЧ поля на 2π виде вдоль продольной оси ЗС: а) - для ЗС типа ЦСР(резонаторный тип), б) – для ЗС типа ВШ (щелевой тип).

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

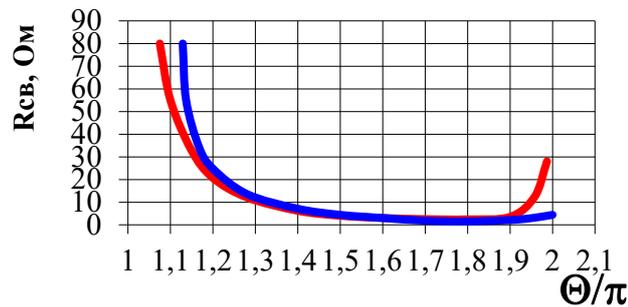


Рисунок 5. Зависимость сопротивления связи от величины фазового сдвига на период ЗС для ЗС ЦСР и ВШ: красная кривая-ЦСР; синяя кривая-ВШ.

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 – на 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.

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 периода 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; микроперванс 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.6 а,б представлены расчетные АЧХ ЛБВ по вар.1.

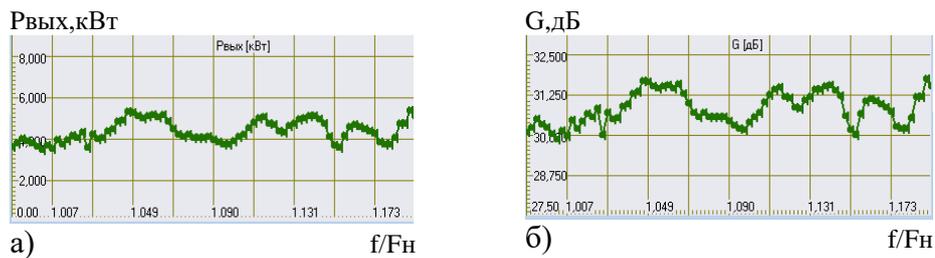


Рисунок 6. Расчетные АЧХ ЛБВ с ЗС по вар.1 с напряжением катода 14 кВ, током катода 2,3 А: а-зависимость выходной мощности $R_{\text{вых}}=F(f)$ от частоты, б-зависимость усиления $G=F(f)$ от частоты; максимальный перепад по коэффициенту усиления при постоянном входном сигнале 1,75 дБ;

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

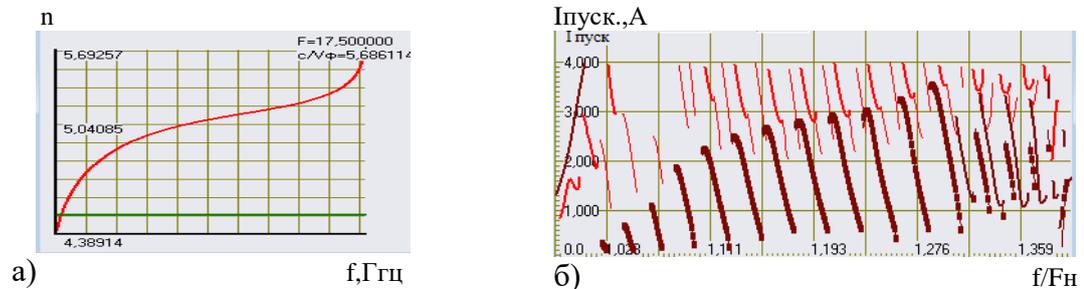


Рисунок 7. а- дисперсионная характеристика ЗС $n(f)$ выходной секции; б - расчет зон генерации $I_{\text{пуск.}}(f/F_n)$ для выходной секции ЗС ЛБВ варианта 1:а-красная кривая –рабочее напряжение 14 кВ ; б-коричневая кривая – уменьшенное напряжение 11, 8 кВ.

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 $1,0064 \cdot F_n$ и $0,976 \cdot F_n$ соответственно; период средней секции 2,95 мм, отсечка – $1,1688 \cdot F_n$. В отличие от первого варианта режимы по напряжениям и токам выбираются в пределах $-U_{\text{зс}}=(17-20)$ кВ, $I_{\text{кат.}} \leq 1,7$ 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 $U_{\text{зс}}= 17,65 \pm 1\%$ кВ и токе катода $I_{\text{кат.}}=1,7$ А; заполнение канала такое же, как в первом варианте – $R=0,63$ мм.

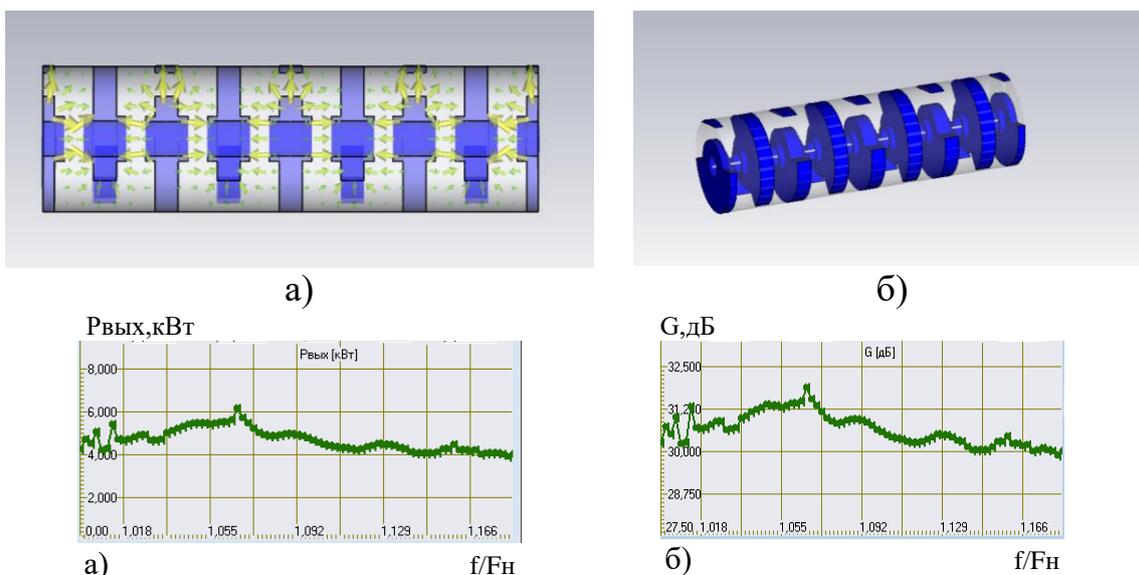


Рисунок 8. Расчетные АЧХ ЛБВ с ЗС по вар.2 с напряжением катода $17,65 \pm 1\%$ кВ, током катода 1,7 А: а-зависимость выходной мощности $P_{\text{вых}}=F(f)$ от частоты, б-зависимость усиления $G=F(f)$ от частоты; максимальный перепад по коэффициенту усиления при постоянном входном сигнале 1,65 дБ.

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 $\eta_{\text{эл}}$ 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 %.

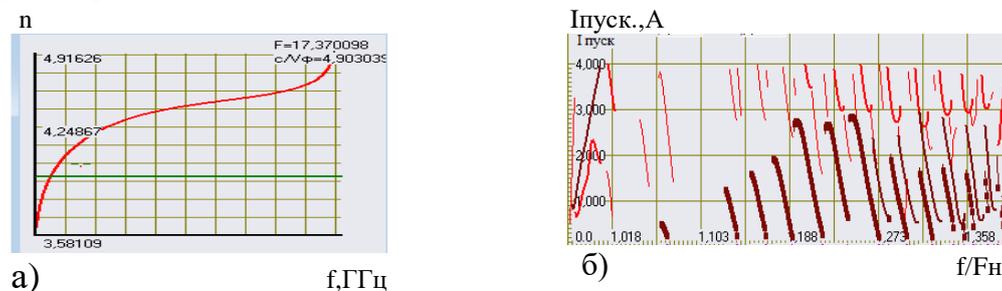


Рисунок 9. а – дисперсионная характеристика ЗС $n(f)$ выходной секции; б - расчет зон генерации $I_{\text{пуск}}(f/F_n)$ для выходной секции ЗС для ЛБВ варианта 2: красная кривая – рабочее напряжение 17,65 кВ; коричневая кривая – уменьшенное напряжение 14,47 кВ.

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

Рисунок 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.

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 ВЩ[2].

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

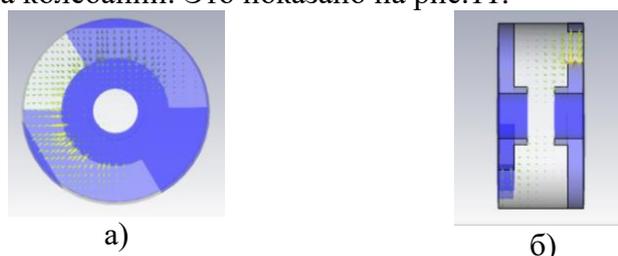


Рисунок 11. Распределение электрической компоненты СВЧ поля на 2π виде вдоль продольной оси ЗС с основной полосой щелевого типа.

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.

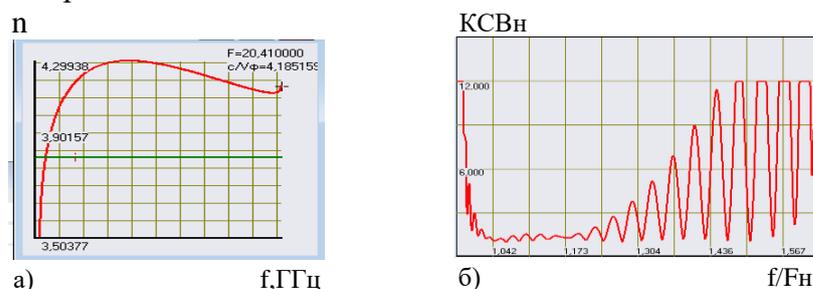


Рисунок 12. а- расчетная дисперсионная характеристика $n(f)$ выходной секции ЗС по вар.3; б-расчетное согласование выходной секции в пределах основной полосы пропускания.

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 и в – соответствует 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).

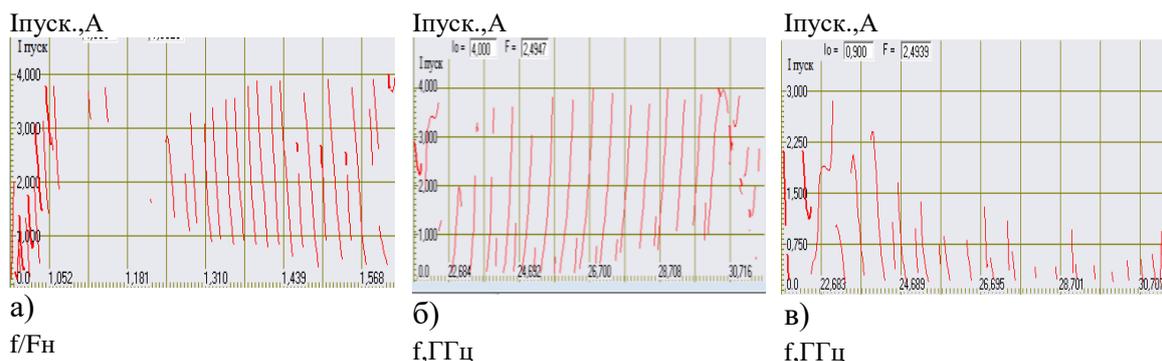


Рисунок 13. Расчет зон генерации $I_{\text{пуск}}(f/F_n)$: а- в щелевой полосе пропускания при напряжении ЗС $U_{zc}=18,85$ кВ, б,в- в резонаторной полосе при напряжении $U_{zc}=18,85$ кВ и 16,2 кВ.

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 ЗС $U_{zc}=18,85 \pm 1\%$ кВ и токе катода $I_{\text{кат}}=1,7$ А; заполнение канала $R_{\text{зап.}}=0,66$ мм.

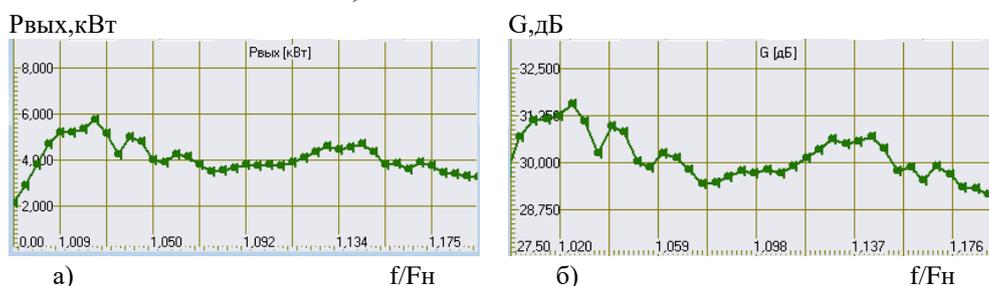


Рисунок 14. Расчетные АЧХ однолитерной ЛБВ с ЗС по вар.3 с напряжением катода $18,85 \pm 1\%$ кВ, током катода 1,7 А: а-зависимость выходной мощности $P_{\text{вых}}=F(f)$ от частоты, б-зависимость усиления $G=F(f)$ от частоты; максимальный перепад по коэффициенту усиления при постоянном входном сигнале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

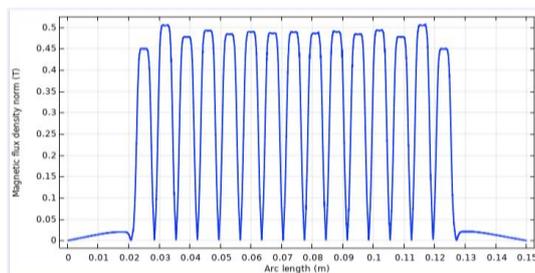


Рисунок 15. Расчетное периодическое магнитное поле на оси ЗС с полюсными наконечниками по вар.3 при максимальной намагниченности самарий - кобальтовых магнитов.

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.

Список литературы

1. Е.А. Стройков, Т.И. Полянская, С.В. Жарихин, В.И. Панищков. 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, 2017г., 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.