

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

**Сравнительный анализ методов согласования замедляющей системы и
вывода энергии в лампах с бегущей волной**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4032 группы
направления 03.03.03 Радиофизика
Института физики
Соляника Глеба Юрьевича

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н., профессор _____ А.П. Четвериков

Консультант
главный конструктор УВИ-78 _____ Е.А. Терешин

Зав. кафедрой радиофизики
и нелинейной динамики,
д.ф.-м.н., доцент _____ Г.И. Стрелкова

Саратов 2022 г.

Лампа с бегущей волной (ЛБВ) - один из основных видов СВЧ-приборов (второй – клистрон), так же известных как лампы 0-типа или лампы с линейным пучком. ЛБВ уже несколько десятилетий лидирует на мировом рынке вакуумной СВЧ – электронике, достигая 70% и более от общего объема продаж. Применения ЛБВ разнообразны. Они служат окончательными усилителями почти во всех спутниках связи, зачастую одну или несколько ЛБВ используют радиолокационных системах в качестве усилителя высокой мощности, создающего зондирующий ВЧ-импульс. С другой стороны, лампа с бегущей волной может быть использована в качестве предоконечного усилителя в таком ВЧ-усилителе высокой мощности, как усилитель со скрещенными полями. Основными областями ее применения являются системы военной радиоэлектроники и, прежде всего, радиолокации, связи и радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

При этом, каждая из названных систем предъявляет к ЛБВ свой специфический комплекс требований, обуславливая тем самым многообразие типов и постоянное развитие ее потребительских свойств. В результате лампы, предназначенные для различных систем, могут кардинально отличаться по характеристикам, внешнему виду, используемым при производстве материалам и конструкции важнейшего элемента – замедляющей системы (ЗС).

Лампы с бегущей волной используются на частотах от 1 до 100 ГГц. Диапазон мощностей простирается от ватт до мегаватт. Ширина полосы частот для спиральных ЛБВ может достигать двух октав и более. Полоса частот для ЛБВ на ЦСР обычно составляет 10 – 20%.

Качественные показатели ламп с бегущей волной оцениваются с помощью совокупности параметров и характеристик. Основными из них являются:

- 1) рабочая полоса частот,
- 2) тип замедляющей системы,
- 3) напряжение и ток коллектора,
- 4) напряжение и ток анода,

- 5) напряжение и ток ЗС,
- 6) коэффициент усиления,
- 7) выходная мощность,
- 8) коэффициент полезного действия.

Для достижения необходимой количественной величины данных характеристик применяются разнообразные конструктивные решения, которые будут рассмотрены далее, но стоит отметить, что при проектировке ЛБВ одной из насущнейших проблем для конструктора является достижения хорошего согласования волноведущих структур, в особенности согласования замедляющей системы и вывода энергии. Хорошее согласование гарантирует линейность и равномерность фазовых характеристик ВЧ-волны и позволяет устранить возбуждение ВЧ-волны, отсутствие которого является основополагающим критерием для работы всех усилителей.

Целью данной работы является ознакомление с принципами работы лампы с бегущей волной, изучение схем построения ЛБВ, в частности двух наиболее распространенных:

- 1) спиральная (для широкополосных применений),
- 2) на цепочке связанных резонаторов (ЦСР) (для применений на больших мощностях).

Также планируется изучить и опробовать в программе HFSS методы улучшения согласования замедляющей системы и вывода энергии в ЛБВ. Улучшение согласования гарантированно обеспечит увеличение выходной мощности прибора и уменьшение неравномерности мощности в диапазоне частот.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы. **Во введении** показана актуальность и сформулирована цель работы. **В первой** главе приводится описание принципов работы основных узлов лампы с бегущей волной и двух типов наиболее распространенных замедляющих систем: 1) спиральная; 2) на цепочке связанных резонаторов. Так же изучаются переходные участки и поглощающие

элементы. **Во второй** главе был спроектирован модернизированный узел вывода энергии УВИ-78 с существенно лучшими характеристиками при сохранение технологичности изготовления. Был внедрен согласующий элемент компенсирующий неоднородность поля спирали вблизи вывода энергии, позволивший добиться достижения цели, поставленной в выпускной квалификационной работе. Конструкция, полученная в результате разработки, рекомендована к внедрению в ЛБВ УВИ-78. **В заключении** сформулированы главные результаты работы. **Список цитирования** включает 22 ссылки.

Краткое содержание работы.

Основные принципы работы ЛБВ.

ЛБВ является сверхвысокочастотным усилительным прибором, принцип действия которого основан на длительном взаимодействии потока электронов с продольной электрической составляющей высокочастотного поля бегущей волны, распространяющейся в направлении движения электронного потока.

Существует два основных и наиболее распространенных типа ламп с бегущей волной. Спиральная ЛБВ, изображенная на рис. 1, является широкополосным (охват достигает более двух октав) и сравнительно маломощным прибором.

ЛБВ на цепочке связанных резонаторов, напротив, по мощности может достигать мегаватт, но ширина полосы частот ограничена величиной примерно 10-20%.

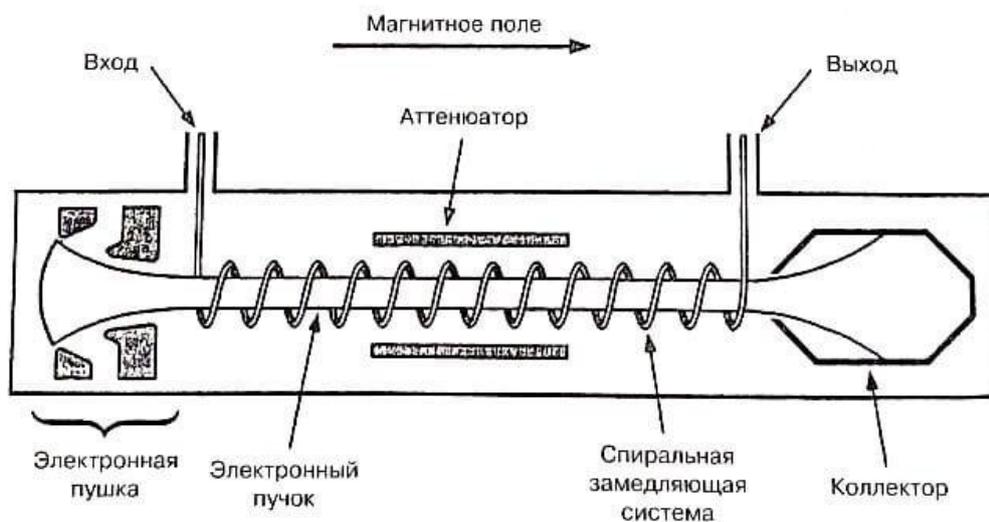


Рис. 1. Спиральная ЛБВ

По существу электронная пушка, электронный пучок и коллектор одни и те же для всех ЛБВ. И не смотря на заметные различия в конструкции волноведущих структур, принципы работы остаются одними и теми же.

Электронная пушка, или пушка Пирса, применяется для того, чтобы из электронов, эмитируемых с катода сформировать электронный пучок, способный взаимодействовать с ВЧ-волной.

Пушка разделяется на три области (см. рис.2). В первой из них располагается поверхность катода (головка катода) сферической формы. Фокусирующий электрод сделан так, чтобы создавать в первой области эквипотенциальные поверхности (эквипотенциали) примерно сферической формы с таким же центром кривизны, как и у головки катода. В результате электроны направляются в сторону центра кривизны катода.

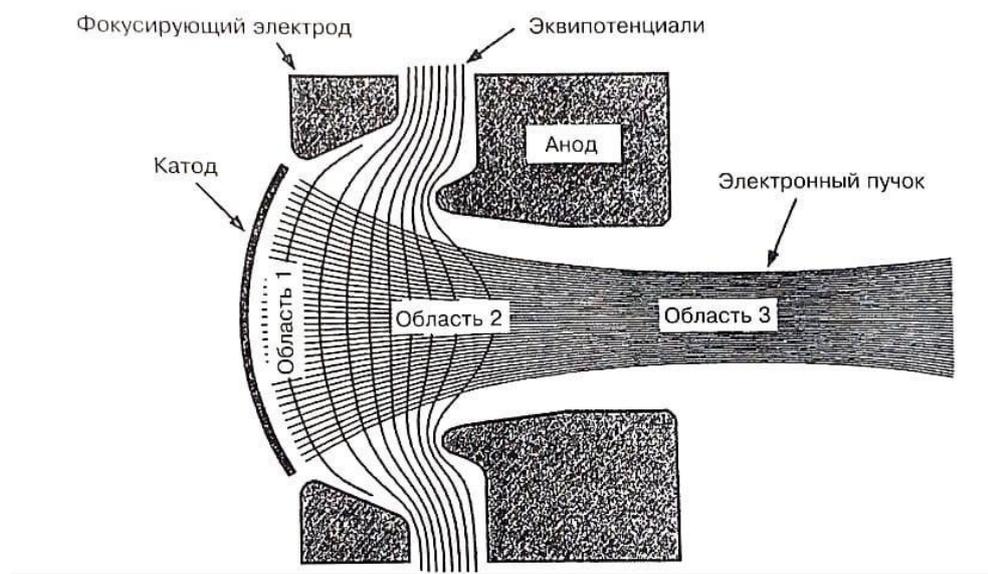


Рис. 2. Схематическое изображение пушки Пирса

Во второй области анод должен иметь отверстие для прохождения электронного пучка, и эквипотенциали прогибаются внутрь этого анодного отверстия. В результате образуется рассеивающая линза, которая оказывает расфокусирующее действие на электронный пучок.

И, наконец, в третьей области электронный пучок выходит из ускоряющего поля, действующего на участке катод–анод, и дрейфует под

влиянием сил пространственного заряда. Таким образом, электроны в пучке двигаются по траекториям, соответствующим универсальной кривой расширения пучка.

Электронный пучок, вылетев из электронной пушки, под силами пространственного заряда, показанными на рис. 3, которые довольно велики в СВЧ-приборах, стремится резко расширяться.

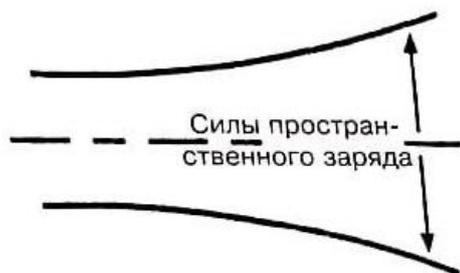


Рис. 3. Влияние сил пространственного заряда на электронный пучок.

Это расширение можно предотвратить при помощи фокусирующих сил (Рис. 4), равных и противоположно направленных силам пространственного заряда.

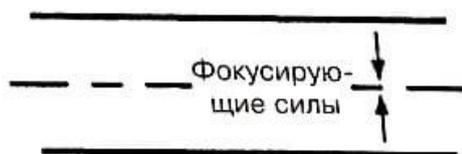


Рис. 4. Влияние фокусирующих сил на электронный пучок.

В современных ЛБВ фокусировка проводится с помощью МПФС (магнитная периодическая фокусирующая система). Основной принцип фокусировки посредством МПФС достаточно прост. Электронный пучок, входящий в поле одной из магнитных секций, начинает вращаться и взаимодействие его вращательного движения с аксиальным магнитным полем создает радиальную силу, приводящую к компрессии пучка.

Коллектор в лампе с бегущей волной играет роль токоприемника.

По мере выхода электронного пучка из зоны действия магнитной системы, магнитно-фокусирующее поле ослабевает, и после входа в коллектор

силы пространственного заряда заставляют пучок расширяться, как показано на рис. 5.

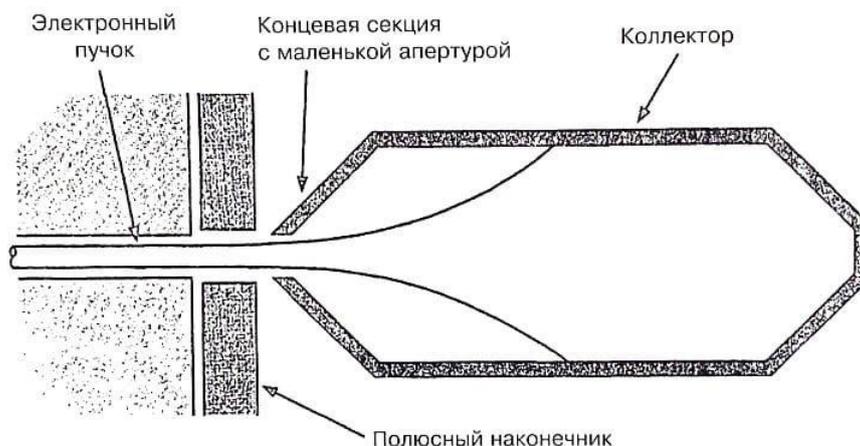


Рис. 5. Коллектор для ЛБВ

В ЛБВ на цепочке связанных резонаторов (ЦСР) в качестве замедляющей системы используется несколько десятков резонаторов, подобных резонаторам клистронов. Эти резонаторы, за исключением областей разрывов, электромагнитно связаны между собой, так что ВЧ-сигнал может распространяться вдоль системы. Существует множество различных видов связи резонаторов друг с другом. Если электронный пучок проходит через систему со скоростью, близкой к фазовой скорости волны, то может произойти усиление сигнала.

При соответствующем выборе размеров резонаторов и способа их связи друг с другом скорость электронов может быть высокой, и поэтому возможна работа на больших уровнях мощности.

За время созидательных лет развития ЛБВ было исследовано много типов замедляющих систем, однако именно спираль заняла лидирующую позицию в случае, когда требуется широкая полоса частот.

Спиральные ЛБВ нашли свое применение преимущественно в средствах связи и радиоэлектронной борьбы (РЭБ). На рис. 6 показано поперечное сечение спиральной лампы с бегущей волной, подобной используемым в большинстве системах РЭБ. Во многих таких приборах используются самые передовые технические решения, благодаря которым они обладают самыми лучшими характеристиками среди всех спиральных ЛБВ.

В спиральной ЛБВ электрическое поле между витками спирали имеет составляющую в направлении параллельному направлению движения электронов, что обеспечивает взаимодействие электронного пучка с полем.

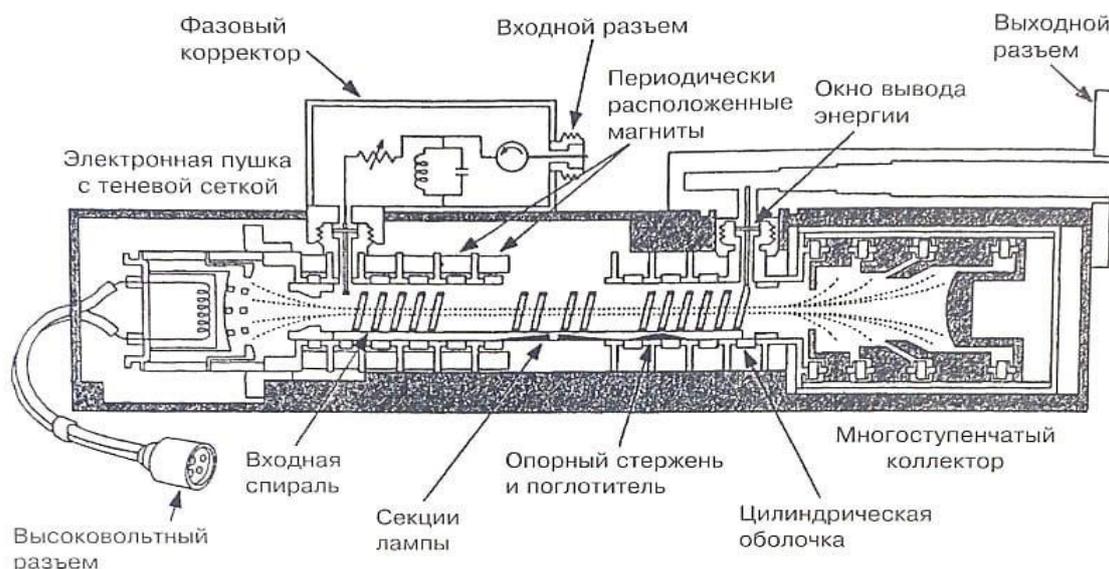


Рис. 6. Поперечное сечение спиральной ЛБВ для средств РЭБ.

На входе и на выходе спирали ЛБВ необходимо создать переходные участки, чтобы обеспечить согласование сопротивлений. Зачастую используют переход, образованный коаксиальной линией, подобный показанному на рис. 7.

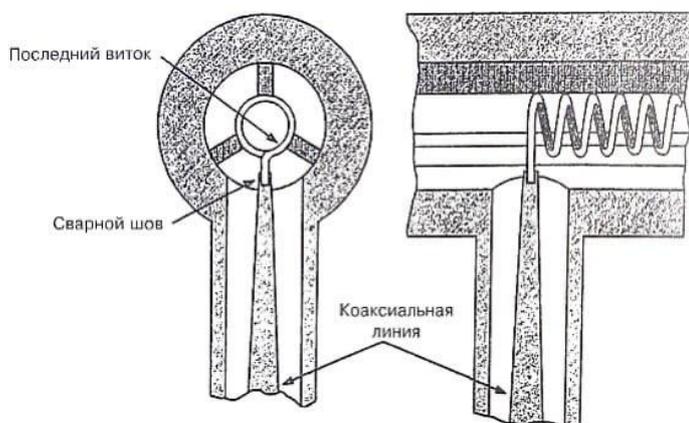


Рис. 7. Переход, образованный коаксиальной линией.

Также для достижения нужного согласования путем изменения волнового сопротивления в ЗС можно внедрить ступенчатую согласующую втулку. Ступеньки на втулке изменяют диаметр металлического экрана, расположенного вокруг спирали, при этом меняется волновое сопротивление

ЗС. Во втулке выполняют продольные прорезы для керамических стержней и коаксиальной линии.

КПД системы зависит главным образом от эффективного сопротивления материала спирали. На высоких частотах важны также диэлектрические потери. Анализ показывает, что потери растут с увеличением шага и радиуса спирали. Кроме того, потери растут пропорционально увеличению длины пути тока. Так же важно отметить, что удельное сопротивление металлической оболочки, окружающей спираль, не оказывает существенного влияния на величину потерь.

Для расчетов согласования в программе 3D-моделирования HFSS от компании ANSYS был построен переходный узел замедляющей системы с выводом энергии. За основу был взят чертеж лампы с бегущей волной УВИ-78, разработанной и производимой с 1987 года на АО «НПП«АЛМАЗ».

Данная ЛБВ (рис. 8) работает в диапазоне частот 9-10 ГГц, выходная мощность варьируется от 50 до 100 Вт, напряжение на аноде 3,5-4 кВ, коэффициент усиления равен 48 дБ.

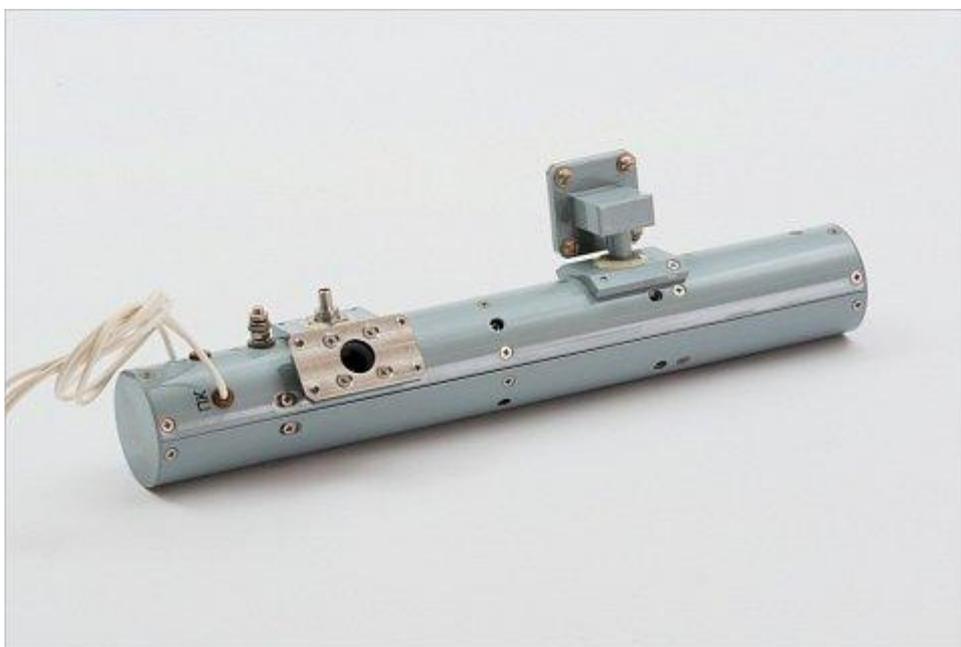


Рис. 8. Лампа с бегущей волной УВИ-78.

Далее представлены спроектированный узел замедляющей системы с коаксиальным выводом энергии и его элементы (рис 9).

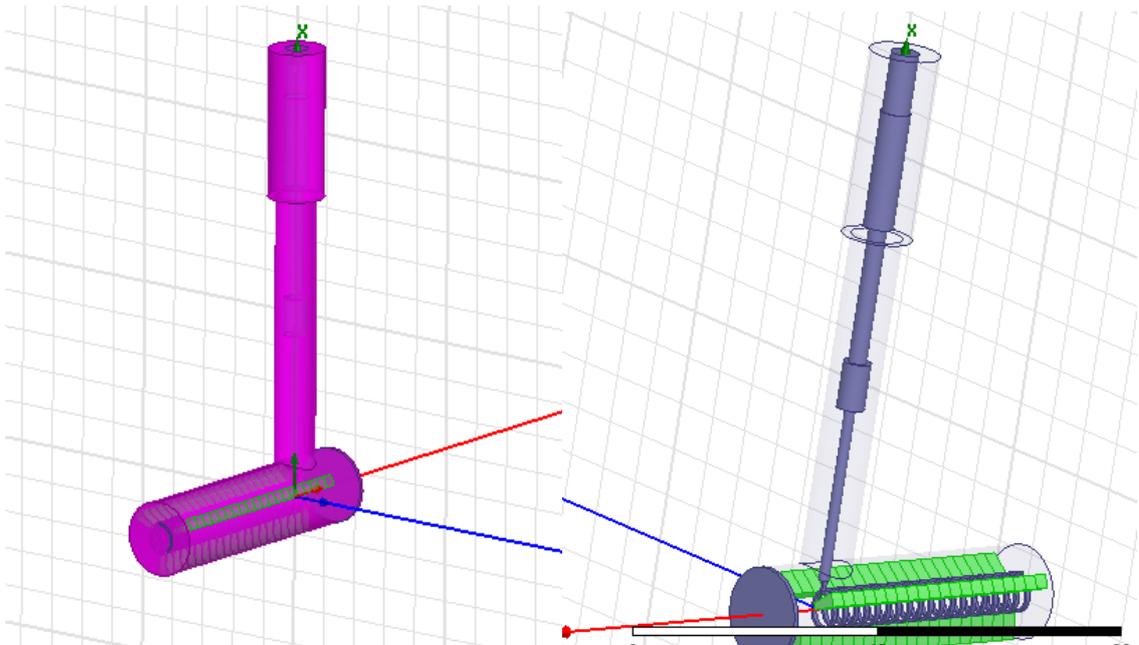


Рис. 9. Узел ЗС с выводом энергии УВИ-78.

Для представленной модели был проведен расчет согласования (см. рис. 10).

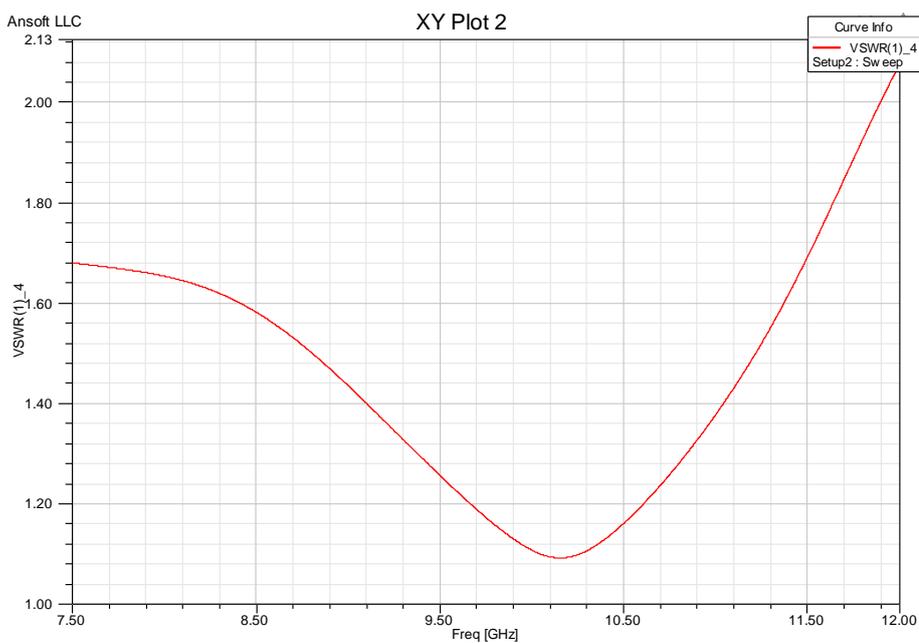


Рис.10. Расчетный КСВн вывода энергии исходной модели.

Далее данный график будет использоваться для сравнения с полученными результатами.

Для достижения лучшего согласования вывода энергии был спроектирован трехступенчатый коаксиальный переход вывода энергии. Переход показал себя положительно, улучшив согласование узла, однако после оптимизации конструкции под исходные габариты окна вывода энергии и

перехода от спирали к этому выводу, результат ухудшился и стал еще различим с исходным (см. рис.11).

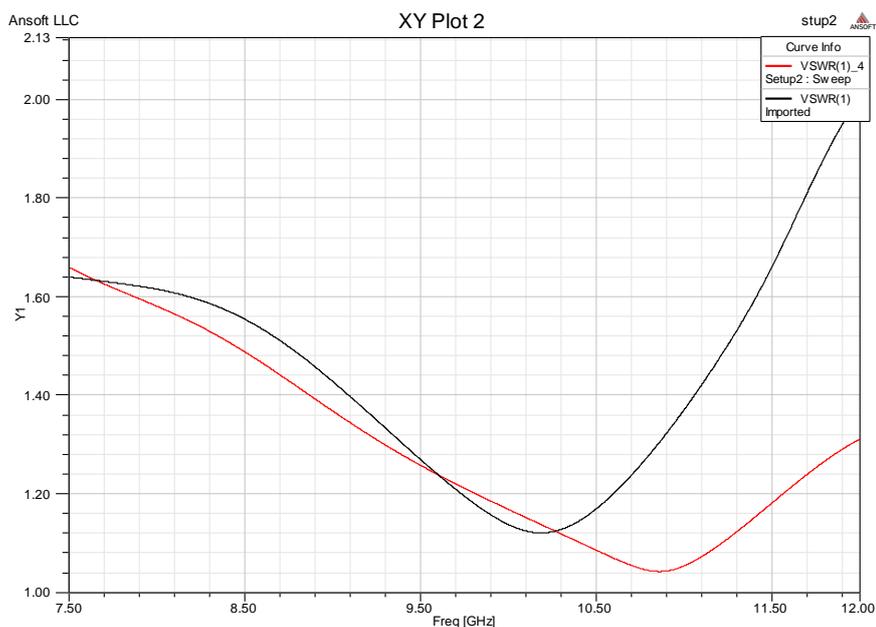


Рис. 11. Расчетный КСВн для модернизированного вывода энергии.

Было принято решение сохранить первую ступень стержня коаксиальной линии вывода энергии в исходном виде (с оптимизацией последующих стержней) и ввести в конструкцию согласующую втулку. Спроектированная деталь показана на рис. 12.

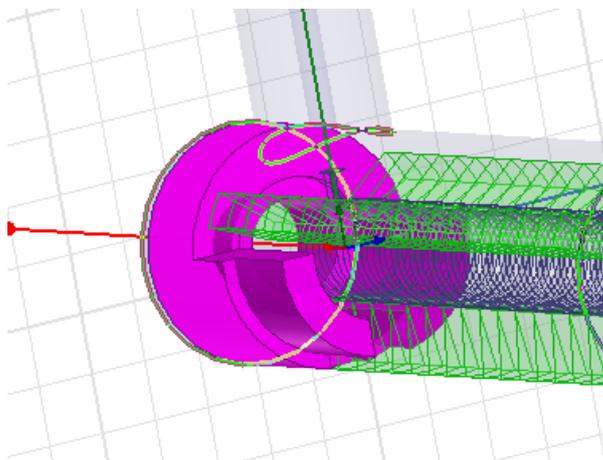


Рис. 12. Согласующая втулка.

После оптимизации размеров втулки под существующую модель УВИ-78 получили отличный результат согласования, который является намного лучшим, чем исходный (см. рис. 13).

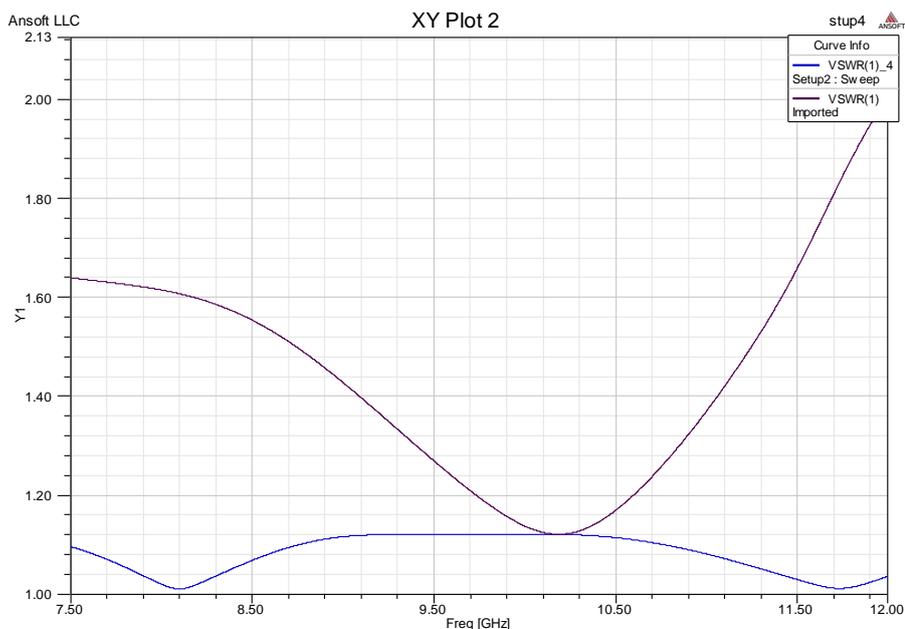


Рис. 13. Расчетный КСВн для модернизированного узла УВИ-78 с согласующей втулкой (синий) и исходный вариант (черный).

Таким образом, в теоретической части выпускной квалификационной работы рассматривались основные принципы работы лампы с бегущей волной и ее основных элементов. Был изучен принцип работы электронной пушки с электродами, исследована фокусировка электронного пучка магнитной системой и его дальнейшее поведение в коллекторе. Так же были изучены два основных вида замедляющей системы для ЛБВ и обговорен вопрос сохранения мощности и улучшения КПД системы.

В практической части выпускной квалификационной работы был спроектирован узел вывода энергии УВИ-78 с существенно лучшими характеристиками при сохранении технологичности изготовления. Был внедрен согласующий элемент компенсирующий неоднородность поля спирали вблизи вывода энергии, позволивший добиться достижения цели, поставленной в выпускной квалификационной работе. Конструкция, полученная в результате разработки, рекомендована к внедрению в ЛБВ УВИ-78.