

**Стройков Е.А., Полянская Т.И., Жарихин С.В.,
Паницков В.И**
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Особенности разработки мощных широкополосных ЛБВ на секционированных встречно-штыревых замедляющих структурах и цепочке связанных резонаторов с фокусировкой магнитной периодической фокусирующей системой

Рассмотрены способы проектирования секционированных замедляющих систем (ЗС) на основе встречно-штыревых замедляющих структур (ВШ) и цепочки связанных резонаторов (ЦСР) для мощных ЛБВ с выходной непрерывной (средней) мощностью от 0,5 до 5,5 кВт, импульсной мощностью до 10 кВт, усилением не менее 30 дБ, с полосой рабочих частот от 4-х до 10-ти % и выше, с фокусировкой магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС); приведены таблицы с параметрами мощных секционированных ЛБВ, разработанных в НПП «Исток», работающих с постоянным и переменным входным сигналом, рассмотрена совокупность факторов, влияющих на амплитудно-частотные характеристики мощных секционированных ЛБВ, рассмотрена проблема работы мощных широкополосных ЛБВ с постоянным входным сигналом; приведены данные по разработке квазинепрерывной мощной широкополосной ЛБВ на секционированной системе ВШ с полосой рабочих частот 10% и 15%.

Ключевые слова: широкополосная ЛБВ, ЦСР, ВШ, секционированная замедляющая система, АЧХ ЛБВ.

В настоящее время, судя по поступающим заказам, сохраняется потребность в мощных широкополосных ЛБВ в сантиметровом диапазоне длин волн, импульсного и непрерывного действия с шириной полосы рабочих частот до 10% и выше.

Несмотря на достаточно большой временной период развития мощных ЛБВ как за рубежом, так и в России, а также в АО «НПП «Исток» им. Шокина» в частности, разработка и производство мощных широкополосных ЛБВ остается достаточно сложной и трудоемкой задачей. Это обусловлено тем, что совокупность предъявляемых к ЛБВ требований - сочетание широких рабочих полос с большой средней (непрерывной) и импульсной мощностью можно удовлетворить, преимущественно проектируя ЛБВ на основе замедляющей системы типа цепочки связанных резонаторов (ЦСР), которая в отличие от спиральной ЗС не имеет естественной широкой полосы прозрачности и усиления. Для получения относительно широких рабочих полос с усилением свыше 20 дБ в ЛБВ на ЦСР применяют секционированные построения ЗС, где каждая секция имеет свои электродинамические параметры. Проектирование, сборка и настройка такой ЗС, совмещенной с магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС), позволяющей значительно снижать массогабаритные характеристики, и составляет суть упомянутой выше сложности. Несмотря на конкуренцию с мощными спиральными ЛБВ, которые в настоящее время уверенно продвинулись на уровень 0,5 – 1, 5 кВт средней и непрерывной мощности в 2-х и 3-х см диапазоне длин волн, потребность в широкополосных

ЛБВ на ЦСР в России, даже на уровне этих мощностей и выше, сохраняется в силу их значительно большей устойчивости к тепловым нагрузкам на ЗС.

Идеальным или наиболее жестким требованием по полосе, конечно же, является выполнение условия подачи постоянной входной мощности на вход ЛБВ во всем рабочем диапазоне и получение при этих условиях выходной мощности с минимально возможным перепадом по коэффициенту усиления. Например, для ЛБВ в 2-х и 3-х см диапазоне с полосой (4-6) % этот перепад находится в пределах (0,5 – 1,2) дБ, для ЛБВ с полосой до 10% и выше – в пределах до (1,5 – 3) дБ.

Как правило, проектирование ЛБВ, если задано усиление более 30 – 35 дБ, осуществляется на режим работы с постоянным входным сигналом. В пределах (4-6)-ти процентных полос при производстве ЛБВ этот режим получается довольно стабильно. Однако уже при разработке мощных ЛБВ с полосой от 8-10-ти процентов разработчики не всегда фиксируют режим постоянной входной мощности в ТЗ, резервируя в аппаратуре возможность разбиения рабочей полосы на поддиапазоны с постоянной входной мощностью, либо возможность подстройки входной мощности в любой точке рабочего диапазона. Следует заметить, что это не самый худший вариант в сравнении с многолитерным обеспечением этого диапазона.

Разработка мощных ЛБВ на АО «НПП «Исток» им. Шокина» традиционно производится на основе секционированных ЗС типа ЦСР и модификации встречно-штыревой замедляющей системы ВШ с синхронизмом на π виде длинноволновой полосы прозрачности. На рис. 1 а, б представлены изображения этих систем.



Рис.1. Замедляющие системы мощных ЛБВ: а) цепочка связанных резонаторов (ЦСР), б) система типа встречные штыри (ВШ).

Выбор области размещения рабочих полос обусловлен наибольшим сопротивлением связи в этом месте, а значит наибольшей эффективностью взаимодействия и усиления. Использование ЗС типа ВШ позволяет значительно снизить массогабаритные характеристики при сохранении хорошей теплоустойчивости в приборах с диапазонами рабочих частот от 1,5 до 15 ГГц с выходной непрерывной мощностью до 5,5 кВт и импульсной до 10 кВт. Кроме того, система ВШ не имеет склонности к возбуждению вблизи высокочастотной границы полосы прозрачности и по этой причине она может быть более широкополосной по сравнению с ЦСР [1].

ЗС формируется из секций, каждая из которых имеет свою дисперсионную характеристику, отсечку (низкочастотную границу полосы прозрачности), сопротивление связи (параметр взаимодействия с электронным пучком), полосу согласования с оконечными нагрузками (поглотителями либо переходными волноводами), период, определенную длину, которая выбирается в зависимости от расположения секции в ЗС. Для получения наиболее равномерного усиления в рабочей полосе частот существуют определенные соотношения для расстановки отсечек секций. Соотношения, по которым выстраиваются частоты отсечек в 3-х секционной ЛБВ, были описаны в 70-х годах прошлого века [2].

$$F_{pi}^{BX} = 1,019 \cdot F_H; \quad F_{pi}^{cp.c} = 1,102 \cdot F_H; \quad F_{pi}^{BIX} = 0,9987 \cdot F_H,$$

где $F_{ri}^{вх}$, $F_{ri}^{ср.с.}$, $F_{ri}^{вых.}$ - частоты отсечек входной, средней и выходной секций; F_n – нижняя частота рабочего диапазона.

Независимо от литературных источников в НПП «Исток» приблизительно такие же соотношения, с небольшим отличием по коэффициенту для входной секции, были получены из соотношения размеров широких стенок отрезков волноводов чебышевских ступенчатых переходов[3].

В ходе опытно-конструкторских работ был выработан вариант более простых расстановок отсечек в трехсекционной ЗС, который позволяет получать качественные АЧХ ЛБВ с шириной рабочей полосы до 10% включительно с микропервеансами электронного пучка от 0,3 до 0,9 мкА/В^{3/2}. В этом случае $F_{ri}^{вх} = F_{ri}^{вых.}$ либо $F_{ri}^{вх} = F_n$, где F_n располагается вблизи отсечки выходной (входной) секции примерно на расстоянии (1,15 - 1,2)λ. При этом полоса будет зависеть не только от отсечек, но и от совокупности вышеперечисленных параметров секций. Для сравнения на рис.2 представлены расчетные АЧХ с двумя вариантами расстановок отсечек: 1 вар. – «чебышевская» расстановка, 2 вар. – упрощенная расстановка.

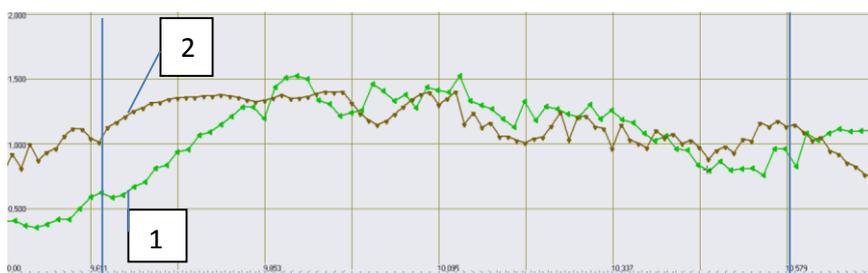


Рис.2. Расчетные АЧХ ЛБВ 3-х см диапазона с различными вариантами расстановок отсечек в секционированной ЗС на ВШ.

При расстановке отсечек по 2 варианту секционированная ЛБВ упрощается из-за уменьшения количества типов размеров деталей ЗС; упрощается согласование секций в рабочей полосе частот, уменьшается вероятность самовозбуждений секций, уменьшается перенасыщение вблизи низкочастотного края рабочей полосы при работе с постоянным входным сигналом. В таблице 1 приведены параметры мощных ЛБВ, разработанных в НПП «Исток» на основе секционированных ЗС типа ЦСР и ВШ, работающих при постоянном входном сигнале с перепадами по коэффициенту усиления, приведенными выше. Почти все ЛБВ имеют трехсекционное построение ЗС; ЛБВ УВ-312, УВ-241 – квазитрехсекционные, с распределенным поглотителем в средней секции, с фокусировкой электронного луча в соленоиде.

Таблица 1

Наименование прибора	Диапазон частот ГГц	Полоса рабочих частот %	Выходная импульсная мощность кВт	Коэф. заполнения %	Вид зам. системы	Коэф. усиления дБ	Напряжение зам. системы кВ	Ток катоды А
УВ-312	8-10	22	>1,0	100	ЦСР	23	10,5	1,0
УВ-326	7,9-8,4	6	1,5	100	ВШ	>36	10,5	1,0
УВ-241	4 см	7	>1,2	100	ЦСР	33	10,5	1,0
УВ-329	2 см	4	1,5	100	ЦСР	34	14	0,8
УВИ-113	9,2-9,7	5	>0,4	25	ВШ	45	8,4	0,3
УВИ-108	3 см	6	> 0,6	10	ВШ	30	10	0,6

УВИ-25-8	2см	4	неск. ед.	3,0	ВШ	43	24	1,2
УВИ-25-6	16,5-17	3	>10	7,0	ЦСР	50	29	2,0
УВИ-25-7	9.6-10	4	7	10	ВШ	38	18	2.0
УВ-___ Лит.1,2,3	3 см	5,5,5	> 0,75	длинный импульс	ВШ	>37	10-10,5	0,7- 0,8

В таблице 2 приведены параметры ЛБВ, которые не эксплуатируются с постоянным входным сигналом. Рабочий диапазон ЛБВ УВ-374, SHF-039, ИФ-920 разбит на поддиапазоны, а в состав ЛБВ УВ-382А,Б, УВ-383, УВ-384А,Б – введен корректор входной мощности, позволяющий подавать на вход ЛБВ оптимальный входной сигнал.

Таблица 2

Наименование прибора	Диапазон частот ГГц	Полоса рабочих частот %	Выходная импульсная и непр. мощность кВт	Коэф. заполнения %	Вид зам. системы	Коэф. усиления дБ	Напряжение зам.системы кВ	Ток катода А
УВ-374	13,75-14,5	5	>0,4	100	ВШ	>30	9	0,3
SHF-039	9,1-9,9	8	>4	10	ВШ	>40	15.5	1,8
ИФ-920	9,75-10,5	7	2	100	ВШ	>40	11,5	1,0
УВ-382А	5,7-6,425	12	4,5-5,5	100	ВШ	>30	18-19	1,6-1,7
УВ-382Б	6,425-7,075	10	4,5-5,5	100	ВШ	>30	18-19	1,6-1,7
УВ-383	7,9-8,4	6	4,0-5,0	100	ВШ	>30	18,5-19,7	1,3-1,5
УВ-384А	12,5-13,5	8	3,6-4,5	100	ЦСР	30	18,5-19,7	1,5-1,65
УВ-384Б	13,5-14,8	9	3,6-4,5	100	ЦСР	30	18,5-19,7	1,5-1,65

При проектировании этих ЛБВ предполагался режим работы с постоянным входным сигналом; построение секционированных ЗС было выполнено по правилам, описанным выше. Расчет взаимодействия с электронным пучком, подбор электродинамических параметров и длин секций проводился с помощью отечественной программы DEV 5.1, позволяющей рассчитывать ЛБВ с различными секциями, в том числе и с запредельными отсечками [4]. Эта программа тестировалась на базе разработок предприятия АО «НПП «Исток» им. Шокина» и обеспечивает достаточное хорошее совпадение расчета с экспериментом. В качестве расчетного примера на рис.3 а,б представлены амплитудно-частотные и амплитудные характеристики ЛБВ УВ-382А и УВ-384Б, рассчитанные при постоянных входных сигналах. Как видно из рисунков, характеристики имеют почти классический вид, расчет проведен с хорошей сходимостью итераций в расчетных точках, что должно гарантировать достоверность результатов.

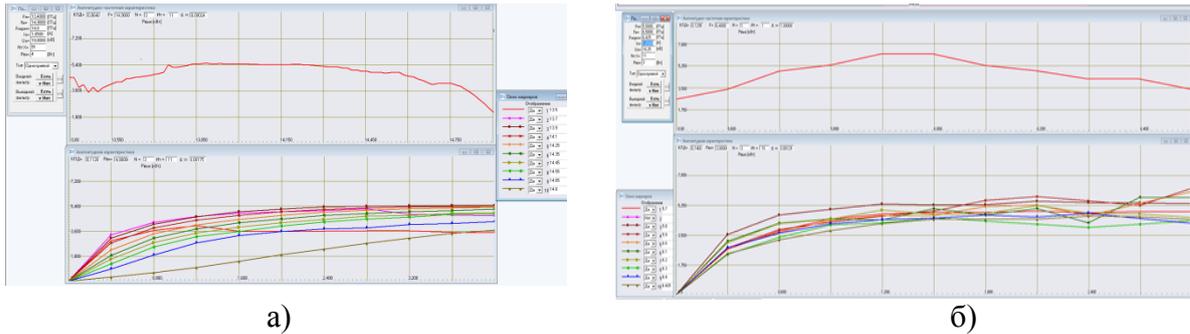


Рис.3. Расчетные АЧХ при постоянных входных сигналах и АХ ЛБВ: а) УВ-382А; б) УВ384Б

На практике стабильно получить режим постоянного входного сигнала не удается. Справедливости ради надо отметить, что отдельные приборы, работающие в режимах по ТЗ, все-таки получаются, но чаще постоянный сигнал реализуется в импульсных режимах с повышенной скважностью (50 или 100), которые используются при настройке приборов. На рис. 4 представлены экспериментальные АЧХ ЛБВ УВ-382А, измеренные в непрерывном режиме работы при постоянных входных сигналах: рабочая полоса частот 12%, перепад по коэффициенту усиления 1,9 дБ. Это один из двух приборов, которые работали с постоянным входным сигналом. Всего в ходе разработки и единичных поставок было собрано 9 таких приборов.

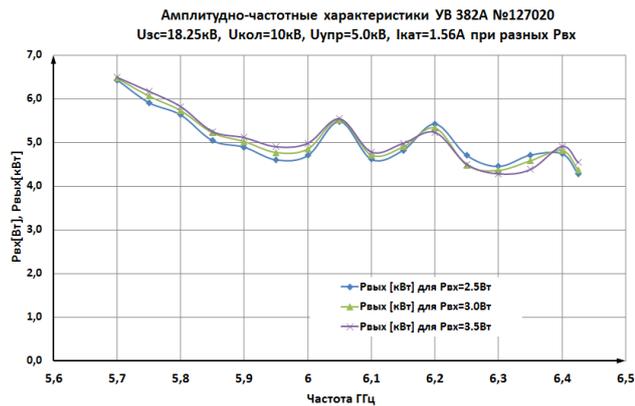


Рис.4. Экспериментальные АЧХ ЛБВ УВ-382А при различных постоянных входных сигналах.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что построение ЗС с наиболее оптимальной расстановкой отсечек не является единственным определяющим фактором для получения качественной АЧХ мощной широкополосной ЛБВ с постоянным входным сигналом.

Существует ряд факторов, влияющих как на характеристики, так и на общую полосу усиления секционированной ЛБВ. Чем шире проектируемая полоса усиления, тем большее влияние оказывают данные факторы.

Определить эти факторы можно как технологические, конструктивные и тепловые, хотя их разделение достаточно условно.

К технологическим можно отнести:

- точность реализации дисперсионных характеристик секций ЗС и их отсечек при изготовлении деталей ЗС и пайке секций; известно, что после паяк отсечки могут изменяться вследствие заплывания припоя в полость ЗС; особенно это критично для ЗС типа ВШ в 2-х и даже 3-х см диапазоне длин волн;

-точность реализации минимально возможного уровня КСВн секций после паек; как правило КСВн после паек ухудшается, подстройка КСВн в секциях и в спаянной ЗС осуществляется за счет изменения геометрии концевых резонаторов секций и резонаторов перед поглотителями, что может повлиять на АЧХ; в случае невозможности подстройки на АЧХ также будут влиять всплески КСВн;

- состояние (распределение вдоль пространства взаимодействия) электронного пучка после настройки токопрохождения в ЗС; при применении для фокусировки пучка магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС), особенно в мощных непрерывных приборах, влияние этого фактора существенно; пучок вдоль системы может быть локально пережат, либо локально расширен, что приводит к возникновению дополнительных пульсаций, уменьшению электронного КПД и может как локально, так и в целом отразиться на АЧХ;

к конструктивным факторам:

- необходимость конструктивно совмещать МПФС и ЗС, когда полюсные наконечники магнитной системы являются элементами замедляющей системы, при этом параметр устойчивости α и пульсации пучка соответственно зависят от периода ЗС, поскольку он определяет период МПФС; зачастую параметр α получается больше 0,2, что может повлечь за собой технологические проблемы, описанные выше;

- невозможность конструктивно обеспечить достаточно большой расход охлаждающей жидкости и более эффективное охлаждение ЗС при ее совмещении с МПФС; к тепловым факторам:

- возникновение в мощных непрерывных, а иногда и в квазинепрерывных ЛБВ с МПФС явления локальных тепловых перегрузок в секциях ЗС, приводящих к явлениям «забросов» (быстрому, иногда лавинообразному) увеличению тока ЗС в отдельных частотных точках рабочего диапазона; иногда преодолеть это явление удастся путем изменения режима по напряжению ЗС и тока катода, при этом оптимальность и качество АЧХ может нарушаться;

- повышение тока ЗС до критического по тепловой нагрузке на ЗС при достижении в отдельных частотных точках рабочего диапазона режима насыщения или перенасыщения выходной мощности; однозначно в этом случае работа при постоянном входном сигнале возможна при повышенных скважностях, а при приближении к непрерывному режиму невозможна; в данном случае АЧХ измеряется по минимально допустимому уровню выходной мощности с подачей переменного сигнала на входе.

Несмотря на достаточно длительную, в течение нескольких десятилетий, проработку темы проектирования мощных широкополосных ЛБВ на ЦСР, она продолжает представлять интерес для анализа и развития в современных научно-технических работах. Так, например, в работе [4] описанные выше секционированные ЛБВ определены как п-секционные «чебышевские усилители» и сделан вывод о том, что описанный способ построения является наиболее перспективным для получения широких и наиболее равномерных полос усиления ЛБВ на ЦСР. Этот вывод, в общем-то, отражается в проведенном и представленном в данной статье ряде разработок АО «НПП «Исток» им. Шокина». Особенно это построение хорошо себя показало на базе ЗС типа ВШ, которая позволяет применять более пологие, чем на ЦСР, дисперсионные характеристики секций и получать десятипроцентные рабочие полосы и выше на трехсекционных ЗС. Предположение о множественном секционировании ЗС как способе увеличения ширины рабочей полосы, скорее всего не может являться рациональным с точки зрения трудоемкости производства таких ЛБВ (особенно мощных непрерывных), хотя расчетные и недавно полученные экспериментальные данные по характеристикам четырехсекционной ЛБВ положительны.

В настоящее время в НПП «Исток» продолжают ОКРы по разработке ЛБВ описанного в данной статье типа. Так, например, для обеспечения потребности заказчика за прошедший год была разработана квазинепрерывная ЛБВ на ЗС типа ВШ в 3-х см диапазоне длин волн в трехлитерном исполнении 15-ти процентного диапазона усиления (табл.1, УВ-___, лит.1,2,3). В рамках этой же ОКР были созданы образцы с шириной рабочей полосы 10% с перекрытием 2 и 3 литер и 15% с перекрытием трех литер. Первый образец трехсекционный, второй четырехсекционный. Необходимо отметить, что это квазинепрерывные ЛБВ, т.е. штыревая замедляющая система разрабатывалась с учетом непрерывных тепловых нагрузок. На рис.5 и рис.6 представлены экспериментальные АЧХ данных ЛБВ с описанием характеристик по перепадам коэффициента усиления и электрическим режимам работы.

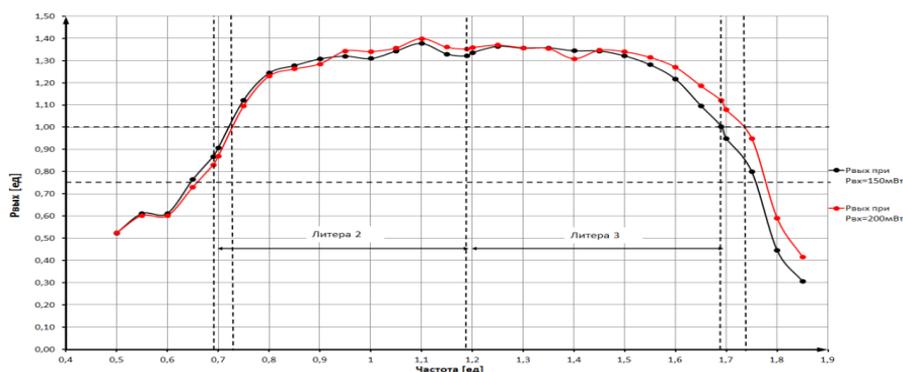


Рис.5. АЧХ квазинепрерывной ЛБВ X-диапазона с шириной полосы 10%:
 $U_{кат}=10.3кВ$, $I_{кат}=770мА$; минимальный коэффициент усиления в рабочем диапазоне частот и перепад по коэффициенту усиления при постоянном входном сигнале: 37-38 дБ и 1,4-1,5 дБ соответственно.

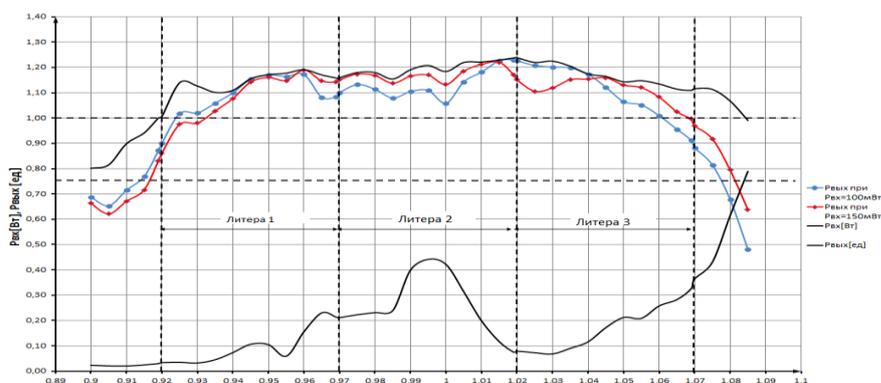


Рис.6 АЧХ квазинепрерывной ЛБВ X-диапазона с шириной полосы 15%:
 $U_{кат}=10.2кВ$, $I_{кат}=760мА$; минимальный коэффициент усиления в рабочем диапазоне частот и перепад по коэффициенту усиления при постоянном входном сигнале: 37.6дБ и 1.54 дБ соответственно.

Образцы работают с постоянным входным сигналом на уровнях выходной мощности, заданной в ТЗ и имеют значительный запас во всех частотных точках. Пока что это единичные приборы, но полученные с первых образцов характеристики, относительная легкость настройки МПФС и не очень критичный тепловой режим ЗС позволяют надеяться на стабильность полученного результата при дальнейших сборках, по крайней мере, для трехсекционной ЛБВ с десятипроцентной рабочей полосой.

На рис.6 также изображена АЧХ четырехсекционной ЛБВ с переменным входным сигналом и с выходной мощностью по уровню насыщения. Как видно из рисунка уровень

насыщения от 1 кВт и выше имеет вся 15%-ная рабочая полоса; перепад по коэффициенту усиления в этом случае в рабочей полосе составляет 11 дБ (минимальный коэффициент усиления 34 дБ, максимальный – 45дБ). Если применить корректор входной мощности и отработать технологический процесс изготовления, то уже на данном этапе можно зафиксировать более устойчивую к тепловым нагрузкам альтернативу спиральной ЛБВ с уровнем выходной мощности не менее 1 кВт и рабочей полосой не менее 15%.

Таким образом, анализируя опыт разработок мощных секционированных ЛБВ на основе ВШ и ЦСР, можно сделать вывод о том, что качество АЧХ ЛБВ подобного типа, перепады по коэффициенту усиления, возможность работать при постоянном входном сигнале, а также ширина полосы усиления, зависят как от способа формирования секционированных ЗС при расчете и проектировании, так и от целого ряда технологических, конструктивных и тепловых факторов. Работа и меры по учету, устранению или компенсации этих факторов в процессе разработки и производства ЛБВ могут сделать прибор чрезвычайно трудоемким и дорогим, особенно это относится к мощным непрерывным приборам или приборам с высокой средней мощностью. Решением этой проблемы могло бы стать применение корректоров входной мощности с конструкцией, устойчивой к воздействию внешних воздействующих факторов. Это решение широко применяется как в нашей стране, так и за рубежом даже для ЛБВ спирального типа.

Библиографический список

1. 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.
2. Григоренко Л.П., Канавец В.И., Корешков Е.Н., Мозговой Ю.Д. Исследование усиления электромагнитных колебаний в многосекционных ЛБВ на связанных резонаторах. Электронная техника, Сер.1 Электроника СВЧ, 1978,с.27.
3. А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов Справочник по элементам волноводной техники. Москва: Советское радио. -1968, с. 373.
4. Комаров Д.А. Разработка мощных электровакуумных приборов сверхвысокочастотного диапазона О-типа с улучшенными полосовыми характеристиками пассивных и активных резонансных структур, Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва: ФГУП «НПП «Торий»-2014.