

Широкополосные и низковольтные усилительные клизтроны среднего и высокого уровня выходной мощности, разработанные в Объединении «Светлана» на рубеже 20-го и 21-го столетий

(К 55-летию образования отдела №4 ЗАО «Светлана- Электронприбор» и 125-летию образования Объединения «Светлана».)

Представлены результаты разработки ряда конструкций мощных широкополосных и низковольтных усилительных клизтронов сантиметрового диапазона длин волн.

Ключевые слова: клизтрон, резонатор

С момента своего образования в октябре 1958г. в ОКБ завода им. Ф.Энгельса, (позднее вошедшего в Объединение «Светлана»), отдел № 4, предназначенный для разработок усилительных клизтронов, в основном специализировался в области создания бортовых конструкций усилительных клизтронов малого и среднего уровня выходной мощности (от 20 до 200 Вт) в нижней части дециметрового диапазона длин волн от 3-х до 0,8 дм. [1,2].

Однако, уже с конца 50-х и с начала 60-х годов, при разработках усилительных клизтронов, отдел не замыкался в определенном ему направлении работ. Так, например, в это время был разработан относительно мощный 3-х сантиметровый импульсный усилительный клизтрон КИУ-14 с уровнем выходной импульсной мощности 100 кВт, при средней мощности порядка 2-х кВт. Клизтрон имел «обычную» для того периода времени классическую однолучевую электронно-оптическую систему (ОЭОС), 4-х резонаторную конструкцию с использованием однозачорных тороидальных резонаторов (ОТР) и имел характерные для такого типа конструкций относительно малую полосу пропускания частот не более 0,2% и высокие питающие напряжения- 45÷50 кВ. (см. Табл. 1, поз.1).

В дальнейшем, совместное использование в конструкциях усилительных клизтронов высокоэффективных резонансных систем, таких, например, как двухзачорные резонаторы коаксиального типа (ДКР) и многолучевых высокопервечанских электронно-оптических систем (МЭОС) позволило преодолеть такие существенные недостатки, присущие классическим конструкциям усилительных клизтронов, как узкая полоса усиливаемых частот и сравнительно высокие питающие напряжения. Это, в свою очередь, позволило, во-первых, разрабатывать конструкции усилительных клизтронов, успешно конкурирующие с другими, близкими по назначению, типами приборов СВЧ (например, ЛБВ) и не имеющие аналогов за рубежом и, во-вторых, с целью ухода от всё возрастающей конкуренции со стороны развития твёрдотельного направления в создании СВЧ усилительных устройств, расширить область разрабатываемых приборов в сторону создания более коротковолновых и более мощных, а потому более конкурентно способных конструкций.[1,2].

На пути создания таких приборов уже в 70-е годы прошлого столетия были разработаны близкие по конструкции мощные импульсные многолучевые и, потому, низковольт-

ные усилительные клистроны с ОТР резонаторами - КИУ-63 с уровнем выходной мощности $200 \div 300$ кВт в 5 см диапазоне (см. Табл.1. поз.2) и КИУ-68 с уровнем выходной мощности $150 \div 200$ кВт в 6 см диапазоне (см. Табл.1, поз.3).

Совместное применение ДКР и МЭОС открыло возможность создания ещё более широкополосных, низковольтных и более коротковолновых приборов, среди которых одним из первых (в 80-е годы прошлого столетия) был 19-лучевой низковольтный широкополосный импульсный усилительный клистрон 3-см диапазона «Арктур» с полосой усиливаемых частот около 5% . В этом приборе была реализована предельно возможная совокупность основных параметров, которые можно получить в 3-см диапазоне для многолучевой конструкции с использованием ДКР при ускоряющем напряжении 5 кВ и плотности тока эмиссии с катода $25\text{--}26$ А/см² (см. Табл.1 поз.4)

Дальнейшее наращивание выходной мощности при сохранении широкой полосы усиливаемых частот и при возможно более низких питающих напряжениях могло быть достигнуто путем увеличения количества лучей.

При этом, в тех случаях, когда это увеличение ограничено размерами пространства взаимодействия резонаторов клистроны, одним из эффективных способов увеличения числа лучей является разработка многоствольных конструкций (МСК), представляющих собой параллельное соединение двух и более «парциальных» клистронов, размещённых в общей вакуумно-плотной оболочке с общими цепями разделения мощности на входе и сложения мощности на выходе, каждый из которых имеет допустимое число лучей, но в сумме обеспечивается необходимое количество для получения заданной мощности.

Разработки многоствольных приборов (МСК) в отделе № 4 ЗАО «Светлана- Электронприбор», обладающим правом приоритета на их создание (конструкция защищена авторскими свидетельствами [3,4]), начались ещё в 80-е годы прошлого столетия, когда в результате проведения НИР «Азау» был разработан первый двухствольный усилительный 14-лучевой (по 7 лучей в каждом стволе) клистрон 5- см диапазона длин, в котором двухствольность использовалась для удвоения рабочей полосы частот.

В случаях, когда МСК разрабатывается с целью увеличения выходной мощности, должна быть разрешена проблема синфазного сложения мощности в пределах рабочей полосы частот, что обеспечивается, в основном, конструктивной идентичностью стволов, одинаковыми режимами питания, одинаковыми системами настройки и симметричностью конструкций единых ввода и вывода энергии.

Первая разработка такого прибора по созданию широкополосного усилительного МСК прибора (ОКР «Альтаир-2»), способного обеспечить в 3-х см диапазоне в пределах рабочей полосы частот 5,4% уровень выходной импульсной мощности $12 \div 15$ кВт при анодном напряжении $6 \div 6,5$ кВ. была начата в 1996 г. Сложность разработки была усугублена необходимостью использования в приборе низковольтной импульсной модуляции по сеточному электроду (СМ) (см. Табл. 1, поз.5). Эта разработка прибора с указанными параметрами была завершена в 1999 г. [5,6]. Однако, в связи с тем, что заказчик прибора неоднократно вносил изменения в ТЗ на прибор с целью корректировки формы его АЧХ, ОКР был завершён только в 2008 г. созданием прибора с АЧХ, разделённой в пределах

рабочей полосы частот около 4,5%, на приблизительно 3 равных участка, выходная мощность в которых должна быть не менее 5 кВт на двух крайних участках и не менее 22,5 кВт на среднем. Прибор с такими параметрами получил наименование КИУ-208 (см. Табл. 1, поз.6 и Рис. 1).

Таблица 1

Параметр	КИУ-14	КИУ-63	КИУ-68	Арктур	Альтаир-2	КИУ-208	КИУ-188	Астрон-П	Астрон-О	КИУ-201	Астория-1	Вариант	Автомат
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Длина волны, см	3	5	6	3	3	3	5	4,5	4,5	3	3	3	10
Выходная мощность, кВт	100 Имп.	200-300 Имп.	150-200 Имп.	5 Имп.	12-15 Имп.	5-25 Имп.	100 Имп.	3	30 Имп.	12-15 Имп.	12-15 Имп.	3	10 Имп.
Рабочая полоса частот, %	0,2	2	1,6	5	5,4	4,5	5	2	6	5,4	2x2	2	7
Напряжение луча, кВ	45-50	27-32	24	5	6-6,5	6-6,5	12-14	7	7	6-6,5	6-6,5	7	6-7
Сквозность	50	100	100	100	30	30	15	-	10	22	18	-	10
Тип резонаторов	ОТР	ОТР	ОТР	ДКР	ДКР	ДКР	ДКР	ОТР	ДКР	ДКР	ДКР	ОТР	ДКР
Количество ствол	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	1	1
Количество лучей	1	19	7	19	54	54	46	7	46	54	54	7	19
Модуляция	АМ	АМ	АМ	АМ	СМ	СМ	АМ	Квази Непр.	СМ	АМ	АМ	Непр.	АМ
Охлаждение	Жидк .	Жидк к.	Жидк к.	Жидк .	Жидк.	Жидк к.	Жидк к.	Жидк.	Жидк.	Жидк к.	Возд.	Жидк	Возд.

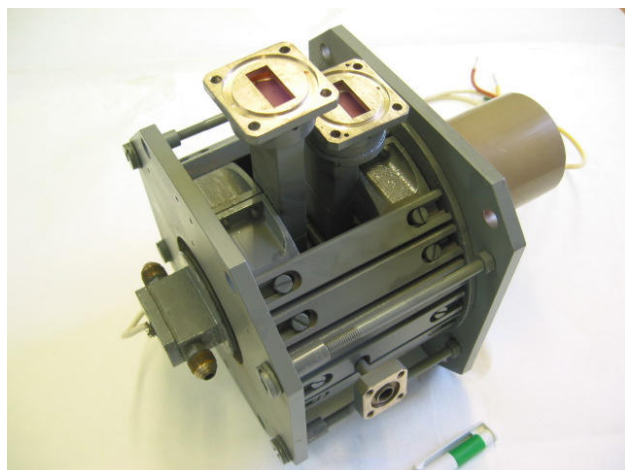


Рисунок 1



Рисунок 2

Следующая двухствольная конструкция была разработана в течение 2001 ÷ 2004 гг., когда в результате проведенной НИОКР [7] был создан мощный широкополосный им-

пульсный клистрон с анодным управлением катодным током (АМ)- КИУ-188, обеспечивающий в рабочей полосе частот 5 % в 5-см. диапазоне уровень выходной мощности порядка 100 кВт (см. Табл. 1, поз.7 и Рис. 2).

В этот же период времени в отделе завершились 2 разработки по созданию комплекта мощных усилительных клистронов 4-х см диапазона, предназначенных для использования в каналах обзора и подсвета современной РЛС доплеровского типа. Эти работы были начаты ещё в 90-х гг. прошлого столетия и после вынужденного перерыва были завершены в начале нового века созданием двух типов приборов – одноствольного семи лучевого («Астрон-П»), предназначенного для работы в квазинепрерывном режиме работы с уровнем выходной мощности 3 кВт (см. Табл.1, поз.8) и двухствольного с уровнем выходной мощности в импульсном режиме не менее 30 кВт в рабочей полосе частот 6 % при средней выходной мощности 3 кВт («Астрон-О») (см. Табл.1, поз.9). Оба клистрона работают при одинаковом ускоряющем напряжении порядка 7 кВ и имеют сеточное управление электронным потоком (СМ).

Таким образом, уже в начале 2000-х годов была разработана целая серия МСК усилительных клистронов, которые выполнили роль базовых конструкций [8,9] для развития этого направления при конструировании мощных, низковольтных и широкополосных усилительных клистронов в сантиметровом диапазоне длин волн.

Так в 2007 г была завершена разработка МСК прибора КИУ-201, близкого по параметрам и типу конструкции к прибору «Альтаир-2», отличающегося от последнего способом модуляции (АМ) и работоспособностью при пониженном уровне скважности (см. Табл.1, поз.10).

В 2011 г. была завершена НИР «Астория-1» (см. Табл.1, поз.10), итогом которой явилась разработка МСК прибора 3-х см диапазона, близкого по конструкции к приборам КИУ-201 и КИУ-208, главным отличием которого от последних, имеющих жидкостное охлаждение, является принудительное воздушное охлаждение при сравнительно напряжённом тепловом режиме эксплуатации. Конструктивной особенностью системы охлаждения коллектора этого прибора является возможность обеспечения герметичной изоляции тракта, в котором проходит поток забортного охлаждающего радиатор коллектора воздуха, от внутреннего пространства отсека аппаратуры, в котором размещён прибор.

Одновременно с разработками мощных МСК приборов в отделе продолжались работы по созданию и более простых в конструктивном отношении мощных одноствольных конструкций, в тех случаях, когда имелась возможность разместить в пространстве взаимодействия объёмных резонаторов этих приборов необходимое для обеспечения требуемых параметров число электронных потоков.

Так, в пределах 2007÷2009 гг. на базе клистрона «Астрон-П» был разработан 4-х см мощный усилительный клистрон непрерывного действия с принудительным воздушным охлаждением «Вариант», имеющий уровень выходной мощности 3 кВт (см. Табл.1, поз.12 и Рис.3) Это была первая разработка мощного усилительного клистрона с принудительным воздушным охлаждением.

В течение 2009 ÷ 2010 гг. в результате проведения «внутренней» НИР «Автомат» была выполнена разработка ещё одного одностовольного усилительного клистрона с воздушным охлаждением, имеющего в 10-см диапазоне длин волн и в рабочей полосе частот 7% уровень выходной импульсной мощности порядка 10 кВт (см. Табл.1, поз.13 и Рис.4).

Так как подавляющее число созданных в отделе приборов предназначалось для использования в бортовой аппаратуру, то все разработанные приборы вне зависимости от диапазона частот и уровня выходной мощности имеют пакетированную конструкцию с магнитно фокусирующими системами (МФС) на постоянных магнитах.

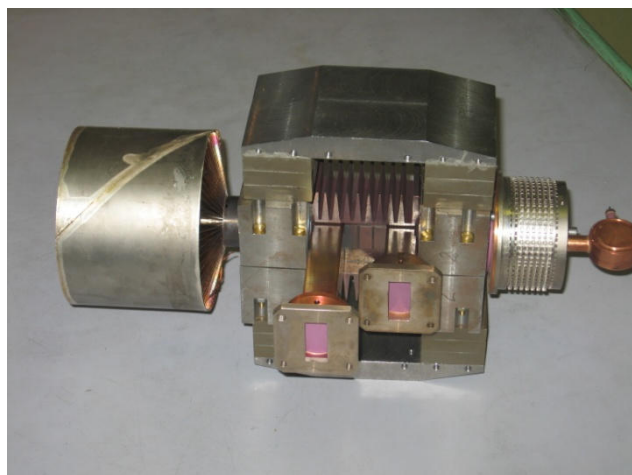


Рисунок 3

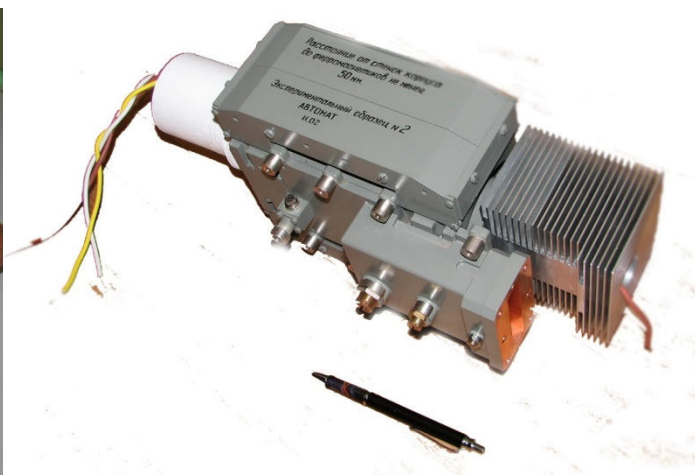


Рисунок 4

Таким образом, в отд. № 4, в результате проведенных за более, чем 55-летний период своего существования около 150 плановых и инициативных разработок, был создан целый ряд конструкций мощных широкополосных и низковольтных конструкций усилительных клистронов сантиметрового диапазона длин волн, которые можно считать базовыми при последующих разработках приборов этого класса.

В заключение, считаем своим долгом назвать имена разработчиков вышеназванных приборов, а также высококвалифицированных сотрудников отдела № 4 и смежных подразделений ЗАО «Светлана ЭП», внесших существенный, а порой и определяющий вклад в разработку, изготовление и организацию выпуска описанных в данной статье мощных усилительных клистронов.

А. Разработчиками приборов являлись:

1. **КИУ-14** – Тув А.А.(Гл. конструктор), Дергунова Т.Г.(Зам. гл. конструктора);
2. **КИУ-63** – Тув А.А.(Гл. констр.), Мищенков И.Е. (Зам. гл. конструктора), Дубовской С.Н., Бурдакова Г.В.
3. **КИУ-68**– Петров Г.С.(Гл. Констр.), Анцифорова Т.Л.(Зам. гл. конструктора.), Киселёва Л.С.;
4. **«Арктур»** – Бесов Ю.Р. (Научный руководитель), Анисимова Т.Ю. , Рябичева Н.В.;
5. **«Альтаир-2», КИУ-208, КИУ-201.** - Тув А.А.(Гл.констр.), Дергунова Т.Г.(Зам. гл.конструктора), Бурдакова Г.В., Иванова И.С., Пашкова О.И.;

6. КИУ-188 – Тув А.А. (Гл. констр.), Мамонтова С.Б. (Зам.гл. констр. на этапе ОКР), Морозов С.Н.;

7. «Астрон П» – Тув А.А. (Научный руководитель), Дергунова Т.Г. (Зам. руководителя), Бурдакова Г.В.;

8. «Астрон О» – Тув А.А. (Научный руководитель), Морозов С.Н. (Зам. руководителя)

9. «Астория-1» – Тув А.А. (Научный руководитель), Маилова С.С. (Зам. руководителя), Киреев А.Г., Кустов В.В., Пашкова О.И.;

10. «Вариант» – Тув А.А. (Научный руководитель), Морозов С.Н. (Зам. руководителя);

11. «Автомат» – Тув А.А. (Научный руководитель), Маилова С.С. (Зам. руководителя), Киреев А.Г., Кустов В.В., Пашкова О.И.;

Б. «Холодные» измерения, настройка и испытания приборов производились сотрудниками метрологических подразделений и членами разработческих групп отдела: Шломиной К.Н., Бобровским Ю.Л., Волковым А.П., Муратовым В.Н., Дергуновой Т.Г., Морозовым С.Н., Орловой О.В., Киреевым А.Г., и др.

В. Разработка катодно-подогревательных узлов, металлокерамических узлов и разработка конструкторской документации проводилась сотрудниками смежных подразделений ЗАО «Светлана ЭП» Бернштейн Р.М., Ивановой Н.В., Соколовской И.А., Шустовым С.Ю., Шадринной М.В., Колодкиной Б.И., Лиоренцевичем Е.А., Левиной Ю.С., Косюком А.Л., Глушанковой Л.Н., Наливайко В.И., Киселёвой Л.С., Залкинд Р.А. и др.

Г. Изготовление приборов проводилось высококвалифицированными сотрудниками технологических подразделений отдела Манаенковым В.С., Чувалиным С.Г., Клементьевым С. Б., Клементьевым А.Б., Андреевой Е.П., Шумилиной Н.П., Бутузовым С. П., Шутовой В.М., Барсуковым А.А., Соловьёвой Н.Н., Васильевой Л.Д., Сердюк В.В., Стрижовой Г.Л., Яковлевой Л.В., Шиловой В.В., Орловым В.И., Зориным Н.Ф., Лавровым Б.А., Захаровым А.И. и др.

Д. Технологическое сопровождение приборов в процессе освоения их выпуска из отдела № 4 и серийного цеха ЗАО «Светлана ЗП», проводилось нижеследующими сотрудниками технологических подразделений отдела № 4, серийного цеха и ЗАО «Светлана-ЭП»: Фадеевым А.М., Возняк Л.И., Колпаковой З.М., Орловым А.А., Никифоровым В.П., Люлиным А.И. и др.

Заключение

Набор параметрических и конструктивных вариантов исполнения разработанных в отделе № 4 ЗАО «Светлана ЭП» на рубеже 20-го и 21-го столетий усилительных приборов клистронного типа позволяет утверждать, что отдел обладает в настоящее достаточным заделом и потенциалом для создания и организации выпуска в достаточно короткие сроки требуемых потенциальному заказчику мощных широкополосных и низковольтных усилительных клистронов 3-10 см. диапазона длин волн при различных комбинациях их конструктивных исполнений, будь-то непрерывные или импульсные приборы, с анодным или сеточным управлением катодным током, при воздушном или жидкостном охлаждении.

Библиографический список

1. Бесов Ю.Р., Зильберман И.И., Каяльянц Г.И., Муратов В.Н., Петров Г.С., Савшинский В.А., Тув А.А., Харит М.А.
Усилительные клистроны Объединения "Светлана" (к 110-летию Объединения) Радиотехника. 2000, № 2.- Стр.4-8.
2. Г.С. Петров, А.А. Тув, Р.Г. Шифман, В.В. Попов О развитии класса широкополосных усилительных клистронов малой и средней мощности в ОАО «Светлана». История Отечественной Электроники. Том 1. Стр.168-174. Издательский дом «Столичная энциклопедия». Москва 2012г.
3. А.А. Тув . Авторское свидетельство на изобретение СССР № 291612 (Приоритет от 18.11.1968г.)..
4. А.А. Тув. Авторское свидетельство на изобретение СССР № 671062 (Приоритет от 07.12.1987г.)..
5. Touv A.A. X-Band high power broadband low-voltage multi-beam klystron amplifier with two-barrel design. International University Conference "Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies", St. Petersburg, May 1999.
6. А.А. Тув. 3х-см мощный широкополосный низковольтный многолучевой усилительный клистрон двухствольной конструкции. Радиотехника. 2000, №2.-Стр. 51-53.
7. Мамонтова С.А., Морозов С.Н., Тув А.А. Технический отчет по НИР "Алтист-С", ЗАО "Светлана ЭП", Санкт-Петербург, 2001г.
8. С.Н. Морозов, А.А. Тув, Р.Г. Шифман. Серия широкополосных низковольтных усилительных клистронов 5÷10 ГГц диапазона на базе многоствольных конструкций. Материалы научно-технической конференции «Электронные приборы и устройства нового поколения» ФГУП «НПП «Контакт» г.Саратов, Февраль 2002г.
9. С.Н.Морозов, Г.С.Петров, А.А. Тув, Р.Г. Шифман. Серия широкополосных низковольтных усилительных клистронов 5-10ГГц диапазона на базе многоствольных конструкций. Материалы 13 международной конференции «CriMiCo-2003».8-12 сентября 2003г. Стр. 263-265. Севастополь, Крым, Украина. 2005г.