

# МОЩНЫЕ И СВЕРХМОЩНЫЕ СВЧ-ИСТОЧНИКИ: ОТ КЛИСТРОНОВ ДО НОВОГО КЛАССА ПРИБОРОВ

Л.Борисов, к.т.н., Г.Щелкунов

Волны дециметрово-сантиметрового диапазона оставались предметом чисто научного любопытства до начала Второй мировой войны, когда возникла необходимость в новом и эффективном электронном средстве раннего обнаружения. Только тогда начались интенсивные исследования СВЧ-радиолокации. Сегодня мощные и сверхмощные клистроны применяются не только для дальней радиолокации, наземной и космической связи, но и для ускорителей высоких энергий, в научных исследованиях и в исследованиях космического пространства. Новый класс СВЧ-источников перспективен для генерации жесткого рентгеновского излучения, для питания ускорителей и построения различных вариантов СВЧ-излучателей.

**В** России основные разработки СВЧ-приборов были сосредоточены в НИИ-160 (ныне НПП "Исток"), созданном в 1943 году. Именно тогда и началось становление отечественной СВЧ электронной отрасли. Это предприятие быстро становится центром отечественной СВЧ-электроники, мощным генератором новых идей, пионером перспективных направлений по разработке множества типов приборов: мощных приборов М-типа, пролетных клистронов средней и большой мощности, ЛБВ средней мощности, электростатических усилителей.

## КЛИСТРОНЫ

Первые клистроны были маломощными приборами, но позднее они как СВЧ-генераторы и усилители сравнялись и даже превзошли по мощности магнетроны. Работы по созданию мощных клистронов на предприятии начались в 1954 году. Был создан ряд приборов с уникальными параметрами: первый отечественный сверхмощный клистрон (20 МВт в импульсе) для Харьковского линейного ускорителя электронов (50 одновременно работающих клистронов), базовый сверхмощный (30 МВт) широкополосный клистрон

для радиолокации, сверхмощный клистрон для линейного ускорителя "Факел" Института атомной энергии им. И.В.Курчатова и др.

Определяющую роль в развитии направления многолучевых приборов сыграли выполненные группой теоретиков "Истока" теоретические исследования многолучевых клистронов. Ими были также подготовлены расчеты для разработки подобных приборов.

Современные мощные многолучевые клистроны работают в дециметровом и сантиметровом диапазонах с уровнем импульсной мощности от 1 кВт до 30 МВт. Этот класс приборов используется в приоритетных системах вооружения в качестве выходных каскадов усилительных цепочек.

В клистроне преобразование постоянного потока электронов в переменный происходит путем модуляции скоростей электронов электрическим полем СВЧ (при пролете их сквозь зазор объемного резонатора) и последующей группировки электронов в сгустки (из-за разности их скоростей) в пространстве дрейфа, свободном от СВЧ-поля.

В простейшем клистроне два резонатора: входной и выходной. Дальнейшим развитием пролетных клистронов стали каскадные



Рис.1. Изменение конструкций мощных клистронов

многорезонаторные клистроны, имеющие один или несколько промежуточных резонаторов, которые расположены между входным и выходным резонаторами.

**Клистроны усилительные импульсного действия** применяются в качестве оконечных импульсных усилителей в передатчиках радиолокационных станций с мощностью в импульсе до 200 кВт (соответственно с необходимой мощностью клистронов), в ускорителях заряженных частиц и в системах сверхдальней локации – от 200 кВт до 30 МВт.

Далее речь пойдет только о работах, выполнявшихся с участием или под руководством авторов статьи. С марта 1957 года Л.Борисов работал в лаборатории Г.М.Кауфмана (создание мощных усилительных клистронов для наземных и космических систем связи, для РЛС и других применений), а Г.Щелкунов – в лаборатории С.А.Зусмановского (создание мощных и сверхмощных импульсных

клистронов для дальней радиолокации). Эволюция конструкций мощных клистронов показана на рис.1, а основные их характеристики приведены в табл.1.

**Клистроны непрерывного действия дециметрового диапазона.** Клистрон №1 (КУ-206) предназначен для линий тропосферной связи. Мощность 10 кВт, длина волны 30 и 37 см. В процессе разработки этого клистрона были проведены исследования (Л.М.Борисов), в результате которых:

- созданы стеклянные "окна" в каждом резонаторе. Удалось "увидеть" электронный луч, изменение его конфигурации при изменениях вакуума и фокусировки, светящиеся "точки" на стенках и концах пролетных труб, плавление их торцов при ухудшении фокусировки. Были отработаны режимы клистрона и показано, насколько важна роль ультразвуковой очистки деталей;
- решена проблема с перегоранием петли вывода энергии (один из экспериментов, проводимых для выяснения причин этого явления, положил начало работам Г.Щелкунова по шаровой молнии).

Клистрон №2 (КУ-308) предназначен для тропосферной связи. Мощность 3 кВт, широкий диапазон перестройки – 30–37 см. Такой диапазон был получен благодаря новым узлам настройки и устройству связи [1].

Клистрон №4 (КУ-44) – мощность 5 кВт, полоса усиления 1,5%, КПД 50%. Предназначен для наземных видов связи. Клистроны КУ-206, КУ-308 и КУ-44 выпускались серийно долгое время.

Клистрон №3 – мощность 1,5 кВт, длина волны около 40 см, полоса усиления 1,5%, КПД 50%. Был специально разработан для передачи телевизионных сигналов на восточную территорию

Таблица 1. Характеристики мощных клистронов

Конструкция (см. рис.1)	1	2	3	4	5	6	7	
Марка	КУ 206	КУ 308	*	КУ 44	*	*	КИУ 93	
Диапазон	Дециметровый				Сантиметровый			
Полоса усиления, %	0,6	1,0	1,5	1,5	3,5	1	6	
Режим	Непрерывный				Имп.	Непр.	Имп.	
Мощность, кВт	10	3	1,5	5	0,3	40	0,5	
Число лучей	1	1	1	1	7	7	1	
Число зазоров резонаторов	1	1	2	2	2	1	2	

\* Опытное производство.

СССР со спутника в условиях открытого космоса. Его мощность должна была быть достаточной для приема сигнала комнатной антенной. Требовались высокий КПД, большая долговечность, малые масса и габариты. Для этого были использованы двухзачорные резонаторы и металлопористый катод. Все испытания в имитаторе космоса прошли успешно. Однако по решению Международной комиссии заказчика вынуждены были использовать клистрон меньшей мощности. Тем не менее, результаты работы не пропали даром: была показана возможность повышения КПД до 70% [2] и этот опыт использовали при разработке следующих клистронов.

**Многолучевые клистроны с двухзачорными резонаторами.** Клистрон №5 предназначен для работы на спутнике (взамен клистрона №3). Мощность 300 Вт, длина волны около 40 см, полоса усиления 3,5%. Такая полоса была получена благодаря использованию семилучевой конструкции с двухзачорными резонаторами. Этот клистрон успешно работал во время Олимпиады-80.

Клистрон №6 имел оригинальную конструкцию [3] и был предназначен для РЛС. Он попеременно работал в двух режимах, отличающихся по мощности в 100 раз. При испытаниях экспериментальных многолучевых клистронов с двухзачорными резонаторами получена полоса усиления более 10%. Для сверхмноголучевого (61 луч) клистрона с однозачорными резонаторами это значение составило 18%.

**Импульсные клистроны сантиметрового диапазона.** Клистрон №7 для РЛС имел мощность 40 кВт и полосу усиления 6% (такие характеристики в СССР были получены впервые). Применение многолучевой конструкции, двухзачорных резонаторов и выходной системы из трех связанных резонаторов (изобретение было внедрено в 1999 г. [4]) позволило создать конструкцию, удовлетворяющую жестким требованиям. Клистрон до сих пор успешно работает у заказчика.

Затем были разработаны еще восемь импульсных клистронов, отличающихся количеством лучей и резонаторов. Их мощность находилась в пределах от единиц до нескольких десятков киловатт. Полоса усиления составляла 2% в 2-см диапазоне и 6% – в 4-см. Они были освоены в производстве и поставлялись заказчику.

Экспериментально была показана возможность расширения полосы клистронов в 1,5–2 раза при использовании трех- или четырехзачорных выходных резонаторов. При разработке этих клистронов использовалась программа оптимизации [5].

Некоторые клистроны (см. рис.1 и табл.1) сыграли свою роль в дальнейшем развитии СВЧ-техники, многие продолжают работать в аппаратуре и сейчас [6].

**Мощные и сверхмощные импульсные клистроны** "Аметист" и "Ацетон" для установки термоядерного синтеза, "Аврора-3" для линейного ускорителя и "Аэростат" для возбуждения фазированной решетки (антенны с большим числом ячеек с СВЧ-источниками) разработаны в лаборатории С.А.Зусмановского при участии Г.Щелкунова.

"Аметист" предназначался для Курчатовского института. Была разработана конструкция, изготовлены первые образцы и начаты их испытания. Но на этом этапе физики остановили работу, так как при подаче СВЧ-мощности (мощность одного СВЧ-импульса не менее 10 кДж) в установке заказчика возбуждалось до 50 видов неустойчивости плазмы. Позже на основании этих работ Г.Щелкунов получил оценку энергосодержания натуральной шаровой молнии диаметром 8 см и решил проблему измерения энергии редких импульсов (один через 10 с) [7]. Длина волны клистрона (21 см) была выбрана с перспективой его использования для исследования газообразного водорода в космическом пространстве.

"Ацетон" с внешними резонаторами (такая конструкция была разработана в СССР впервые) предназначался для возбуждения клистрона "Аметист".

"Аэростат" имел гладкую фазочастотную характеристику, импульсную мощность 4 МВт, среднюю мощность 20 кВт, длительность импульса до 40 мкс и более. В нем была обеспечена жесткая фокусировка электронного луча благодаря магнитному его сопровождению. Этот клистрон предназначался для возбуждения большой фазированной решетки одного из вариантов системы противоракетной обороны. По соглашению СССР-США (1972) этот вариант ПРО был исключен.

В сверхмощном импульсном клистроне "Аврора-3" были достигнуты высокие характеристики: мощность и долговечность 8 тыс. ч (табл.2). Надо сказать, что помимо ранее выявленных в клистроне механизмов возбуждения "паразитных" колебаний был обнаружен еще один вид, обусловленный конфигурацией магнитного поля фокусирующего соленоида в месте расположения выходного резонатора клистрона. Подавление этих паразитных колебаний достигнуто изменением конфигурации поля.

Одновременно решены проблемы обеспечения высокой долговечности, стабильного и высокого

Таблица 2. Этапы создания и совершенствования клистрона "Аврора"

Номер этапа	Клистрон	Марка	Содержание этапа	Фактическая долговечность, ч
1	"Аврора"	КИУ-1	Создан аналог американского клистрона на непрерывной откачке	–
2	"Аврора"	КИУ-1М	Конструкция выполнена в отпаянном варианте	~200
3	"Аврора-2"	КИУ-12А, Б	Создана отечественная конструкция	От 1 000 и более
4	"Аврора-3"	КИУ-12 МА	Внедрены новые конструкторско-технологические наработки. Катод увеличен	От 3 000 до 8 000

вакуума в приборах, вакуумной плотности оболочки, эффективной тренировки при изготовлении, устойчивости к высоковольтным пробоям (пробой при эксплуатации практически исключены) [8–13]. Проведено теоретическое исследование структуры возможных электронных потоков [14].

Клистрон "Аврора-3" работал на ускорителе (в то время крупнейшем в мире) в Харьковском атомном центре, запущенном в эксплуатацию в октябре 1963 года. Применялся также для питания ускорителей Курчатовского института, МИФИ, в институтах биофизики (Москва), радиологии и медицины в Обнинске (Калужская область), в Ленинграде, Минске и Ереване (на большом кольцевом ускорителе протонов), в качестве СВЧ-источника для камеры регистрации столкновений атомных частиц в СВЧ-сепараторе Серпуховского ускорителя протонов (по мощности – 70 МэВ – он был в свое время одним из самых больших в мире). Здесь клистрон "Аврора" работал в режиме модулирующего импульса, по величине в пять раз большего, чем у типовых модуляторов, и это потребовало внесения в его конструкцию необходимых изменений [15, 16].

### СВЧ-ПРИБОРЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

**СВЧ-источник.** Опыт работы, накопленный при создании клистронов, позволил подойти к созданию новых приборов-гибридов с мощными СВЧ-источниками. Например, для генерации жесткого рентгеновского излучения создан новый СВЧ-прибор "Бриг", в котором в одном вакуумном объеме размещены СВЧ-источник (СВЧ-тетрод) и катодный узел, испускающий электронный луч в СВЧ-зазор высокодобротного коаксиального полуволнового резонатора. Луч ускоряется в СВЧ-зазоре до 600–700 кэВ и бомбардирует вольфрамовую

мишень. Панорамное (или направленное) рентгеновское излучение выходит через стенку наружу. Масса источника "Бриг" – 11 кг, после армировки – до 50 кг. Энергопотребление составляет 1,5–2 кВт. "Бриг" входит в аппарат Д-501, который успешно эксплуатировался на заводе "Пермские авиаторы" для контроля швов сварных корпусов авиадвигателей [17, 18].

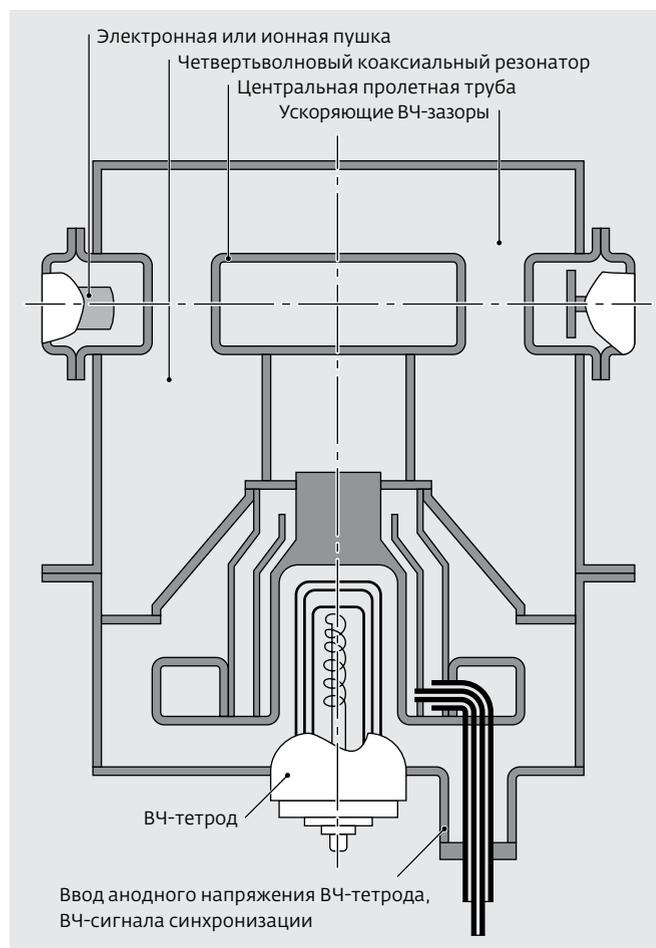


Рис.2. Базовая ускорительная секция

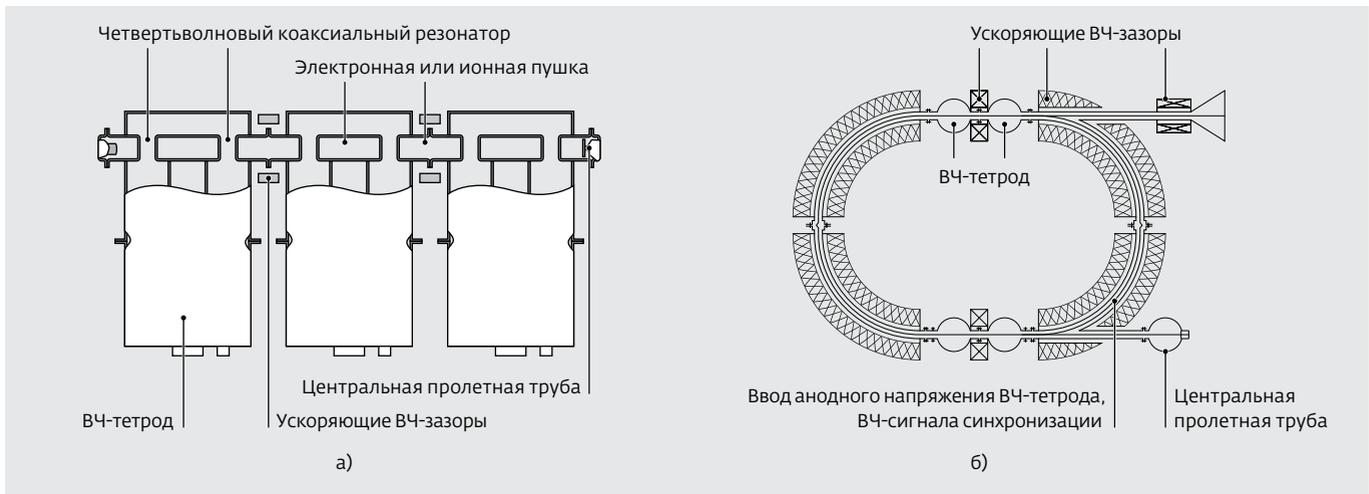


Рис.3. Трехсекционный (а) и линейно-циклический (б) ускорители

На основе этой разработки авторами патентов были предложены перспективные группы компактных СВЧ-источников нового класса для систем разрушения информационных и управляющих радиосредств и клистронов для систем обнаружения и наведения (РЛС дальней радиолокации, средств наземной и космической связи).

**Базовая ускорительная секция (БУС)** с СВЧ-источником в ее составе, (патент РФ №2306685, рег. 20.09.2007 г.) (рис.2). БУС может использоваться как единичная секция-ускоритель (СВЧ-источник и пролетная трубка в едином вакуумном объеме), так и для формирования (на основе БУС) цепочек линейных и циклических ускорителей сверхвысоких энергий (рис.3а, б).

**СВЧ-излучатель** (патент РФ №2349983, рег. 20.03.2009) [19, 20]. Выходная импульсная мощность до 4 МВт и более, энергопотребление 1,5-2 кВт, масса импульсного источника до 50 кг, масса СВЧ-излучателя до 100 кг. Главная особенность конструкции: в выходном "каскаде" электронный луч отсутствует (нет механизма группирования и нет ограничения из-за скорости света - с).

Напомним суть ограничения из-за скорости света на примере клистрона "Аврора-3". Рабочее (ускоряющее электронный луч) напряжение клистрона - 300 кВ. При этом электроны ускоряются до скорости 0,8 с. При напряжении выше 300 кВ скорость электронов луча (главный фактор преобразования энергии от модулятора через механизм модуляции и группирования луча в сгустки) нарастает медленнее (по асимптоте к пределу скорости света). Другими словами, ограничения по скорости света приводят к тому, что эффективность взаимодействия уменьшается, а проблемы

электропрочности и "амуниции" обостряются. Клистрон "Аврора-3" весит 60 кг, а его "амуниция" (выпрямитель, модулятор, фокусирующий соленоид, биозащита и прочее) имеет массу до 5 т.

**О возможном применении СВЧ-излучателя.** В статье [19] представлен обзор некоторых средств ведения войны, предназначенных для воздействия на информационные и управляющие радиосредства противника. "Радиоштит" передовых стран должен иметь две составляющие.

Первая (с помощью клистронов и других СВЧ-источников в составе радиоаппаратуры) решает задачу обнаружения радиосредств противника и наводки на них радиосистемы разрушения их информационных и управляющих радиосредств вплоть до их физического подавления (ФП). Вторая предполагает наличие эффективных средств ФП, часть из которых описана в [20].

Авторы полагают, что благодаря высоким энергиям излучения, компактности и низкому энергопотреблению СВЧ-излучателя можно усовершенствовать некоторые системы ФП (базирование может быть наземное, воздушное и космическое). Другими словами, новая группа СВЧ-источников позволит укрепить "радиоштит" России.

В заключение можно сказать, что изготовление СВЧ-прибора "Бриг", БУС, СВЧ-излучателя базируется на отработанной технологии производства клистронов и использовании ряда элементов их конструкций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.С. СССР №195507. Устройство связи с коаксиальной линией. /Касумова Н.Г., Борисов Л.М. - Опул. в 1966 г.
2. **Борисов Л.М., Захарова А.Н., Евтушенко О.В.** и др.

- Экспериментальный телевизионный клистрон с высоким КПД. – Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1970, вып.7.
3. А.С. СССР №669964. Многорежимный СВЧ-прибор./ Борисов Л.М., Давыдова И.Б., Жарый Е.В., Кауфман Г.М. – Оpubл. в 1977 г.
  4. Патент СССР №1817609. Электронная пушка для приборов 0-типа./Борисов Л.М., Жарый Е.В. Тараканов А.П., 1990.
  5. **Борисов Л.М., Захарова А.Н.** Программа расчета и оптимизации многоручевых усилительных клистронов с многозачорными резонаторами. – Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1999, вып.2.
  6. Люди, дела, достижения./Под ред. Гельвичя Э.А. – Фрязино Моск. обл., ФГУП "НПП "Циклон-Тест", 2002.
  7. **Щелкунов Г.П.** Радиогидравлический эффект и его возможные применения. Сборник статей – Отпечатано в типографии НПП "Исток", 1993.
  8. **Афонская М.И., Габышев В.Г., Дунаев А.С.** и др. Клистронный усилитель 10-см диапазона мощностью 20 МВт в импульсе. Труды конференции по электронике СВЧ. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1959.
  9. **Щелкунов Г.П., Зусмановский С.А., Кармазин В.Г.** Способы обнаружения медленных натеканий с применением избыточного давления. Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1968, вып.3, с.157–160.
  10. **Щелкунов Г.П.** Результаты контроля герметичности оболочки клистрона КИУ-12. – Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1974, вып.7, с.85–89.
  11. **Щелкунов Г.П., Ямпольский И.Р., Алферов В.И., Моисеев К.А.** Способ тренировки мощных клистронов при положительной полярности напряжения на катоде. – Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1970, вып.1, с.146–148.
  12. **Щелкунов Г.П., Зусмановский С.А., Кармазин В.Г.** Долговечность мощных клистронов с губчатим оксидным катодом. – Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1968, вып.2, с.167–168.
  13. **Щелкунов Г.П.** Расчет ожидаемой долговечности мощных усилительных клистронов с оксидным катодом. – Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1978, вып.6, с.79–84.
  14. **Борисов Л.М., Щелкунов Г.П.** Возможные микропервансы электронных потоков кольцевого сечения в пролетной трубе. – Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1992, вып.5.
  15. **Алферов В.Н., Вишневская А.М., Владимирцев М.Б.** и др. Исследование "паразитных" колебаний в клистроне КИУ-12, возникающих при увеличении длительности модулирующего импульса. – Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1969, вып.6, с.37–43.
  16. **Алферов В.Н., Владимирцев М.Б., Вишневская А.М.** и др. О фазовой стабильности мощного клистрона. – Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1970, вып.11, с.137–139.
  17. **Щелкунов Г., Симановский М.** Передвижные таможенные комплексы. Новые средства рентгеноскопии. – Электроника: НТБ, 1999, №6, с.32–34.
  18. **Щелкунов Г.П.** Группа новых СВЧ-приборов для генерации рентгеновского излучения и их применение. – Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника, 2007, вып.1, с.93–97.
  19. **Фомичев К., Юдин Л.** Электромагнитное оружие (перспективы применения в информационной борьбе). – Электроника: НТБ, 1999, вып.6, с.40–45.
  20. Динамика радиоэлектроники./Под общ. ред. д.т.н. Ю.И.Борисова. – М.: Техносфера, 2007.