

ЛЕКЦИИ 19-22
РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ
ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ СВЧ ПРИБОРОВ

Составитель:
к.т.н., доцент,
доцент кафедры РЛ1
Родин М.В.

Москва – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

10.1 Общие сведения	3
10.2 Основные этапы развития и современное состояние	5
10.3 Клистроны.....	10
10.4 Лампы бегущей и обратной волны.....	23
10.5 Магнетроны	32
10.6 Другие типы электровакуумных СВЧ приборов	35
10.7 Релятивистские приборы.....	41
10.8 Вопросы электропитания электровакуумных СВЧ приборов	46
10.9 Структура РПДУ с электровакуумными СВЧ приборами.....	66
10.10 Требования в выходным импульсам электровакуумных СВЧ приборов.....	68
10.11 Выбор между твердотельными и электровакуумными СВЧ усилителями в радиолокации	71

10.1 Общие сведения

В настоящее время в радиотехнике для получения СВЧ колебаний высоких уровней мощности используют твердотельные и электровакуумные ГП. С развитием современных технологий производства и конструирования твердотельные ГП активно завоевывают диапазоны частот вплоть до терагерцового.

Разработка технологий производства активных СВЧ устройств на основе таких новых материалов как SiC, GaN, AlN открывает широкие возможности для развития твердотельных ГП. При этом для удовлетворения требований по величине выходной мощности используют схемы суммирования мощности либо на общей нагрузке, либо в пространстве.

Твердотельные ГП обладают рядом преимуществ:

- относительно низкое напряжение электропитания;
- высокая надежность и большая долговечность (из-за отсутствия высокотемпературного узла);
- относительно малые размеры, предопределяющие их использование в многоэлементных фазированных антенных решетках (ФАР) и возможность получить большую мощность сложением ее в пространстве;
- возможность изготовления крупных серий идентичных приборов;
- относительно низкая стоимость.

Однако твердотельные РПДУ не лишены и недостатков:

- низкое значение максимальной мощности, получаемой от одного прибора, обусловленное физическими ограничениями;
- сложность конструкции УМ при использовании суммирования мощности в тракте самого РПДУ;
- снижение надежности РПДУ в целом из-за использования большого количества маломощных УМ в схемах суммирования мощности;
- низкий коэффициент усиления;
- падение как КПД, так и генерируемой мощности с ростом частоты;

- уязвимость к воздействию СВЧ оружия.

С развитием полупроводниковых РПДУ электровакуумные ГП постепенно вытесняются, однако они обладают следующими достоинствами:

- позволяют получить от одного ГП высокие импульсные и средние мощности;
- рабочий диапазон частот доходит до 1 ТГц и выше;
- полоса рабочих частот достигает нескольких октав (октава – диапазон частот, в котором частота верхней границы вдвое больше нижней, $N = \log_2(F_{\text{в}}/F_{\text{н}})$);
- высокий коэффициент усиления (до 40...70 дБ);
- простота конструкции РПДУ при соизмеримой мощности по сравнению с твердотельными РПДУ с суммированием мощности;
- сравнительно низкая стоимость.

Но им также свойственны следующие недостатки:

- высокие рабочие напряжения электропитания;
- наличие высокотемпературного узла – катода (он недолговечен и требует разогрева);
- сложные системы электропитания;
- малый срок службы;
- большие габаритные размеры.

В настоящее время наибольшее распространение получили такие электровакуумные СВЧ приборы как магнетроны, клистроны, лампы бегущей и обратной волны (ЛБВ и ЛБО) О и М типов. В технике физического эксперимента для ускорения заряженных частиц используют релятивистские электровакуумные приборы, а также приборы гиротронного типа.

Чаще всего электровакуумные СВЧ приборы используют в качестве мощных оконечных УМ связных и радиолокационных РПДУ и мощных автогенераторов для энергетических применений и физических исследований.

В последнее десятилетие стали широко использовать гибридные интегральные вакуумно-твердотельные модули. В таких модулях предварительный УМ или автогенератор собран на твердотельных приборах. Оконечный широкополосный УМ строят с применением ЛБВ или клистрона. В результате удается совместить положительные свойства двух видов приборов и значительно уменьшить влияние отрицательных каждого из них.

При необходимости получения импульсной мощности более нескольких киловатт в диапазоне длин волн от единиц сантиметров и менее использование электровакуумных СВЧ приборов оправдано. На данный момент не существует сравнительно простых и недорогих РПДУ на основе твердотельных приборов, способных обеспечивать такие уровни мощности при габаритах, соизмеримых с РПДУ, построенными на электровакуумных приборах. При необходимости получения сравнительно низкочастотных колебаний (частота менее 10 ГГц) со средними мощностями выше 10 кВт также целесообразно использование СВЧ электровакуумных генераторных приборов, так как в этом случае удастся получить значительный выигрыш в КПД.

В пограничной области применения между твердотельными и электровакуумными устройствами возможно использование гибридных модулей.

10.2 Основные этапы развития и современное состояние

Электровакуумный СВЧ прибор является главной частью РПДУ любой радиоэлектронной системы большой мощности, поэтому выбор типа прибора и требования к комплексу его параметров, то есть направления развития мощной СВЧ электроники в значительной степени определяются уровнем развития радиоэлектронных систем.

Наиболее важной областью применения электровакуумных СВЧ приборов больших мощностей являются РЛС систем ПРО и ПВО, а также установки для физических исследований.

На первых этапах развития РЛС (1930-1950-е гг.) в РПДУ использовали относительно дешевые, простые и выпускаемые серийно магнетроны. Их недостатки – некогерентный выходной сигнал, низкая стабильность частоты и невозможность управлять ею – не имели тогда большого значения.

Впоследствии, в связи с переходом к сложным зондирующим сигналам с широкой полосой рабочих частот, появилась необходимость в развитии мощных широкополосных клистронов и ЛБВ, которые окончательно вытеснили магнетроны. Применение сложных зондирующих сигналов с внутриимпульсной модуляцией и их когерентной обработкой дает возможность качественно улучшить характеристики обнаружения, измерения параметров и распознавания целей в РЛС. Необходимыми условиями для этого являются высокие фазовая и амплитудная стабильности формируемых в РПДУ радиоимпульсов, а также широкий диапазон изменения их временных параметров.

Значительную роль в формировании направлений развития электровакуумных СВЧ приборов сыграли доплеровские РЛС, в которых определяющую роль играют мощные УМ с предельно низким уровнем собственных шумов.

На новом этапе развития перед создателями электровакуумных СВЧ приборов стоят традиционные задачи: увеличение полосы частот, повышение мощности и укорочение длины волны. Решение этих задач будет проводиться как за счет развития и совершенствования клистронов, ЛБВ, их гибридов, так и на основе создания релятивистских СВЧ приборов (виркаторов).

Выделяют следующие типы электровакуумных СВЧ приборов:

1. Приборы с сеточным управлением

Впервые в СССР в 1920 г. С.И. Зилитинкевичем были обнаружены когерентные СВЧ колебания в триодах при положительном потенциале на сетке и отрицательном на аноде. Режим работы ламп в схеме тормозящего поля открыл широкие возможности получения незатухающих СВЧ колебаний.

В дальнейшем, с 1930-х до 1950-х гг., были разработаны новые типы металлокстеклянных триодов, обеспечивающих полное перекрытие дециметрового диапазона длин волн и частичное до 3-сантиметрового диапазона.

С ростом частоты работы УМ на обычных электронных лампах начинает сказываться влияние межэлектродных емкостей и индуктивностей выводов лампы. С ростом частоты уменьшаются сопротивления межэлектродных емкостей и вследствие этого возникают заметные емкостные токи, что приводит к возникновению паразитных обратных связей в схемах УМ. С ростом частоты, в свою очередь, становятся заметными индуктивности выводов, что может привести к возникновению паразитных избирательных контуров вместе с межэлектродными емкостями.

Всё это создаёт возможность возникновения самовозбуждения на побочных частотах в схемах и неустойчивости усиления. Кроме того, на СВЧ возникает разность фаз $\Delta\varphi$ между током и напряжением. Так как полезная колебательная мощность определяется как $P = IU \cos \Delta\varphi$, то возникает падение величины полезной мощности в УМ. Далее с ростом частоты увеличивается сопротивление проводников за счёт так называемого скин-эффекта, то есть уменьшения толщины проводящего слоя в проводнике. Это приводит к росту потерь мощности, к уменьшению добротности избирательных систем УМ и, следовательно, к уменьшению коэффициента усиления УМ и к увеличению неустойчивости частоты в автогенераторах за счёт уменьшения фиксирующей способности.

Для снижения степени влияния указанных выше факторов разработаны специальные конструкции СВЧ ламп. Особенности таких ламп: плоские конструкции электродов – анода, сетки, катода; увеличенная толщина выводов, что приводит к уменьшению их индуктивностей; форма выводов электродов лампы делается цилиндрической.

Цилиндрическая форма выводов позволяет применять избирательные системы УМ и автогенераторов в форме длинных линий – коаксиальных резона-

торов. Эти резонаторы выполняют в форме металлических труб, которые насаживают на цилиндры выводов. Длины труб определяются рабочей длиной волны и необходимым коэффициентом обратной связи (в автогенераторах).

Наиболее широко лампы используют на частотах примерно до 1 ГГц. В этом диапазоне частот лампы обладают лучшими по сравнению с клистродами и ЛБВ массогабаритными показателями, высоким КПД (до 60...70%) и невысокой стоимостью, но существенно меньшим коэффициентом усиления по мощности. Лампы нуждаются в более низком питающем напряжении, чем клистроны, они менее требовательны к согласованию фидерного тракта, чем ЛБВ и амплитроны.

2. Приборы с длительным взаимодействием электронов с СВЧ полем

К таким приборам относят клистроны, магнетроны, ЛОВ, ЛБВ и т. д.

Крупный шаг в развитии магнетронных генераторов был сделан в НИИ-9 (ныне Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН) в 1936-1937 гг. На основе идей М.А. Бонч-Бруевича, предложенных еще в 1929 г., Н.Ф. Алексеевым и Д.Е. Маляровым был предложен совершенно новый тип генератора – многорезонаторный магнетрон.

Основополагающими в создании клистронов были теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию принципа пространственной группировки в потоке модулированных по скорости электронов, что было отражено в работах Арсеньевой и немца Хайля в 1935 г. – сотрудниками ленинградского физтеха.

Пролетный клистрон был изобретен в США братьями Вариан в 1938 г. Практически в то же время в СССР были разработаны клистроны (в том числе отражательный) Н.Д. Девятковым и Е.Н. Данильцевым с мощностью до 100 Вт в непрерывном режиме при длине волны 15 см.

В СССР основные разработки электровакуумных СВЧ приборов были сосредоточены в НИИ-160 (ныне АО "НПП "Исток" им. А.И. Шокина" – головное

предприятие одного из дивизионов АО «Росэлектроника»), созданном в 1943 г. Именно тогда и началось становление отечественной СВЧ электронной отрасли.

Это предприятие быстро стало центром отечественной СВЧ-электроники, пионером перспективных направлений по разработке множества типов приборов: мощных приборов М-типа, пролетных клистронов средней и большой мощности, ЛБВ средней мощности.

К середине 1950-х гг. были заложены основы для создания отечественных усилительных клистронов в широком диапазоне длин волн – от коротковолновой части сантиметрового диапазона до дециметровых волн, на уровне мощности от единиц ватт (в непрерывном режиме) до десятков мегаватт (в импульсном режиме).

ЛБВ была впервые создана Рудольфом Компфнером в 1943 г. Первые сведения о разработках ЛОВ появились в 1948 г. в СССР, разработка велась М. Ф. Стельмахом и его сотрудниками. В 1978 г. в одной американской статье было признано: «Русские практически перекрыли весь диапазон от 30 до 1000 ГГц лампами обратной волны. Результаты, полученные на западе, не превзошли этих достижений». В настоящее время в России перекрыли частоты до 1500 ГГц.

В наше время в России разработкой и производством электровакуумных СВЧ приборов занимаются АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», АО «НПП «Торий», АО «НПП «Алмаз», ПАО «Тантал», НПП «Контакт», ПАО «Гранит», АО «НПП «Фаза», ПАО «Светлана».

Например, клистроны производства компании АО «НПП «Торий» использовались в телевысильных РПДУ до замены их на твердотельные усилители. Более 50 клистронов использовалось в отечественных системах ПВО и ПРО. Максимальный рекордный КПД составлял 85%. ЛБВ производства ком-

пании АО «НПП «Торий» до сих пор используются в самолетах МиГ-29 и Су-27.

10.3 Клистроны

Клистрон – электровакуумный СВЧ прибор, работа которого основана на модуляции по скорости электронного потока электрическими СВЧ полями резонансных колебательных систем, группированием электронов в сгустки и последующим преобразованием кинетической энергии сгруппированных электронов в энергию СВЧ колебаний.

Клистроны главным образом используют как усилители мощности с большим коэффициентом усиления (по мощности до 50...60 дБ) при высоком КПД.

Клистроны относят к классу электровакуумных СВЧ приборов типа О. В приборах О-типа электроны распространяются прямолинейно и группируются в сгустки продольной составляющей СВЧ поля, отдавая свою кинетическую энергию электромагнитной волне.

Идея управления электронным пучком по скорости была высказана Д.А. Рожанским в 1932 г. Название «клистрон» происходит от греческого слова «клизо», обозначающего морской прибой, удар.

Работы по созданию мощных клистронов в НИИ-160 начались в 1954 г. 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.

У современных мощных клистронов КПД достигает 70% при коэффициенте усиления по мощности 30...60 дБ и полосе пропускания 1...10%. Сравнительно узкая полоса – основной недостаток клистронов.

По принципу действия клистроны подразделяют на *пролетные* и *отражательные*.

В пролётном клистроне электроны последовательно пролетают сквозь зазоры объёмных резонаторов. В простейшем случае резонаторов два: входной и выходной. Дальнейшим развитием пролётных клистронов являются каскадные многорезонаторные клистроны, которые имеют один или несколько промежуточных резонаторов, расположенных между входным и выходным резонаторами.

Наибольшее практическое применение находят многорезонаторные *пролетные* клистроны (МРК). Они используются в УМ и умножителях частоты и имеют чрезвычайно высокие энергетические параметры в диапазоне частот от 0,3 до 300 ГГц: выходную мощность до 1,0 МВт в непрерывном режиме и до 100 МВт в импульсном при коэффициенте усиления до 60 дБ и КПД более 40%.

В отражательном клистроне используется один резонатор, через который электронный поток проходит дважды, отражаясь от специального электрода – отражателя. Отражательные клистроны обладают очень малой мощностью и КПД и применяются главным образом в качестве гетеродинов радиоприемников и автогенераторов измерительных приборов.

Основными конструктивными элементами клистроны являются электронная пушка, входное и выходное устройства для ввода и вывода СВЧ энергии, резонаторы, фокусирующий соленоид, ионный насос и коллектор.

Электронная пушка состоит из подогревного катода и фокусирующего электрода. Потенциал фокусирующего электрода, как правило, выбирают равным потенциалу катода.

Источником электронов в клистроне является катод, термоэлектронную эмиссию в котором обеспечивает подогреватель (нить накала). Подогреватель

может работать от источников переменного или постоянного тока, но при использовании источника постоянного тока его полярность по отношению к катоду выбирают отрицательной, чтобы избежать повреждения изоляции между подогревателем и катодом. Кроме того, отрицательный потенциал предотвращает эмиссию электронов из катода в подогреватель.

Резонаторы размещены вдоль пролетного пространства. Пролетное пространство заканчивается коллектором с системой охлаждения (анодом). Обычно потенциал коллектора выбирают равным потенциалу резонаторов.

Вакуум внутри клистрона поддерживают благодаря ионно-геттерному насосу, требующему собственного электропитания. Однако этот насос не всегда необходим, поскольку сам электронный пучок внутри прибора выполняет откачивающие функции.

На рисунке 10.1 приведено устройство двухрезонаторного клистрона.

Электронная пушка формирует прямолинейный пучок электронов (либо несколько параллельных пучков), движущихся через блок резонаторов, где они взаимодействуют с СВЧ полем и далее попадают на коллектор.

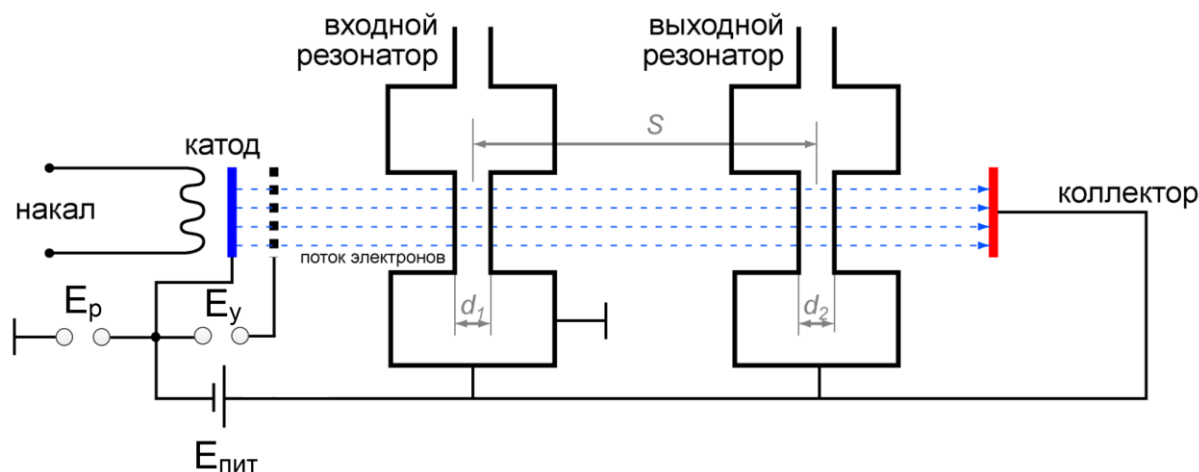


Рисунок 10.1 – Устройство двухрезонаторного клистрона

Постоянный ток на входе блока резонаторов (он же ток катода) будем обозначать как I_0 . При пролете через блок резонаторов часть электронов оседает на элементах конструкции, поэтому средний ток коллектора $I_{кол}$ несколько

меньше I_0 . Потери тока в блоке резонаторов характеризуются коэффициентом токопрохождения k_T . Для современных клистронов $k_T = 0,9...0,95$.

Скорость электронов, влетающих в блок резонаторов, определяется разностью потенциалов между блоком резонаторов и катодом, называемой обычно напряжением на резонаторах E_p . На практике блок резонаторов гальванически соединяют с внешним кожухом прибора и заземляют, а отрицательное напряжением подают на катод.

Электронная пушка, как правило, включает в себя оксидный катод, подогреваемый нитью накала, и вспомогательный управляющий электрод типа диафрагмы, служащий для формирования электронного луча заданного диаметра и его фокусировки. На управляющий электрод подается небольшое ($0...100$ В) напряжение, отрицательное по отношению к катоду.

Колебательная система представляет собой два тороидальных резонатора с сетками, закрывающими центральную часть. Обмен энергией между электронным потоком и СВЧ полем происходит именно в центральной части резонаторов (пространстве взаимодействия), где существует сильное продольное электрическое поле.

Эквивалентная схема тороидального резонатора по отношению к его центральной части имеет вид параллельного колебательного контура с магнитной связью с внешним трактом (рисунок 10.2). Индуктивность контура L ассоциируется с тороидальной полостью, емкость C – с емкостью СВЧ зазора между сетками резонатора, индуктивность $L_{св}$ – с входной петлей связи, резистор R_0 отображает резонансное сопротивление контура на холостом ходу при отключенном электронном ключе, элемент Y описывает электронную нагрузку, возникающую вследствие шунтирующего воздействия электронного луча на параметры резонатора.

Под воздействием переменного напряжения $u_{ex}(t) = U_{ex} \sin \omega t$ на зазоре входного резонатора половина пролетающих через него электронов дополни-

тельно ускоряется, а другая половина – замедляется, то есть в первом резонаторе происходит *модуляция электронного потока по скорости*.

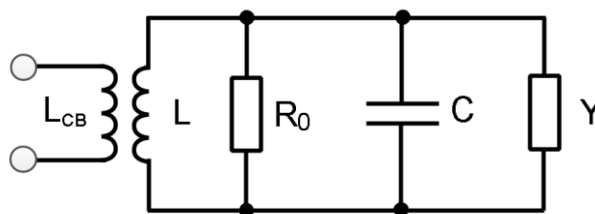


Рисунок 10.2 – Эквивалентная схема резонатора при учете электронной нагрузки

Резонаторы, как правило, соединены металлической трубкой дрейфа. Пространство внутри трубки экранировано от внешних электрических полей.

Далее происходит *группирование* электронов, приводящее к периодическому изменению мгновенной плотности электронного потока. Поэтому участок между резонаторами называю *пространством группирования*. Сам первый резонатор называют часто *группирователем*.

В результате пролета сгустков электронов между сетками второго резонатора в нем индуцируется СВЧ ток с периодом сигнала возбуждения, что и обеспечивает в конечном счете появление усиленного сигнала на выходе прибора.

Пролетный клистрон получает от ИЭП мощность

$$P_0 = I_0 E_{num}, \quad (10.1)$$

выделяя на резистивной нагрузке мощность первой гармоники

$$P_1 = I_{вых1} U_{вых}. \quad (10.2)$$

Тогда электронный КПД может быть найден как

$$\eta_{э} = \frac{P_1}{P_0} = \frac{1}{2} \frac{E_p}{E_{num}} g_1 \zeta_2. \quad (10.3)$$

$$\text{Здесь } g_1 = \frac{I_{вых1}}{I_0}, \quad \zeta_2 = \frac{U_{вых}}{E_p}.$$

В области максимума генерируемой мощности теоретический максимум электронного КПД составляет

$$\eta_e \approx \frac{1}{2} 1,16 \cdot 1,2 \approx 0,7.$$

На практике электронный КПД двухрезонаторного клистрона примерно вдвое ниже из-за потерь части электронного потока при пролете через резонаторный блок.

В таблице 10.1 приведены характеристик некоторых пролетных клистронов импульсного действия, выпускаемых компанией АО «НПП «Фаза».

Эффективным методом устранения недостатков, присущих однолучевым клистроном, а именно узкополосности, относительно низкого КПД, высокого напряжения катода, больших габаритов и массы, явилось создание многолучевых клистронов (МЛК).

Определяющую роль в развитии направления многолучевых клистронов сыграли выполненные группой теоретиков АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина» теоретические исследования. Ими были также подготовлены расчеты для разработки подобных приборов.

Таблица 10.1

Наименование	Полоса частот, ГГц	Выходная мощность импульсная, кВт	Выходная мощность средняя, кВт	Коэффициент усиления, дБ	Масса, кг
КИУ-148	2,750-3,300	100-220	6,5	48	50
КИУ-149	2,900-3,150	350-530	3,6	41	35
КИУ-221А	2,760-2780	20-30	1,5	44	25
КИУ-235А	4,150-4,200	12-24	5,3	41	15

Первые МЛК были многоствольными. Термин «ствол» обозначает одно- или многолучевую пролетную трубу, электронные лучи которой взаимодей-

ствуют с одной полуволной СВЧ электрического поля в резонаторе, работающем на высшем виде колебаний.

Первеанс отдельных лучей в МЛК обычно невелик $0,3-1,0 \text{ мкА/В}^{3/2}$, но за счет большого количества лучей, суммарный электронный поток имеет большой, до нескольких десятков $\text{мкА/В}^{3/2}$, первеанс и низкое сопротивление. В результате удастся снизить катодное напряжение в 2-5 раз, по сравнению с однолучевыми аналогами, что влечет за собой уменьшение габаритов и массы клистронов, а также их ИЭП. Индивидуальные низкопервеансные лучи лучше группируются и более эффективно отдают энергию в выходном резонаторе, что на 10-20% повышает КПД клистронов.

Однако многоствольные конструкции не увеличивали широкополосность клистронов, поскольку снижение сопротивления суммарного электронного потока, при увеличении числа лучей, сопровождалось пропорциональным уменьшением шунтового сопротивления резонатора, работающего на высшем виде колебаний, при увеличении числа емкостных выступов.

Самое важное преимущество МЛК – расширение рабочей полосы – осуществлено в МЛК с компактным расположением лучей, в резонаторах которых несколько лучей взаимодействуют с полем одной полуволны электрического СВЧ поля. В таких резонаторах с увеличением числа лучей характеристическое сопротивление уменьшается медленнее, чем сопротивление суммарного электронного потока, что и обеспечивает возможность расширения рабочей полосы.

В нашей стране, начиная с 1960-х гг., были созданы несколько десятков различных моделей МЛК, предназначенных для использования в радиолокационной технике, ускорителях, космической и тропосферной связи, телевидении, установках радиоэлектронной борьбы и других видах оборонной и гражданской радиоэлектронной аппаратуры. Существенные преимущества МЛК позволили им успешно конкурировать с другими электровакуумными СВЧ приборами, в частности, ЛБВ, магнетронами и однолучевыми клистронами. Характеристики

некоторых импульсных широкополосных МЛК, разработанных в АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», представлены в таблице 10.2. Их внешний вид – на рисунке 10.3.

Таблица 10.2

	L	S	X	K
Относительная ширина полосы, %	6-16	5,4...7,1	4,8-6	0,1-1
Катодное напряжение, кВ	8-50	20-55	10-17	2-3
Выходная импульсная мощность, кВт	10-4000	200-2000	20-240	0,2-1
Выходная средняя мощность, кВт	3-27	5-27	2-6	0,1-0,3
КПД, %	25-45	25-40	20-40	20-35
Коэффициент усиления, дБ	30-45	35-55	35-45	30-35
Количество лучей	30-37	6-30	19-28	18
Способ фокусировки	МРФС	МРФС, соленоид	МРФС, ПМ МФС	ПМ МФС
Масса с ФС, кг	40-100	35-80, 260	15-35	0,4-1,5



Рисунок 10.3 – Внешний вид МЛК

Следует отметить ряд конструктивных особенностей МЛК российской разработки.

1. Большинство широкополосных и узкополосных МЛК, применяемых в мобильной и бортовой радиоэлектронной аппаратуре, используют пакетированные (являющиеся принадлежностью конструкции клистрона) реверсные фокусирующие системы на постоянных кольцевых магнитах (МРФС). Поле в таких системах несколько раз изменяет полярность (реверс).

Практика показывает, что МЛК с МРФС имеют массу в 5-10 раз меньшую, чем масса однолучевых аналогов с фокусирующими электромагнитами или однополярными фокусирующими системами на постоянных магнитах (ПМ МФС). С другой стороны, фокусировка электронных лучей в ПМ МФС, недостаточно устойчива и средние мощности импульсных клистронов с МРФС не превышают 25 кВт.

2. Во всех МЛК, за исключением клистрона КИУ-40, используются магнитно-экранированные многолучевые электронные пушки со сферическими оксидными импрегнированными катодами и общими для всех лучей катодно-подогревательными узлами. Надо отметить высокую плотность тока с катодов $7-12 \text{ А/см}^2$ в импульсных МЛК L, S и X диапазонов, и до 30 А/см^2 в К-диапазоне. Поэтому долговечность МЛК обычно не превышает 5-8 тыс. ч.

3. Клистроны L-диапазона используют традиционные тороидальные резонаторы. В ряде широкополосных клистронов этого диапазона применены двухззорные резонаторы, работающие на π -виде колебаний, что позволяет существенно укоротить длину пространства взаимодействия.

4. В клистроны S-диапазона используют тороидальные или, в наиболее мощных импульсных приборах, кольцевые резонаторы, работающие на виде колебаний E_{010} . Кольцевые резонаторы позволяют обеспечить радиальную равномерность СВЧ поля в зазорах взаимодействия большой поперечной площади. Для увеличения характеристического сопротивления выходные активные резонаторы широкополосных клистронов выполняют двухззорными, на 2π -виде колебаний.

5. В широкополосных клистроны X- и К-диапазонов применяют тороидальные или призматические резонаторы, работающие на видах H_{101} и/или H_{102} . Выходные активные резонаторы двухззорные, на 2π -виде колебаний. В X-диапазоне применяют также многоствольные конструкции для увеличения

мощности и уменьшения плотности тока с катода. При этом в каждом стволе используют многолучевые пролетные трубы.

Важно отметить, что в начале 1990-х гг. была разработана конструкция двуствольного МЛК X-диапазона, работающего на двух видах колебаний, что позволило практически удвоить полосу частот.

6. Практически во всех перечисленных широкополосных МЛК (таблица 10.2) для выравнивания и расширения АЧХ используют входные и выходные фильтровые системы, представляющие собой цепочку из активного и нескольких пассивных резонаторов.

Современные мощные МЛК 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 усилительных каскадов РПДУ.

В последние годы XX в. значительно активизировались разработки МЛК за рубежом. Работы велись как в области создания широкополосных МЛК, например, клистрон S-диапазона для модернизации РЛС AN/SPY-1 системы «AEGIS», так и в области узкополосных МЛК для ускорителей.

Конструкции зарубежных широкополосных клистронов не несут в себе качественных отличий от российских аналогов. Однако в разработке узкополосных сверхмощных клистронов ведущими зарубежными фирмами достигнуты значительные успехи, что связано с проектами линейного электрон-позитронного коллайдера TESLA (Германия), а также Международного электрон-позитронного линейного коллайдера, использующими сверхпроводящие ускорительные технологии. Создание этих ускорителей обеспечивает рынок сбыта клистронов в количестве тысяч штук, что и послужило толчком к их ускоренной разработке тремя ведущими зарубежными фирмами «CPI», «Thales», «Toshiba».

Основные направления дальнейшего развития МЛК проистекают из общих тенденций развития электровакуумных СВЧ приборов.

Переход в область высоких частот, в частности, в миллиметровый диапазон. Эта тенденция связана, во-первых, с развитием твердотельных ГП и их успешной конкуренцией с электровакуумными приборами в низкочастотной области СВЧ диапазона.

Во-вторых, развитие цифровых методов обработки сигнала снижает требования к уровню мощности РПДУ, а повышение частоты сигнала повышает эффективность ряда применений радиолокационной и связной аппаратуры и улучшает ее массогабаритные характеристики.

Как следует из таблицы 10.2, в случае мощных МЛК этот переход к высоким частотам может быть осуществлен путем создания многоствольных конструкций с резонаторами, работающими на высших видах колебаний. При этом расширение полосы частот может достигаться путем создания многоствольных клистронов, работающих на нескольких видах колебаний.

Еще одним способом расширения полосы частот МЛК является использование многозазорных резонаторов. До сих пор в МЛК использовались выходные активные резонаторы с числом зазоров не более 2. Однако в области высоких частот, в К-диапазоне, возможно использование выходных активных резонаторов с большим числом зазоров.

На предприятии АО «НПП «Торий» в настоящее время проводятся две НИОКР, направленные на создание широкополосных МЛК, работающих в Ка-диапазоне.

Создание мощных МЛК с магнитным сопровождением лучей в области пушки. В настоящее время в России не выпускают клистроны с выходной средней мощностью свыше 60-80 кВт. Между тем такие клистроны необходимы для питания мощных ускорителей электронов и протонов, используемых в промышленности, медицине и фундаментальных исследованиях.

Оптимальной для создания подобных клистронов является конструкция МЛК с магнитным сопровождением луча в области пушки.

В 1990-х гг. на рынке появился новый прибор – клистрод, представляющий собой гибрид тетрода и пролётного клистрона. Лампы, подобные клистроду, были независимо созданы в США (Д.Х. Прист с сотрудниками, 1982 г.) и в СССР (А.Д. Сушков с сотрудниками, 1983 г.). Приборы обладают преимуществами перед приборами с сеточным управлением (более высоким коэффициентом усиления в сочетании с большей устойчивостью в работе) и перед клистроном (повышенным КПД, меньшими габаритами).

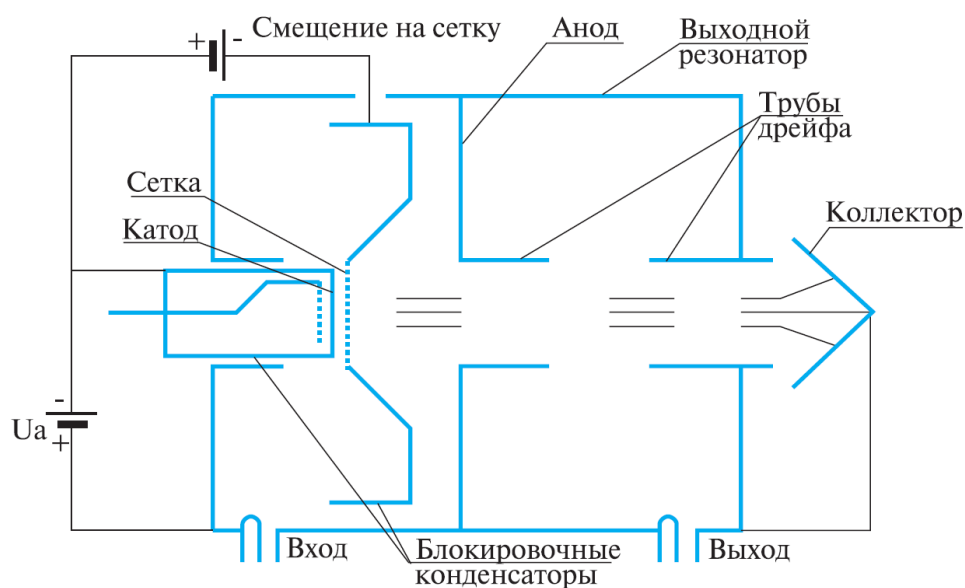
Благодаря высоким КПД, линейности характеристик, надёжности, малым размерам и другим достоинствам клистроды широко использовались в качестве мощных оконечных усилителей телевизионных РПДУ дециметрового диапазона (470-860 МГц), в том числе и для цифрового телевидения как в России, так и за рубежом.

Структурная схема клистрода приведена на рисунке 10.4а. Катод, сетка, анод и входной резонатор образуют как бы триодную часть прибора, возбуждаемую входным сигналом. На выходе из сетки электронный пучок оказывается модулированным по плотности вследствие воздействия ВЧ электрического поля в пространстве катод-сетка.

Такой режим характерен для мощных ТВ триодов. В отличие от динамического группирования электронов в клистродах его называют модуляцией эмиссии. Триодная часть клистрода работает в классе В (точнее – в АВ), когда на сетку подается отрицательное смещение относительно катода, которое по абсолютной величине несколько меньше напряжения запирающего триода. Этот режим характеризуется высокой линейностью и превосходным КПД. Так как сетка является элементом входного резонатора, она должна быть изолирована от его катода по постоянному напряжению. В качестве изоляции применяют

специальные блокировочные конденсаторы, не препятствующие протеканию в резонаторе высокочастотных токов.

Таким образом, в катодно-сеточной части прибора формируется периодическая, с частотой входного сигнала, последовательность электронных сгустков, которые ускоряются до анодного потенциала в пространстве сетка-анод. Затем сгустки поступают в выходной резонатор и взаимодействуют с его высокочастотным полем, отдавая кинетическую энергию точно так же, как это происходит в обычном пролетном клистроне.



a)



б)

Рисунок 10.4 – Структурная схема (a) и внешний вид (б) клистрода

Для обеспечения мгновенной полосы 6-9 МГц, требуемой для передачи ТВ-сигнала, в выходном каскаде клистрода используется система двух связанных резонаторов. В приборе предусмотрены короткие пролетные каналы до и

после выходного резонатора, а от расфокусировки электронный пучок удерживается магнитным полем соленоида. Магнитное поле позволяет без потерь на стенках канала транспортировать электронный пучок до коллектора, где он и рассеивается.

В 1995-1997 гг. в нашей стране специалисты АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», опираясь на многолетний опыт разработок и производства многолучевых СВЧ приборов, создали новую конструкцию мощного клистрода – многолучевой клистрод. Это позволило увеличить усиление на 2-3 дБ по сравнению с однолучевым аналогом в диапазоне 470-810 МГц.

Переход к многолучевой конструкции позволил создать приборы, обладающие значительными преимуществами по сравнению с однолучевыми клистродами. В их числе:

- снижение рабочего напряжения (традиционно для многолучевых конструкций приборов);
- использование металлических сеток – в отличие от сеток из пиролитического графита, применяемых в однолучевых клистродах;
- работа с парциальными сетками сравнительно небольшого диаметра, обладающими высокой надежностью в эксплуатации;
- более высокий уровень мощности при относительно низком напряжении (120 кВт, 25 кВ);
- увеличение усиления.

Крупнейшим производителем клистронов сегодня считается фирма «EEV».

10.4 Лампы бегущей и обратной волны

ЛБВ – широко распространенный тип электровакуумных СВЧ приборов, работающих на частоте от единиц до сотен гигагерц с выходной мощностью от десятков милливатт до десятков киловатт в непрерывном и до сотен киловатт в

импульсном режиме. Их отличает значительный коэффициент усиления (до 50 дБ) и широкополосность, достигающая нескольких октав.

ЛБВ подразделяют на два класса: ЛБВ типа О и ЛБВ типа М.

В приборах типа О происходит преобразование кинетической энергии электронов в энергию СВЧ поля в результате торможения электронов этим полем. Магнитное поле в таких лампах направлено вдоль направления распространения пучка и служит лишь для фокусировки последнего.

В приборах типа М в энергию СВЧ поля переходит потенциальная энергия электронов, смещающихся в результате многократного торможения и разгона от катода к аноду. Средняя кинетическая энергия при этом остается постоянной. Магнитное поле в таких приборах направлено перпендикулярно направлению распространения пучка.

В отличие от клистрона в ЛБВ О-типа между устройствами ввода и вывода СВЧ энергии размещена замедляющая система с согласующими устройствами для получения в ней бегущей замедленной волны.

Приёмником кинетической энергии электронов, пролетевших вдоль замедляющей системы, как и в клистроне, служит коллектор. Коллектор имеет положительный потенциал относительно катода. В современных ЛБВ коллектор состоит из нескольких электродов (ступеней) с различными потенциалами, что позволяет селективно собирать электроны с разными энергиями. Такие коллекторы называют многоступенчатыми коллекторами с рекуперацией. Причем потенциал коллекторов значительно ниже потенциала замедляющей системы, что приводит к увеличению КПД ЛБВ.

Мощные ЛБВ О-типа, как правило, уступают клистроном в величине КПД. Однако ЛБВ способны усиливать сложные сигналы с полосой частот до нескольких октав, что обуславливает их широкое применение в РЛС.

Отметим, что и клистроны, и ЛБВ часто имеют в составе электронной пушки специальный электрод, предназначенный для управления величиной то-

ка катода, который часто называют первым анодом или управляющим электродом (сеткой). Напряжение на этом электроде по отношению к катоду может изменяться от отрицательных значений до небольших положительных.

В ЛБВ-О электромагнитная волна со скоростью света движется вокруг специальной спирали – замедляющей структуры, возбуждаемой СВЧ сигналом (рисунок 10.5). Внутри спирали от катода к коллектору движется поток электронов со скоростью v_z . Фазовая скорость v_ϕ электромагнитной волны, вектор которой направлен вдоль спирали, на порядок меньше скорости света.

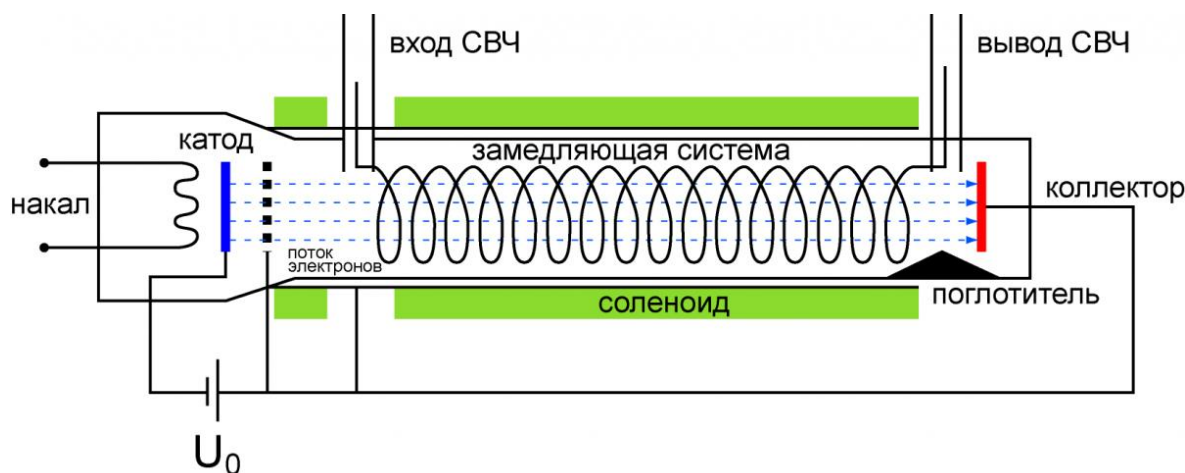


Рисунок 10.5 – Устройство ЛБВ типа О

При этом добиваются следующего примерного равенства $v_z = v_\phi$, благодаря чему происходит взаимодействие потока электронов с электромагнитной волной, движущейся в прямом направлении, которая увеличивает свою энергию по мере распространения. Увеличенный по мощности СВЧ сигнал снимается с противоположного от входа конца спирали.

Подогреваемый нитью накала катод и электроды предварительной фокусировки создают нитевидный (иногда плоский или трубчатый) пучок электронов, начальная скорость которых при входе в замедляющую систему определяется постоянным напряжением на спирали.

При отсутствии СВЧ поля в спирали скорость электронов внутри нее будет неизменной. Для того чтобы электроны достигли коллектора, в баллоне

ЛБВ-О создается продольное фокусирующее постоянное магнитное поле, препятствующее оседанию электронов на проводниках спирали. Такие оседающие электроны, во-первых, прекращают взаимодействие с СВЧ полем спирали, а во-вторых, нагревают ее тонкие проводники, не имеющие, как правило, специального теплоотвода, что может привести к расплавлению или необратимой деформации спирали.

Магнитное поле создается либо внешними постоянными U-образными магнитами или соленоидами, либо, чаще всего, керамическими намагниченными ферритовыми кольцами, охватывающими вакуумированный баллон ЛБВ-О.

Таким образом, в ЛБВ используется принцип непрерывного взаимодействия потока электронов с бегущей электромагнитной волной, распространяющейся в нерезонансной колебательной системе. Этим ЛБВ значительно отличаются от приборов СВЧ, использующих резонансные колебательные системы, – клистронов и магнетронов.

В ЛБВ вместо узкополосных резонансных колебательных систем используют широкополосные замедляющие структуры. Электромагнитное поле замедляющей структуры представляет собой сумму бесконечного множества пространственных гармоник, одни из которых являются прямыми (их фазовая скорость совпадает по направлению с групповой скоростью электромагнитной волны), а другие – обратными (фазовая скорость противоположна групповой). В ЛБВ электронный поток синхронно взаимодействует либо с прямой гармоникой, либо с обратной.

Механизм взаимодействия электронного потока с замедленной электромагнитной волной можно представить в виде последовательного осуществления двух процессов. Первый из них – группирование электронов, превращение однородного по плотности и скорости потока в последовательность перемещающихся сгустков и разрежений. Второй процесс – уменьшение скорости сгуст-

ков, попадающих в тормозящие полупериоды электромагнитной волны, с передачей части кинетической энергии электронов СВЧ полю.

Оба эти процессы осуществимы, если напряженность электрического поля СВЧ волны имеет составляющую, направленную вдоль оси перемещения электронов.

Кроме того, необходимо обеспечить условие синхронизма волны и электронного потока (то есть примерного равенства их скоростей), что приводит к сохранению взаимного расположения профиля волны и летящих электронов на значительном участке замедляющей системы.

Особенно ценным свойством ЛБВ является их широкополосность, поскольку их рабочая полоса частот не ограничена величиной нагружаемой добротности колебательной системы, как во всех ГП с резонансной колебательной системой.

В широкополосных ЛБВ используют замедляющие системы со слабой дисперсией. При фиксированном ускоряющем напряжении скорость электронов v_0 остается неизменной. Следовательно, чем слабее дисперсия замедляющей системы, тем шире диапазон частот, в пределах которого может удовлетворяться условие фазового синхронизма. При использовании замедляющей системы с сильно выраженной дисперсией полоса пропускаемых частот становится более узкой, но появляется возможность передвигать ее по желанию в пределах широкого диапазона частот путем изменения напряжения электропитания, разгоняющего электроны.

Генераторы на ЛБВ типа О выпускаются от дециметрового до верхней части миллиметрового диапазона длин волн. Импульсные ЛБВ позволяют получить выходные мощности от нескольких мегаватт в дециметровом диапазоне волн до нескольких киловатт в миллиметровом диапазоне. В режиме непрерывного генерирования эти мощности составляют 100 и 1 кВт. Коэффициент уси-

ления достигает 60 дБ на один прибор. Полоса пропускания современных ЛБВ типа О от десятков процентов до нескольких октав.

ЛБВ типа М производятся на выходную мощность порядка нескольких киловатт в непрерывном режиме и 100-200 кВт в импульсном режиме, диапазон рабочих частот около 1-1,5 октав в дециметровом и сантиметровом диапазонах, КПД составляет 35-45%.

ЛБВ имеют гораздо бóльшую, чем клистроны, полосу частот, однако они уступают клистронам по мощности, существенно ниже и их КПД. ЛБВ требуют большого типа высокостабильных ИЭП. К согласованию входных и выходных цепей ЛБВ предъявляют жесткие требования. Рассогласование в любом из этих трактов может привести к самовозбуждению усилителя.

В настоящее время АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина» разрабатывает и выпускает мощные ЛБВ на цепочке связанных резонаторов (ЦСР) – широкополосные приборы с уровнем мощности до нескольких десятков киловатт, применяемые в системах дальней, тропосферной и космической связи. Применение в ЛБВ замедляющей системы типа "встречные штыри" и унифицированной магнитной системы позволило уменьшить массу приборов в 2,5 раза. Для связных систем, работающих в широком диапазоне частот (до 40%) в режиме одновременного усиления большого числа сигналов, разработана спиральная ЛБВ непрерывного действия с выходной мощностью 1,2 кВт.

Кроме того, создано новое направление – многолучевые "прозрачные" ЛБВ. Это позволило реализовать многорежимность РПДУ по выходной мощности. Разработан ряд цепочек приборов, состоящих из предварительной ЛБВ и выходной "прозрачной" ЛБВ, обеспечивающих регулировку мощности от сотен ватт до нескольких десятков киловатт, высокий КПД и широкую полосу при сравнительно низких питающих напряжениях.

Кроме того, созданы импульсные ЛБВ миллиметрового диапазона с выходной мощностью 20 Вт в диапазоне 3 мм и 2 кВт в диапазоне 8 мм. Для бор-

товых РЛС разработана серия ЛБВ с низковольтным сеточным управлением, многоступенчатыми коллекторами и коэффициентом усиления до 60 дБ. Всего разработано более 40 типов ЛБВ.

В таблице 10.3 приведены основные характеристики выпускаемых ЛБВ.

На рисунке 10.6 приведен внешний вид некоторых ЛБВ, выпускаемых в АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина».

Таблица 10.3

Параметры	ЛБВ непрерывного действия	Импульсные ЛБВ	Спиральные ЛБВ непрерывного действия
Рабочий диапазон, ГГц	4...14,5	8...17	5,5...8,5
Выходная непрерывная мощность, кВт	1,5...2	-	1,2
Выходная импульсная мощность, кВт	-	0,3...10	-
Полоса рабочих частот, %	0,5...20	10	40
Коэффициент усиления, дБ	до 40	40...60	40
КПД, %	27	26...35	30
Рабочие напряжения, кВ	10...11	8...30	11...12

Приборы, в которых используется взаимодействие электронов с обратными волнами (отрицательными пространственными гармониками), появились в 1950 гг. и получили название *ламп обратной волны* (ЛОВ). ЛОВ иногда называют также *карсиноотронами* (карциноотронами). Происхождение этого названия связано с греческим словом «карсинос», обозначающим рак. Такая ассоциация обусловлена обратным движением энергии в ЛОВ по отношению к электронному потоку.

ЛОВ подразделяют на два класса: ЛОВ типа О и ЛОВ типа М. В приборах типа О происходит преобразование кинетической энергии электронов в энер-

гию СВЧ поля в результате торможения электронов этим полем. В приборах типа М в энергию СВЧ поля переходит потенциальная энергия электронов, смещающихся в результате многократного торможения и разгона от катода к аноду. Средняя кинетическая энергия при этом остаётся постоянной.

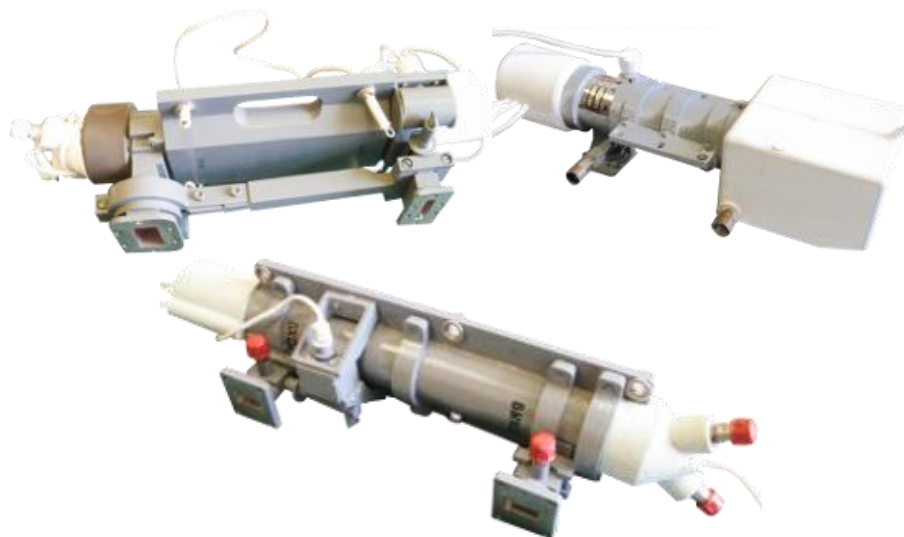


Рисунок 10.6 – Внешний вид некоторых ЛБВ

В ЛОВ электронный поток движется навстречу потоку энергии. При этом вывод энергии находится на конце замедляющей системы, обращенном к электронной пушке. В ЛОВ электронный поток кроме обычной для него роли звена, по которому энергия ИЭП передается электромагнитной волне, выполняет также роль звена принципиально неустранимой обратной связи. Эта распределенная обратная связь может привести к самовозбуждению автоколебаний даже при идеальном согласовании на входе и на выходе.

Устройство ЛОВ типа О приведено на рисунке 10.7.

В отличие от ЛБВ в ЛОВ обычно используют замедляющие системы с неравномерной дисперсионной характеристикой. Такая характеристика позволяет реализовать главное преимущество ЛОВ – широкий диапазон электронной настройки, т. е. зависимости частоты генерируемых или усиливаемых колебаний от ускоряющего напряжения ЛОВ.

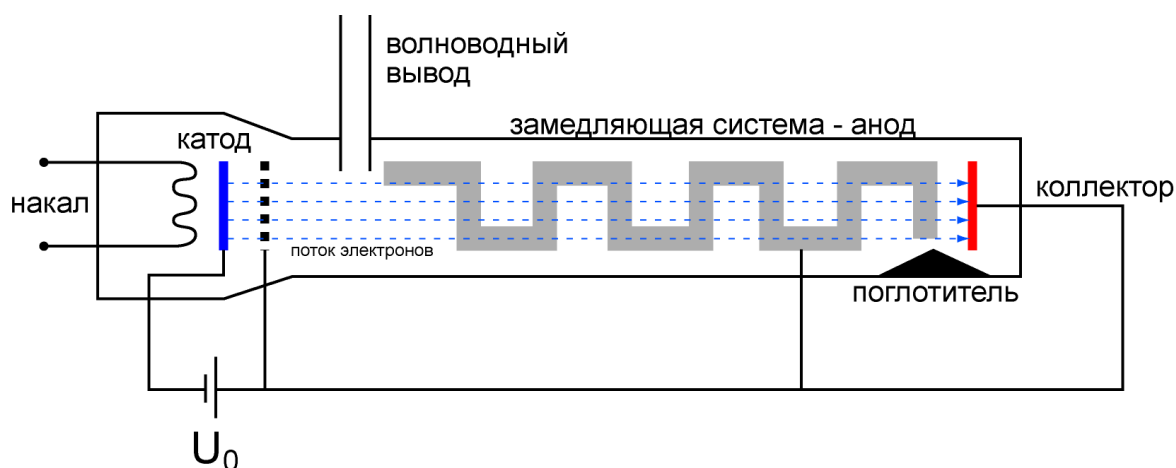


Рисунок 10.7 – Устройство ЛОВ типа О

Наиболее часто ЛОВ используют в режиме автогенерации. Чтобы избежать резких скачков выходной мощности при изменении длины волны, на конце замедляющей системы, обращенном к коллектору, обычно включают согласованную нагрузку, которая поглощает волну, отраженную от рассогласованной внешней нагрузки. Очевидно, что при согласованной нагрузке поглотитель не оказывает никакого влияния на величину выходной мощности ЛОВ.

Возможно использование ЛОВ и в качестве резонансного высокочастотного усилителя с широкодиапазонной электронной перестройкой частоты. Такие усилители весьма узкополосны и обычно используются как высокоизбирательные устройства. Их полоса пропускания обратно пропорциональна коэффициенту усиления.

Важным свойством генераторов на ЛОВ является слабая зависимость мощности и частоты колебаний от степени согласования с нагрузкой. Конструктивно ЛОВ имеют много общего с ЛБВ. Внешнее отличие состоит в том, что вывод энергии СВЧ расположен не в конце замедляющей системы, а вблизи катода.

Основная область применения маломощных ЛОВ-О – источники СВЧ колебаний с электронной перестройкой частоты. В отношении диапазона пере-

стройки частоты у ЛОВ-О нет конкурентов. Такие генераторы широко используют в измерительной аппаратуре.

На ЛОВ-М создают мощные управляемые по частоте СВЧ автогенераторы с высоким КПД. Отличие конструкции ЛОВ-М от ЛБВ-М составит в том, что выход энергии располагается вблизи участка замедляющей системы, где электронный поток эмитируется в пространство со скрещенными электрическим и магнитным полями, а вблизи коллектора в условиях вакуума или вне его находится согласованный поглотитель, как в ЛОВ-О.

Частота генерации ЛОВ-М перестраивается изменением анодного напряжения в пределах 25-35% от средней частоты, причем модуляционная характеристика достаточно линейна – отклонения ее крутизны от постоянного значения не превышают 10% и связаны с дисперсионными свойствами замедляющей системы. Выходная мощность достигает единиц киловатт в коротковолновой части дециметрового диапазона. КПД таких генераторов составляет около 50% для приборов дециметрового диапазона и снижается до 30% для ЛОВ-М сантиметрового диапазона. Основное применение ЛОВ-М – создание радиопомех в системах радиоэлектронной борьбы.

10.5 Магнетроны

Для генерации мощных СВЧ колебаний применяют электронные приборы, в которых взаимодействие электронов с электрической составляющей поля СВЧ происходит в пространстве, где постоянное магнитное поле перпендикулярно постоянному электрическому полю. Такие приборы называют *магнетронами*. Термин «магнетрон» используют с 1920-х гг., когда работами А. Халла, А. Жачека, А.А. Слуцкина, К. Окабе развивалась техника генерирования колебаний сантиметрового диапазона длин волн в скрещенном электрическом и магнитном полях.

Действующие магнетронные СВЧ генераторы были созданы независимо и почти одновременно в трёх странах: в Чехословакии (А. Жачек, 1924 г.), в СССР (А.А. Слущкин и Д.С. Штейнберг, 1925 г.), в Японии (Окабе и Яги, 1927 г.).

В 1936 г. Н.Ф. Алексеевым и Д.Е. Маляровым под руководством М.А. Бонч-Бруевича была создана конструкция многорезонаторного магнетрона с массивным анодным блоком.

Использование именно магнетронных автогенераторов, позволяющих обеспечить пиковую мощность до сотен киловатт при КПД около 80%, способствовало развитию радиолокационной техники в годы Второй мировой войны и после нее, широкому использованию устройств СВЧ нагрева в бытовых и промышленных печах, развитию средств передачи энергии с помощью электромагнитных полей.

Базовым для семейства магнетронных приборов является многорезонаторный магнетрон, устройство которого показано на рисунке 10.8.

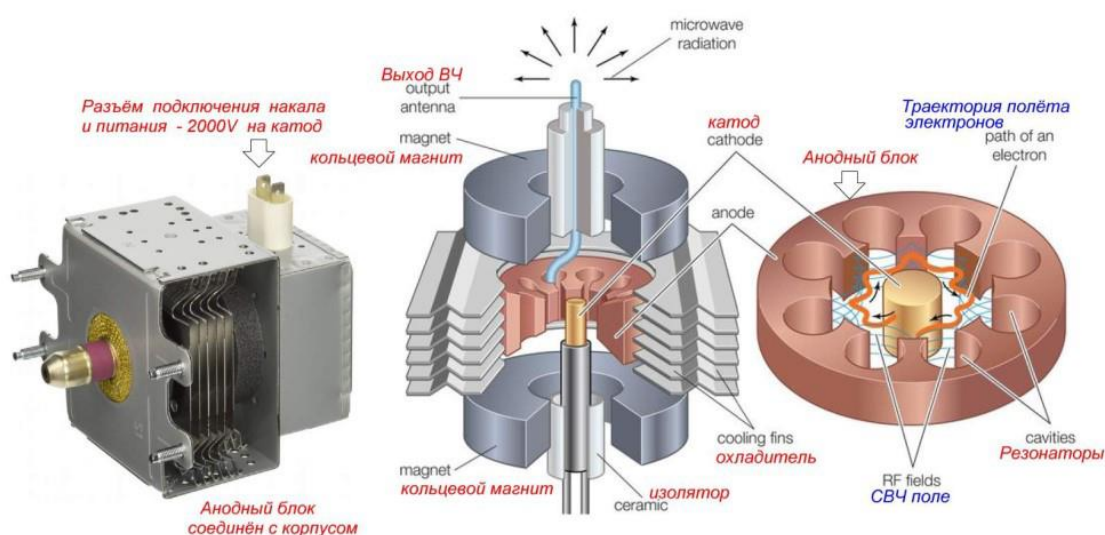


Рисунок 10.8 – Устройство многорезонаторного магнетрона

Статическое электрическое поле прикладывается между катодом и анодным блоком. Статическое магнитное поле создается между торцами анодного

блока. Кольцевая система резонаторов образована цилиндрическими полостями и щелями в анодном блоке. Вывод СВЧ энергии связывает магнетрон с нагрузкой.

Один из наиболее важных параметров магнетрона, по которому он имеет преимущества перед другими СВЧ генераторами, является электронный КПД, равный отношению полезной СВЧ мощности первой гармоники P_1 к мощности, потребляемой от источника анодного электропитания: $\eta_e = P_1/P_0$. Точный расчет колебательной мощности P_1 через ток первой гармоники затруднен сложным характером движения отдельных электронов в скрещенных статических полях при учете периодического по углу изменения структуры СВЧ поля, необходимости учета формы сгустка и влияния в нем пространственного заряда. Такие расчеты с некоторыми приближениями проводят разработчики магнетронных генераторов.

Параметры некоторых магнетронов импульсного действия, выпускаемых компанией АО «НПП «Торий», представлены в таблице 10.4.

Таблица 10.4

Тип магнетрона	Частота, МГц	Импульсная мощность, МВт	Средняя мощность, кВт
МИ-320	1883-1889	10	10
МИ-328	1808-1828	6,5	20
МИ-435	1883-1889	10	20
МИ-470	1883-1889	10	30
МИ-475	2992-3001	2,0	2,5

Внешний вид некоторых импульсных магнетронов производства компании НПП «Фаза» приведен на рисунке 10.9.

Импульсная модуляция в магнетронных автогенераторах осуществляется подачей на катод отрицательных видеоимпульсов напряжения, поскольку массивный анодный блок заземлен по постоянному току. При учете длительности

фронтов модулирующего импульса огибающая СВЧ сигнала имеет более крутые фронты, а длительность СВЧ импульса на 20-30% меньше, чем длительность модулирующего. Неравномерность плоской вершины модулирующего импульса анодного напряжения приводит к заметной нежелательной неравномерности огибающей СВЧ сигнала и к паразитному электронному смещению частоты генерации.



Рисунок 10.9 – Внешний вид импульсных магнетронов

Требования к ИМ достаточно высоки по отношению к длительности переднего фронта и к допустимой неравномерности вершины. Их выполнение осложняется высокими напряжениями и мощностью ИМ, сравнимой с мощностью СВЧ усилительного каскада, нелинейной нагрузкой для ИМ, малой длительностью модулирующего импульса и необходимостью иметь высокий КПД модулирующего каскада.

10.6 Другие типы электровакуумных СВЧ приборов

В настоящее время массовое производство многорезонаторных магнетронов организовано для целей СВЧ нагрева в бытовых и промышленных печах; для источников света повышенной яркости, в которых СВЧ колебания поддерживают режим светящейся плазмы; для приборов медицинской электроники, не требующих высоких показателей по стабильности частоты. Также изготавливают многорезонаторные магнетроны для эффективного преобразования мощ-

ности постоянного тока или тока промышленной частоты в мощность СВЧ поля для систем межспутникового энергоснабжения от солнечных батарей.

Простейшие многорезонаторные магнетроны имеют недостатки, связанные с нестабильностью частоты из-за ее электронного смещения при нестабильном анодном напряжении и из-за влияния рассогласования нагрузки. Кроме того, в них трудно изменить частоту, на которую магнетрон был изготовлен.

Автогенератор магнетронного типа с широкой электронной перестройкой частоты называют *митроном*. В этом приборе вместо кольцевой системы объемных резонаторов использована нерезонансная замедляющая система встречных штырей, которая кольцевыми связками на торцах поддерживает колебания вида π . Кроме того, для устранения резкой зависимости постоянной составляющей анодного тока от анодного напряжения, которое теперь управляет частотой генерации, подогреваемый катод вынесен из пространства взаимодействия электронов с полями, введены управляющий электрод и цилиндрический холодный катод. Скрещенные электрическое и магнитное поля образуются между холодным катодом и расположенными вокруг него встречными штырями, где происходит группирование электронов в спицы и возникают незатухающие колебания.

Частота генерации пропорциональна анодному напряжению, которое в отличие от многорезонаторного магнетрона можно изменять в несколько раз, поскольку значение анодного тока задается напряжением на управляющем электроде.

Максимальная выходная мощность митронов не превышает 100 Вт из-за того, что электронная пушка вынесена из пространства взаимодействия. Однако частоту генерации можно перестраивать за счет анодного напряжения в 2...3 раза, причем отклонения модуляционной характеристики от линейной не более 2%. В митроне имеется возможность производить амплитудную модуляцию выходных колебаний изменением управляющего напряжения. Скорость пере-

стройки частоты в митроне ограничена процессами в модуляторе, который при выходных напряжениях порядка 1...4 кВ должен обеспечивать анодный ток 10...500 мА.

Современные митроны работают в диапазоне частот 0,2-10 ГГц. Для мощных митронов КПД достигает 30-60%. Крутизна электронной перестройки составляет 0,2-10 МГц/В, что существенно выше, чем у ЛОВ типов О и М. Достоинствами митрона являются, кроме отмеченных, также малое изменение СВЧ мощности в пределах диапазона электронной перестройки, компактность и малая масса. Митроны малой мощности применяют в качестве гетеродинов широкополосных приемников и генераторов качающейся частоты в генераторах стандартных сигналов.

Платинотроном называют электронный прибор – автогенератор или усилитель – в котором электронный поток, движущийся в скрещенных электрическом и магнитном полях, взаимодействует с обратной гармоникой волны, и отличающийся сочетанием незамкнутой замедляющей системы с замкнутым в кольцо электронным потоком.

Слово «платинотрон» имеет в своей основе греческий корень «platis» – широкий. Действительно, эти приборы по сравнению с магнетроном имеют существенно бóльшую полосу усиления или генерации.

Платинотрон, используемый в усилительном режиме, обычно называют *амплитроном*, а при использовании его в качестве автогенератора незатухающих колебаний – *стабилотроном*.

Амплитрон (от англ. amplifier – усилитель), или усилитель со скрещёнными полями – специализированный электровакуумный СВЧ прибор, появившийся в середине 1950-х гг. и часто используемый для усиления в сверхмощных РПДУ. Внешний вид амплитронов L-4756А и МИУ-79 (АО «НПП «Фаза») приведен на рисунке 10.10.

Амплитрон МИУ-79 работает в диапазоне частот 1,215-1,280 ГГц, имеет выходную импульсную мощность до 45 кВт и весит около 8 кг.

Амплитрон имеет меньшую способность к усилению и полосу пропускания, чем другие электровакуумные СВЧ приборы, однако более эффективен и позволяет получать значительно большую выходную мощность. Пиковая мощность может достигать многих мегаватт, а средняя мощность составлять десятки киловатт при использовании устройства на 70% мощности.



а)



б)

Рисунок 10.10 – Амплитроны L-4756A (а) и МИУ-79 (б)

Амплитрон имеет преимущество, заключающееся в том, что при снятии с него электропитания он начинает пропускать сигнал непосредственно с входа на выход почти без потерь. Два усилителя могут быть соединены последовательно, с подачей электропитания лишь на один из них. В случае же, если тот усилитель, на который подано электропитание, выйдет из строя, для восстановления работоспособности системы достаточно переключить электропитание на второй усилитель.

Стабилотрон – это автогенератор высокостабильных по частоте колебаний, выполненный на основе амплитрона. Если на выходе амплитрона появился шумовой сигнал, то часть его отразится от фазовращателя и начнет двигаться в обратном направлении. Отраженный сигнал практически без затухания прохо-

дит через замедляющую систему на вход амплитрона и попадает в резонатор. Часть пришедшей энергии отразится от резонатора и пойдет к входу амплитрона, усилится в нем и вернется к фазовращателю, опять отразится и т. д. Таким образом, появляется цепь обратной связи. При выполнении балансов фаз и амплитуд в приборе устанавливается стационарный режим.

По сравнению с магнетроном при той же мощности стабилитрон имеет более высокую стабильность частоты при изменении условий работы (нагрузка, анодный ток и др.).

Другой автогенератор с электронной перестройкой частоты, реализованный на базе амплитрона, называли *карматроном* (karma – действие; санскрит). Для получения устойчивой генерации в его замедляющей системе увеличили значение сопротивления связи (стало выполняться условие баланса амплитуд), а на входе поставили согласованную нагрузку.

Еще одной разновидностью электровакуумных СВЧ приборов являются *гирокоты*. Гирокоты как мощные усилители метрового и дециметрового диапазона были предложены в 1960-х гг. в СССР группой академика Г.И. Будкера. Термин «гирокот» составлен из двух слов: «giros» (греч.) – круг, «continuum» (латин.) – непрерывный.

В гирокоте непрерывный электронный пучок модулируется во входном резонаторе по направлению, что создает его вращение по кругу. В результате он попадает во второй кольцевой волноводный резонатор через кольцевую прорезь (щель) по центру волновода. При отклонении пучка он перемещается по кругу вдоль сквозной кольцевой щели, оставаясь за счет синхронизации с волной в тормозящей фазе электрической составляющей электромагнитной бегущей волны в резонаторе.

Фокусировка пучка и его дополнительное выравнивание для вхождения в щель параллельно продольной оси осуществляется электростатической фокусирующей системой, а сбор электронов после пролета через щель в резонаторе

происходит в кольцевом коллекторе. Источником пучка является ускоряющая высоковольтная электронная пушка, поэтому здесь возникает побочное рентгеновское излучение.

В гироконах при ускоряющих напряжениях от долей до единиц мегавольт получены мощности от единиц в непрерывном режиме до сотен мегаватт в импульсном при коэффициенте усиления 20...25 дБ и КПД более 80%. Их недостаток – узкая полоса усиления (доли %). Метровый диапазон волн нашел широкое применение в радиолокации для дальнего обнаружения целей.

Еще один тип магнетронных приборов – *ниготрон*, предложенный академиком П.Л. Капицей.

В конце 1940-х гг. П.Л. Капица обращается к совершенно иному кругу физических задач – к вопросу о создании мощных генераторов СВЧ колебаний непрерывного действия. Капице удалось решить сложную математическую задачу о движении электронов в СВЧ-генераторах магнетронного типа. На базе этих расчетов он конструирует СВЧ-генераторы нового типа – планотрон и ниготрон.

Мощность ниготрона составляла рекордную величину – 175 кВт в непрерывном режиме. В процессе изучения этих мощных генераторов Капица столкнулся с неожиданным явлением – при помещении колбы, наполненной гелием, в пучок излучаемых генератором электромагнитных волн в гелии возникал разряд с очень ярким свечением, а стенки кварцевой колбы плавилась.

Это навело Капицу на мысль, что, применяя мощные электромагнитные СВЧ колебания, можно нагреть плазму до огромных температур. Он присоединяет к ниготрону камеру, представляющую собой резонатор для СВЧ-колебаний. Наполняя эту камеру различными газами (гелий, водород, дейтерий) под давлением в 1-02 атм, Капица обнаружил, что в центре камеры (где интенсивность СВЧ-колебаний максимальная) в газе возникает шнуровой разряд.

Применяя различные методы диагностики плазмы, Капица показал, что температура электронов плазмы в этом разряде составляет около 1 млн градусов. Несколько позже эти исследования фактически открыли новый путь в решении задачи о создании термоядерного реактора, призванного, как считал академик, раз и навсегда решить все проблемы энергетики.

Любопытно, что своего первенца в области сверхмощных излучателей Капица остроумно назвал, используя два первых слога как аббревиатуру названия местности, где расположилась его «изба физпроблем», – Николина Гора.

Ниготрон представляет собой цилиндрический объемный резонатор, вдоль оси которого действует постоянное магнитное поле. Внутри этого резонатора расположены коаксиально катод и анод, причем каждый из них сделан в виде системы сегментов. Высокая добротность основного резонатора обеспечивает необходимую стабильность частоты колебаний. На дециметровых волнах при непрерывном режиме работы ниготрон может давать выходную мощность 100 кВт и даже более при КПД до 50%.

10.7 Релятивистские приборы

Специфика приборов СВЧ диапазона состоит в том, что длина пространства взаимодействия электронного потока с электромагнитными волнами в них больше или сравнима с длиной волны излучения.

Слаборелятивистская классическая СВЧ электроника успешно развивается с начала прошлого века. В слаборелятивистских приборах электронные пучки формируются в приборах термонакаливаемыми катодами, способными обеспечить плотности токов $1 \dots 10 \text{ А/см}^2$ при напряжении десятки киловольт. Это ограничивает максимальную мощность таких приборов.

С появлением в 1960-х гг. сильноточных электронных ускорителей прямого действия, позволяющих в режиме взрывной эмиссии формировать релятивистские электронные пучки с плотностью тока $10^3 \dots 10^6 \text{ А/см}^2$ и мощностью до

10^{13} Вт открылись перспективы существенного повышения импульсной мощности излучения в освоенных нерелятивистской электроникой диапазонах длин волн, а также создания ГП в более коротковолновых диапазонах.

Развитие релятивистской высокочастотной электроники показало, что в лабораторной практике могут эффективно использоваться малогабаритные сильноточные наносекундные электронные ускорители с невысоким энергозапасом – вплоть до единиц джоулей и энергией пучка до 300 кэВ. Начиная с 1980 г. для этих целей в ИСЭ СО РАН, а в дальнейшем – в ИЭФ УрО РАН, были разработаны ускорители.

Модель РАДАН-303 и СВЧ-приборы на ее основе были доведены от экспериментальных макетов до экспортных образцов, не имеющих мировых аналогов. Созданы релятивистские ЛОВ диапазона частот 37-140 ГГц с мультимегаваттным уровнем мощности, первый релятивистский черенковский усилитель миллиметрового диапазона, ЛОВ (70 ГГц) с фокусирующей системой на основе постоянных магнитов. Были созданы первые субнаносекундные источники широкополосных СВЧ-импульсов с мм-заполнением, работающие в режиме сверхизлучения, а также частотные генераторы мощных сверхширокополосных радиоимпульсов на основе антенных систем ударного возбуждения.

Современный этап работ по высоковольтной импульсной и ускорительной технике в интересах релятивистской высокочастотной электроники связан с применением новых наносундных твердотельных генераторов высоковольтных импульсов с индуктивными накопителями энергии и полупроводниковыми прерывателями тока, разработанных в лаборатории импульсной техники ИЭФ УрО РАН. Они отличаются естественной "твердотельной" стабильностью параметров, большим ресурсом, частотами повторения импульсов более 3 кГц при выходном напряжении в сотни киловольт на нагрузках в десятки-сотни Ом.

Унифицированный импульсный генератор РАДАН-303 Б представляет собой двойную формирующую линию (ДФЛ), заряжаемую трансформатором

Тесла и коммутируемую на нагрузку газовым разрядником. Напряжение пробоя регулируется от 10 до 200 кВ. Его стабильность типична для неуправляемых разрядников (дисперсия $\sim 5\%$). Прибор обеспечивает электронный импульс длительностью 5 нс и фронтом 1-1,5 нс. Импульсная мощность на согласованной 45-омной нагрузке составляет 0,8 ГВт. Нагрузкой могут служить электронные и рентгеновские трубки или коаксиальные магнитоизолированные вакуумные диоды со взрывоэмиссионными катодами (КДМИ). Для укорочения импульса ускоряющего напряжения до 200-300 пс используется дополнительное устройство, принцип действия которого основан на вырезании короткого импульса из более длинного с помощью обостряющего и срезающего разрядников. Установлено, что при частоте повторения импульсов 100 Гц полный разброс напряжения срабатывания разрядника-обострителя не превышал 5-6%. О стабильности генерируемых импульсов говорила сама возможность получения осциллограмм, накопленных за 500 импульсов цифровым стробоскопическим осциллографом.

С использованием опыта исследований субнаносекундных преобразователей было разработано индуктивно-емкостное звено с газовым разрядником, обеспечивающее дополнительную компрессию энергии наносекундно генератора РАДАН-3 03. При зарядке короткого емкостного накопителя в режиме бегущей волны получено увеличение выходного напряжения со 150 до 200 кВ, что соответствует увеличению мощности импульсов в 1,75 раза. Эффективность преобразования энергии достигает 80%.

В 1980-1990 гг. было создано несколько моделей релятивистских ЛОВ с сильноточными пучками с энергией от 150 до 200 кэВ. Генераторы МГ-1, МГ-2 и МГ-3, работавшие на длинах волн 8 и 4 мм (мода E_{01}) с частотой повторения импульсов 0,1-10 Гц, имели выходную пиковую мощность до 10 МВт. Электронный КПД удалось поднять до 10-15% с применением ускорителя на базе РАДАН-303 (250-300 кэВ), и для ЛОВ, работающей на частоте 35 ГГц (генера-

тор МГ-4), мощность составила 60 МВт. При длительности генерации 3-4 нс ЛОВ, работающей на частоте 70 ГГц, был получен поток СВЧ-энергии в замедляющей системе $\sim 0,5$ ГВт/см², а электрические поля на стенках одномодовой электродинамической структуры генератора МГ-6 составили ~ 2 МВ/см. Достижение таких высоких удельных параметров мы относим к результату увеличения электрической прочности электродинамического тракта при малом времени воздействия СВЧ-полей.

В настоящее время генераторы серии МГ-4 – МГ-6 – наиболее компактные релятивистские СВЧ приборы. Их частота повторения импульсов (до 10-40 Гц) обеспечивалась применением импульсных соленоидов с принудительным охлаждением. Компактный вакуумный диод генератора МГ-6 послужил прототипом для КДМИ релятивистской ЛОВ с фокусирующей системой на основе постоянных магнитов Nd-Fe-B. Магнитная система охватывала снаружи корпус диода. Это позволило сдвинуть реверс магнитного поля от катода к изолятору, а замедляющая система располагалась в однородном поле ~ 14 кЭ. Хотя в экспериментах не было достигнуто оптимальное превышение рабочего тока над стартовым, выходная мощность ЛОВ, работающей на частоте 70 ГГц, достигла 1 МВт, а частота повторения импульсов 100 Гц лимитировалась только ускорителем.

Релятивистские пролетные клистроны и усилители на их основе разрабатываются в мире с конца 1980-х гг. По традиционной классификации это так называемые СВЧ приборы О-типа. Приборы весьма похожи на классические пролетные клистроны. В них присутствуют все классические конструктивные признаки клистронов: электронная пушка, набор коаксиальных резонаторов, система вывода излучения, коллектор электронов и система ведущего магнитного поля. Однако принцип работы релятивистского клистрона отличается от классического. В классическом усилительном пролетном клистроне внешний СВЧ сигнала вводится в первый резонатор. Он задает модуляцию электронного

пучка по скорости, а затем в длинной трубе дрейфа электронный поток модулируется по плотности (группируется в сгустки). Группировка достигается за счет процессов, когда поздно стартовавшие, но ускоренные в области первого резонатора электроны, двигаясь в дрейфовом пространстве, догоняют ранее стартовавшие, но прошедшие зазор в тормозящей фазе СВЧ поля электроны. В этом случае реализуется кинематический принцип модуляции электронного пучка, являющийся основой работы классического пролетного клистрона.

Ситуация существенно меняется, если в клистроне использовать сильноточный электронный пучок. В этом случае на процесс модуляции электронного потока по плотности значительное влияние оказывает собственное электрическое поле объемного заряда пучка. Слабые высокочастотные колебания, возникающие, например, при возбуждении первого резонатора фронтом пучка или внешним СВЧ сигналом, нарушают равномерность продольной плотности тока. В результате появляется неоднородность распределения собственных электрических полей вдоль тракта проводки пучка. Это означает, что электроны в течение всего времени движения от катода к коллектору находятся в градиентном электрическом поле. То есть дрейфового пространства в таком приборе нет в принципе. Соответственно, группировка электронного пучка основана не на кинематическом, а на динамическом способе модуляции.

Главным достоинством релятивистского сильноточного клистрона является возможность значительного увеличения энергии и тока электронов пучка с целью повышения импульсной мощности генерируемого излучения. Кроме того, электродинамическая структура сильноточного клистрона за счет кратковременного взаимодействия пучка и СВЧ поля в зазоре резонаторов, а также изолированности его объема от электронов пучка позволяет реализовать большие напряженности электромагнитных полей в структуре без возникновения пробоев. Это позволяет формировать длинные импульсы с выходной мощностью до 500 МВт.

10.8 Вопросы электропитания электровакуумных СВЧ приборов

Как правило, электровакуумные СВЧ приборы работают в импульсном режиме. Для формирования выходных радиоимпульсов необходимо на соответствующие электроды СВЧ прибора подать высоковольтные импульсы напряжения. В частности, импульсную модуляцию в ЛБВ, как и в клистронах, осуществляют изменением напряжения на управляющем электроде (первом аноде) и катоде.

Рассмотрим для примера организацию электропитания типового пролетного клистрона с модуляцией по управляющему электроду (сетке). Соответствующая структурная схема системы электропитания приведена на рисунке 10.11.

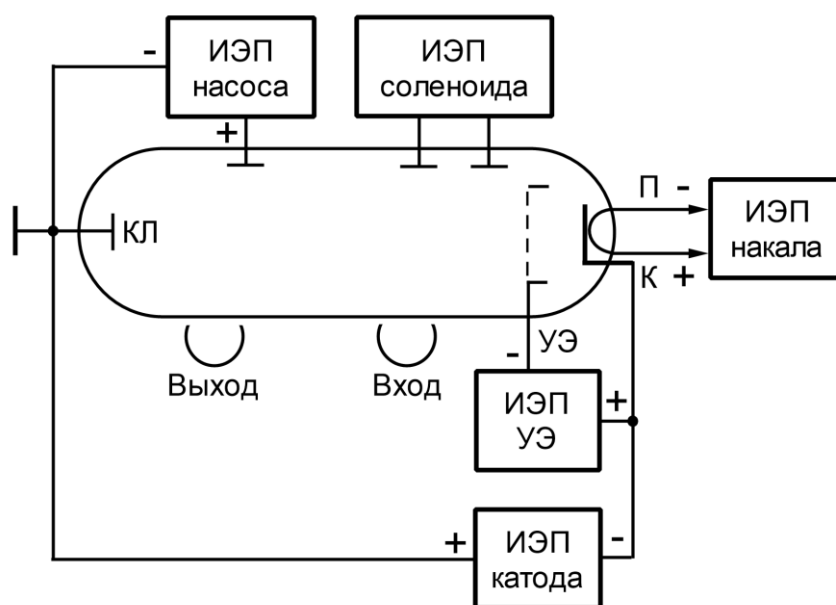


Рисунок 10.11 – Структурная схема системы электропитания клистрона

ИЭП – источник электропитания; КЛ – коллектор; К – катод; УЭ – управляющий электрод;
П – подогреватель

Для функционирования клистрона необходимо подать напряжения на катод K , нить накала (подогревателя) $П$, фокусирующий соленоид, устройство откачки (насос), а также управляющий электрод $УЭ$. Типовые напряжения электропитания для ИЭП устройства откачки составляют единицы киловольт, ИЭП

соленоида – десятки вольт, ИЭП накала – единицы вольт, ИЭП катода – десятки киловольт.

Особенностью системы электропитания клистрона является то, что в большинстве случаев анод (коллектор) клистрона гальванически связан с его корпусом. В этом случае ускоряющее напряжение, прикладываемое к катоду клистрона, должно иметь отрицательную полярность.

Структурная схема системы электропитания ЛБВ приведена на рисунке 10.12. В отличие от клистрона, в ЛБВ используют замедляющую систему ЗС с потенциалом корпуса. Напряжение на катоде часто называют напряжением спирали, ускоряющим напряжением или напряжением замедляющей системы.

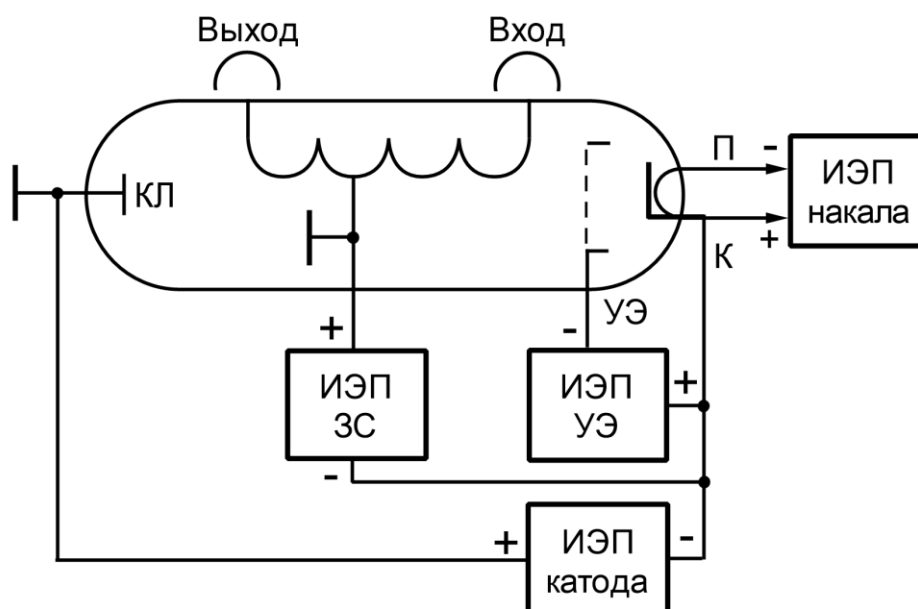


Рисунок 10.12 – Структурная схема системы электропитания ЛБВ

ИЭП – источник электропитания; КЛ – коллектор; К – катод; УЭ – управляющий электрод;
ЗС – замедляющая система; П – подогреватель

Типовой импульсный модулятор (ИМ) электровакуумного СВЧ прибора включает в себя высоковольтный коммутатор и накопитель. В настоящее время в РЛС преимущественно используют ИМ с частичным разрядом емкостного накопителя. При прочих равных условиях они обладают меньшими массой и

габаритами, позволяют формировать модулирующие импульсы с более высокой прямоугольностью, удобны при конструировании.

На протяжении всей второй половины XX века в радиолокационных ИМ в качестве коммутаторов использовали преимущественно модуляторные лампы типа ГМИ. Однако в настоящее время их практическое использование сопряжено со следующими трудностями:

- отсутствие малогабаритных высоковольтных модуляторных ламп, способных формировать импульсы длительностью от 50 нс при напряжении 6...30 кВ и токах до нескольких десятков ампер и обеспечивающих высокую надёжность;

- большие потери на зарядном резисторе и, как следствие, снижение КПД ИМ;

- отсутствие возможности использовать полупроводниковые кремниевые диоды в цепи формирования заднего фронта импульса из-за наличия чрезвычайно больших потерь, связанных с процессом обратного восстановления. Применение же электровакуумных диодов резко снижает ресурс работы ИМ, увеличивает его массу и габариты;

- в открытом состоянии падение напряжения на модуляторных лампах слишком велико, что обусловлено их высоким внутренним сопротивлением (100...1000 Ом);

- из-за пологой проходной характеристики этих ламп необходимо формировать импульсы управляющего напряжения с амплитудой порядка 1000 В.

С появлением высоковольтных транзисторов (сначала биполярных, а затем МОП и БТИЗ) от модуляторных ламп отказались. Использование транзисторов позволяет значительно повысить надёжность, добиться ранее недостижимых характеристик ИМ с рабочими напряжениями до сотен киловольт и импульсными токами до нескольких сотен ампер, а также обеспечить работу при оперативном (от импульса к импульсу) изменении временных параметров фор-

мируемых импульсов и их последовательностей. При этом длительности переднего и заднего фронтов импульсов в отдельных случаях могут не превышать 25 нс.

При использовании транзисторных коммутаторов в схемах ИМ с частичным разрядом накопительной емкости модулирующие импульсы имеют почти идеальную прямоугольную форму и обладают высокой повторяемостью.

Рассмотрим далее классическую схему ИМ с частичным разрядом накопительной емкости, в котором вместо модуляторной лампы использован высоковольтный биполярный транзистор (рисунок 10.13). Работу схемы можно представить следующим образом.

В начальный момент времени коммутатор – высоковольтный биполярный транзистор VT – закрыт за счет отрицательного напряжения $U_{упр}$, поданного на базу. Поэтому от источника входного напряжения $U_{вх}$ через резистор R_1 идет заряд накопительного конденсатора C (рисунок 10.14а) по экспоненциальному закону:

$$u_C = U_{вх} \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_3} \right) \right),$$

где $\tau_3 = (R_1 + R_2)C$ – постоянная времени цепи заряда.

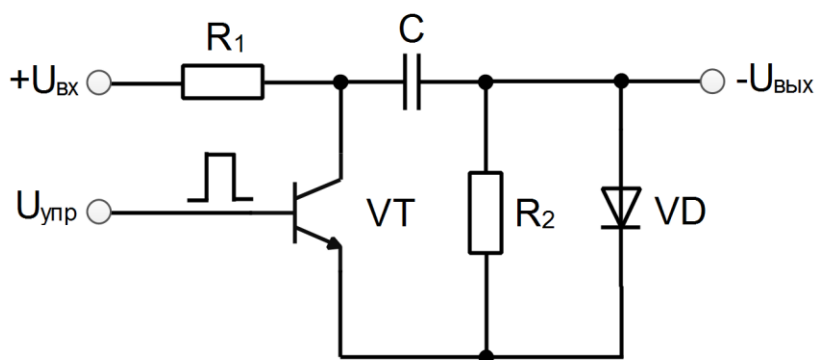


Рисунок 10.13 – Схема модулятора с емкостным накопителем и транзистором в качестве коммутатора

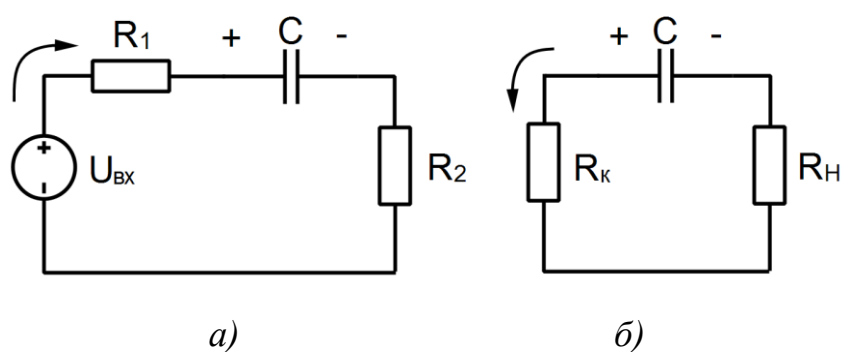


Рисунок 10.14 – Эквивалентная схема модулятора на интервалах заряда (а) и разряда (б) накопителя

По истечении времени T – периода повторения модулирующих импульсов – приходит импульс $U_{упр}$ положительной полярности, открывающий транзистор VT , вследствие чего к нагрузке прикладывается напряжение $U_{вх}$, до которого успел зарядиться конденсатор C (падением напряжения на резисторах пренебрежем). Начинается разряд конденсатора через транзистор VT и нагрузку (рисунок 10.14б) по закону:

$$u_C = U_{вх} \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right),$$

где $\tau_p = (R_k + R_H)C$ – постоянная времени цепи разряда, а R_k и R_H – сопротивление транзистора в открытом состоянии и нагрузки по постоянному току соответственно.

Время разряда определяется длительностью модулирующего импульса t_u , после чего транзистор VT закрывается – и вновь повторяется заряд конденсатора C . Осциллограммы, отображающие описанный процесс заряда и разряда конденсатора, приведены на рисунке 10.15а.

Постоянную времени цепи заряда τ_z определим из условия: за время $T - t_u$ конденсатор должен успеть зарядиться до напряжения $U_{вх}$. Для его выполнения достаточно иметь $T/\tau_z \geq 3$.

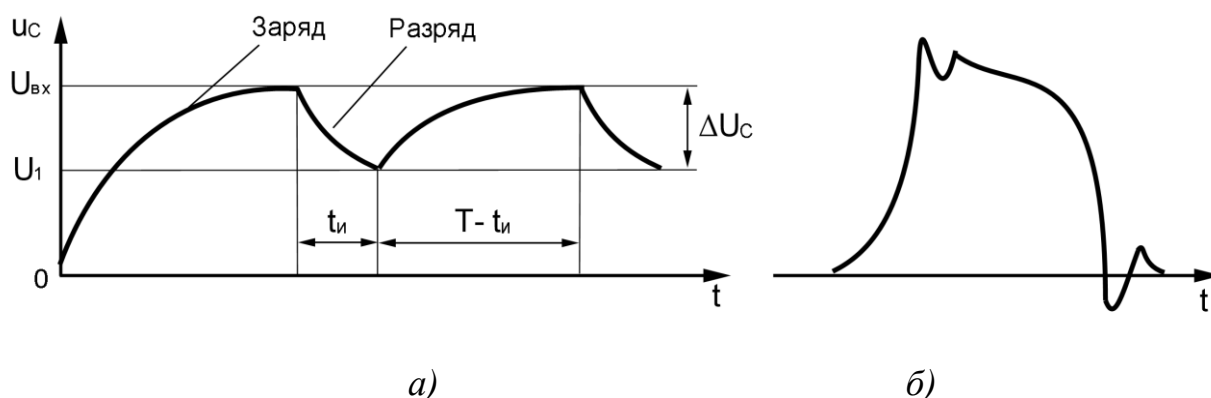


Рисунок 10.15 – Осциллограммы процесса заряда и разряда накопителя (а) и форма модулирующего импульса напряжения (б)

Постоянную времени цепи разряда τ_p определим из условия: за время t_u напряжение на конденсаторе должно уменьшиться не более чем на $\Delta U_C = U_{вх} - U_1$ (рисунок 10.15а). При $\Delta U_C / U_{вх} < 1$ получим:

$$\tau_p = t_u \frac{U_{вх}}{\Delta U_C}. \quad (10.4)$$

Поскольку в ИМ осуществляется коммутация больших значений токов, то при переключении транзистора возникает переходный колебательный процесс (рисунок 10.15б). Для его ослабления в схему (рисунок 10.13) включают диод VD, гасящий возникающие колебания.

КПД модулятора определяется как отношение энергии E_C , отдаваемой конденсатором во время разряда, к энергии $E_C + E_R$, идущей на заряд конденсатора, где E_R – энергия, расходуемая в сопротивлениях:

$$\eta = \frac{E_C}{E_C + E_R} = 1 - \frac{\Delta U_C}{2U_{вх}} = 1 - \frac{t_u}{2\tau_p}. \quad (10.5)$$

Пример. Пусть длительность модулирующих импульсов составляет $t_u = 1$ мкс, период повторения $T = 1$ мс, сопротивления открытого транзистора и нагрузки $R_k = 2$ Ом и $R_H = 100$ Ом соответственно, а допустимый скос напряжения $\Delta U_C / U_{вх} = 0,05$.

Согласно (10.4) для постоянной времени цепи разряда получим: $\tau_p = 1/0,05 = 20$ мкс. Емкость $C = \tau_p / (R_k + R_H) = 20 \cdot 10^{-6} / 102 = 0,2$ мкФ. Постоянная времени цепи заряда $\tau_p = 0,2T = 200$ мкс. Сопротивления $R_1 + R_2 = \tau_3 / C = 0,2 \cdot 10^{-3} / 0,2 \cdot 10^{-6} = 1$ кОм. Согласно (10.5) КПД модулятора составляет 97,5%.

Вместе с тем полупроводниковые коммутирующие приборы сравнительно низковольтны (рабочие напряжения достигают 2...3 кВ), а напряжения электропитания электровакуумных СВЧ приборов имеют значения 1...100 кВ, поэтому, как правило, одиночные приборы для коммутации таких напряжений не используют.

На практике для обеспечения требуемых значений рабочих напряжений высоковольтные коммутаторы строят из большого количества транзисторов, соединенных последовательно (составные коммутаторы). Составные коммутаторы способны работать с высокими напряжениями, величина коммутируемого тока и быстродействие определяются используемыми транзисторами. Возможно также последовательно-параллельное соединение нескольких транзисторов.

Вариант функциональной схемы модуля ИМ с последовательно включенными БТИЗ (*series switch topology*) приведен на рисунке 10.16.

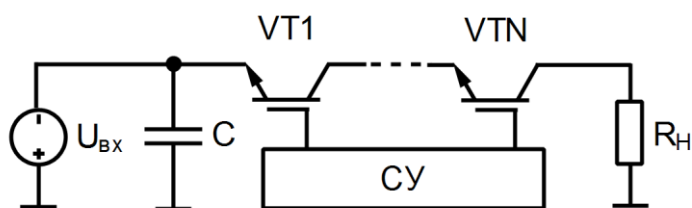


Рисунок 10.16 – Функциональная схема модуля ИМ с составным коммутатором
СУ – схема управления

Источник высоковольтного напряжения $U_{вх}$ заряжает накопительный конденсатор C . Под действием управляющих импульсов схемы управления $СУ$ одновременно открываются транзисторы $VT1 \dots VTN$. Длительности переднего и

заднего фронтов модулирующего импульса в нагрузке R_H определяются коммутационными характеристиками транзисторов.

Описанный модуль ИМ, построенный с применением современной элементной базы, позволяет коммутировать напряжения до 9 кВ с током до 30 А. Максимальная частота повторения импульсов может достигать 40 кГц, при этом их минимальная длительность составляет 1 мкс. Длительность фронта формируемого импульса не превышает 100-500 нс.

На базе рассматриваемых модулей путём последовательного или параллельного соединения строят сборки анодных или сеточных ИМ на требуемые напряжение и ток. В результате возможно получение рабочих напряжений ИМ до 150 кВ и токов до 5000 А.

Достижение высоких рабочих напряжений возможно также за счет применения трансформаторов. Один из вариантов схемы ИМ с трансформатором (adder topology) приведен на рисунке 10.17. U_C на схеме – напряжение на накопительных конденсаторах $C1-C4$ одинаковой емкости.

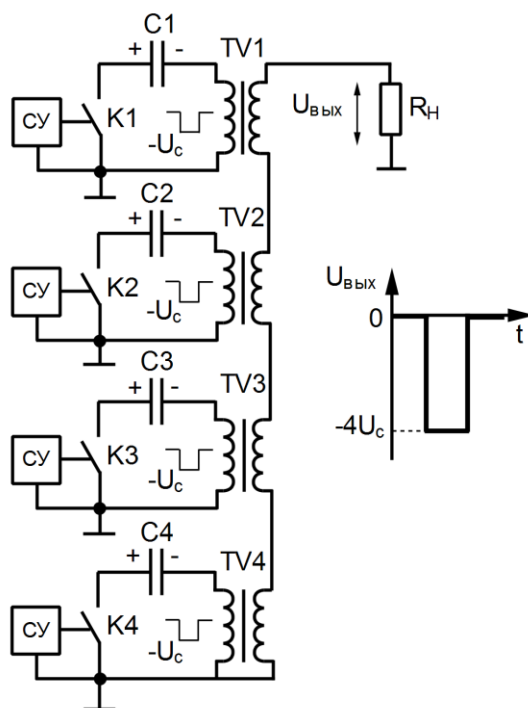


Рисунок 10.17 – Функциональная схема ИМ с трансформаторами

СУ – схема управления

В схеме вторичные обмотки импульсных трансформаторов $TV1-TV4$ (коэффициенты трансформации равны единице) соединены последовательно. Поэтому напряжение в нагрузке R_H равно сумме напряжений на каждой первичной обмотке (то есть $4U_C$). В качестве коммутаторов $K1-K4$ используют включенные последовательно транзисторы.

Однако при использовании ИМ, построенных на составных коммутаторах, приходится сталкиваться с рядом трудностей:

- из-за наличия паразитных параметров элементов схемы возможно появление разброса напряжений, прикладываемых к отдельным транзисторам, что приводит к появлению перенапряжений на них;

- необходимо обеспечить синхронность переключения всех транзисторов, а также гальваническую изоляцию управляющего сигнала от схемы управления.

Упрощённая схема двухтактного ИМ с МОП-транзисторами в качестве коммутаторов приведена на рисунке 10.18. С приходом на затвор транзистора $VT2$ положительного импульса, вырабатываемого в схеме управления CU , он открывается и подключает заряженный накопительный конденсатор C к нагрузке. Одновременно на затвор транзистора $VT1$ подаётся импульс отрицательной полярности, надёжно запирающий его. Время, в течение которого к нагрузке приложено напряжение, определяется длительностью управляющего импульса $U_{упр}$.

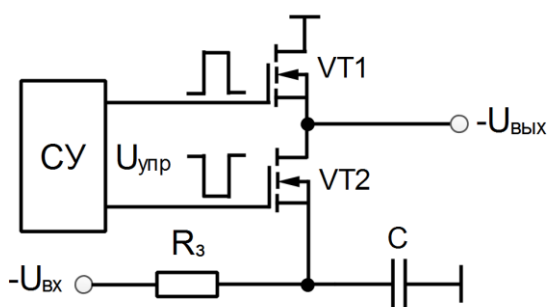


Рисунок 10.18 – Упрощённая схема двухтактного высоковольтного ИМ

CU – схема управления

Через временной интервал, равный длительности модулирующего импульса напряжения, приложенного к нагрузке, полярность напряжения на затворах транзисторов $VT2$ и $VT1$ меняется на противоположную, что вызывает их переключение. При этом $VT2$ закрывается, отключая накопительный конденсатор C от нагрузки, а $VT1$ открывается и шунтирует нагрузку своим внутренним сопротивлением, разряжая тем самым ее паразитную ёмкость и формируя задний фронт модулирующего импульса.

Скорость нарастания модулирующего импульса в нагрузке определяется временем включения транзистора $VT2$, величиной паразитной емкости нагрузки и монтажа, а также крутизной ВАХ транзистора.

Скорость спада заднего фронта модулирующего импульса в нагрузке определяется двумя составляющими: временем выключения транзистора $VT2$ и временем разряда паразитной емкости нагрузки через сопротивление открытого транзистора $VT1$.

Как было показано ранее, импульсная модуляция производится изменением напряжения либо на управляющем электроде (сеточная), либо на аноде (анодная) электровакуумного СВЧ прибора. Рассмотрим два этих способа модуляции более подробно.

1. Сеточная модуляция

При сеточной модуляции ускоряющее напряжение прикладывают между катодом и коллектором (резонаторами) непрерывно. На вход электровакуумного СВЧ прибора так же непрерывно подают СВЧ колебания, а модуляцию электронного потока осуществляют за счет изменения напряжения на управляющем электроде.

В паузах между импульсами к управляющему электроду с выхода ИМ прикладывают отрицательное относительно катода напряжение смещения $U_{см}$, запирающее СВЧ прибор. Во время импульса на управляющий электрод отно-

сительно катода подают небольшое положительное напряжение превышения U_{np} – и отпирают его.

Основными преимуществами сеточных ИМ по сравнению с анодными являются:

- малые потери, имеющие только динамический характер (заряд и разряд паразитных емкостей), что обусловлено относительно малой амплитудой напряжения на управляющем электроде (обычно 10...20% от ускоряющего напряжения);

- высокая стабильность амплитуды формируемых импульсов;

- возможность работы в более широком диапазоне временных параметров импульсов;

- возможность получения высоких значений частот повторения импульсов (до 1 МГц) из-за того, что ток в цепи управляющего электрода во время импульсов и в паузах между ними сравнительно небольшой (порядка единиц миллиампер);

- относительная простота реализации;

- меньшие масса и габаритные размеры;

- низкая стоимость.

Основной недостаток сеточной модуляции – более высокая вероятность возникновения пробоев межэлектродных промежутков электровакуумного СВЧ прибора из-за непрерывной подачи высокого напряжения электропитания между катодом и коллектором (резонаторами).

Для защиты электровакуумного СВЧ прибора от последствий пробоев применяют специальные защитные коммутаторы, включаемые последовательно с нагрузкой. В штатном режиме защитный коммутатор находится в замкнутом состоянии. При возникновении пробоя в СВЧ приборе защитный коммутатор размыкается, прерывая протекание тока разряда через прибор. Таким образом, использование защитных коммутаторов для электровакуумных СВЧ приборов с

сеточным управлением уменьшает энергию, выделяемую в этих приборах при пробоях, и, следовательно, увеличивает срок их службы.

Классическая схема организации сеточной модуляции приведена на рисунке 10.19.

Электроракуумный СВЧ прибор (клизтрон или ЛБВ) открывается при подаче на управляющий электрод (сетку) импульса напряжения, равного сумме напряжений с выхода импульсного трансформатора TV и источника смещения $U_{см}$. В отсутствии импульса напряжения на выходе трансформатора TV (коммутатор K разомкнут) на управляющем электроде действует напряжения источника смещения $U_{см}$ – и СВЧ прибор заперт.

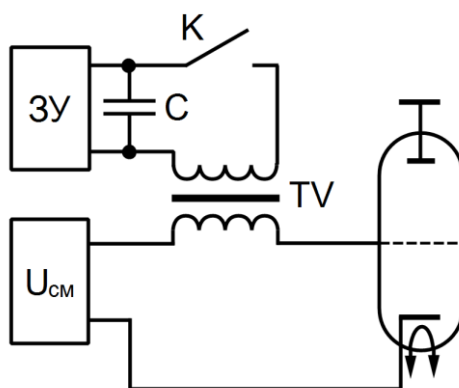


Рисунок 10.19 – Схема организации сеточной модуляции

ЗУ – зарядное устройство; $U_{см}$ – источник напряжения смещения

Основной недостаток такой схемы – сложность исполнения импульсного трансформатора TV . Данный трансформатор является высокопотенциальным, следовательно, его паразитные параметры достаточно велики, что приводит к искажению формы модулирующего импульса. Если диапазон изменения длительностей импульсов довольно широк (длительности импульсов отличаются в 10 и более раз), то искажения на границах этого диапазона становятся недопустимыми. Разработать трансформатор на широкий диапазон длительностей импульсов практически невозможно.

На рисунке 10.20 приведен вариант функциональной схемы сеточного ИМ, обеспечивающего широкий диапазон изменения временных параметров модулирующего импульса.

В составе модулятора можно выделить часть, находящуюся под высоким потенциалом (потенциал катода составляет около 30 кВ), в которую входят высоковольтные коммутаторы $K1$ и $K2$, и часть, находящуюся на уровне земли – подмодулятор $ПМ$, который управляет высоковольтными коммутаторами $K1$ и $K2$ через импульсный высокопотенциальный трансформатор $ИТ$, обеспечивающий развязку по высокому напряжению разных составных частей модулятора. Коммутатор $K2$ закрывает СВЧ прибор и подключен к источнику смещения $U_{см}$, а $K1$ открывает – и подключен к источнику превышения $U_{пр}$.

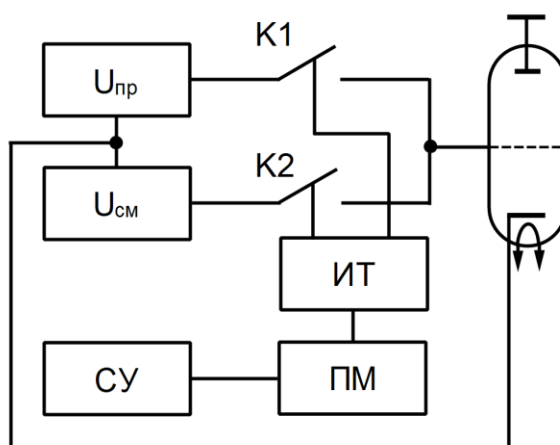


Рисунок 10.20 – Функциональная схема сеточного ИМ

$U_{пр}$ – источник напряжения превышения; $U_{см}$ – источник напряжения смещения;

СУ – схема управления; ПМ – подмодулятор; ИТ – импульсный трансформатор

Схема соединения импульсного трансформатора $ИТ$ с высоковольтными коммутаторами $K1$ и $K2$ приведена на рисунке 10.21а. В качестве коммутаторов $K1$ и $K2$ используется последовательное соединение высоковольтных МОП-транзисторов ($VT1...VTN$), производящих под управлением драйверов $Д$ коммутацию напряжения смещения $U_{см}$ (до минус 10 кВ относительно потенциала ка-

тода клистрона), либо коммутацию потенциала катода U_K на управляющий электрод клистрона. U_M в схеме – напряжение на выходе модулятора.

Импульсный высокопотенциальный трансформатор $TV1$ имеет одну первичную обмотку и множество вторичных обмоток, необходимых для управления сразу всеми высоковольтными транзисторами. Однако конструкция такого трансформатора является сложной для исполнения, так как должно выполняться жесткое условие обеспечения идентичности электрических параметров вторичных обмоток.

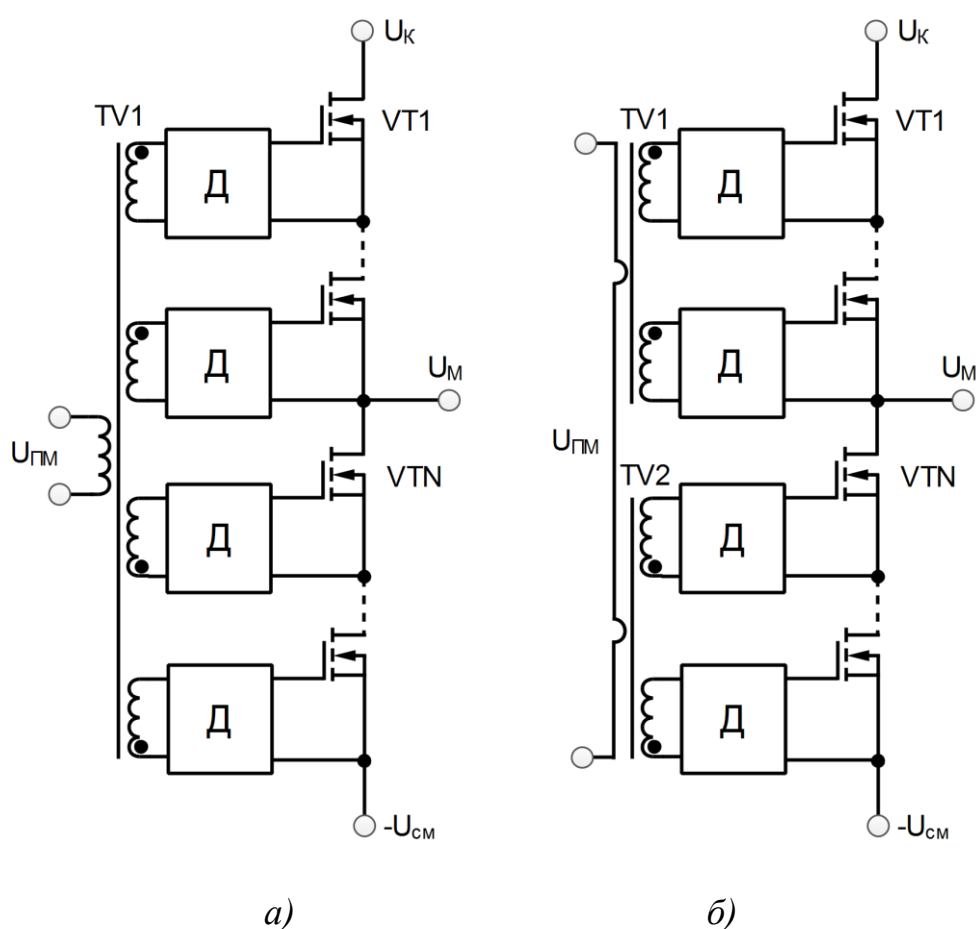


Рисунок 10.21 – Схемы соединения трансформаторов с коммутирующими транзисторами: вариант с одним (а) и несколькими (б) трансформаторами

$U_{ПМ}$ – напряжение на выходе подмодулятора; U_K – напряжение электропитания катода;

$U_{см}$ – напряжение смещения; U_M – напряжение на управляющем электроде (сетке);

Д – драйвер

Для преодоления указанного недостатка заменяют один сложный трансформатор на множество простых, одинаковых импульсных токовых трансформаторов. Соответствующая схема соединения представлена на рисунке 10.21б.

Трансформаторы $TV1-TV2$ представляют собой элемент конструкции сетевого модулятора, состоящий из кольцевого сердечника с намотанными на него двумя вторичными обмотками, которые подключают к высоковольтным транзисторным ячейкам, и высоковольтного провода, выполняющего роль первичной обмотки токового трансформатора. Провод пропущен через сердечник токового трансформатора в прямом направлении, прилегая к внутренней поверхности сердечника, и в обратном направлении, прилегая к внешней поверхности сердечника, тем самым, образуя один виток первичной обмотки трансформатора.

Все импульсные токовые трансформаторы размещены на одном высоковольтном проводе, проходящем последовательно через все сердечники, что позволяет обеспечивать синхронность и идентичность наведения импульсов во вторичных обмотках токовых трансформаторов по времени, необходимых для управления высоковольтными транзисторами.

Применение одинаковых импульсных токовых трансформаторов, объединенных одним высоковольтным проводом, выполняющим функцию единой первичной обмотки трансформаторов, также позволяет развязать высоковольтную часть сетевого модулятора от схем управления СУ, при этом управление модулятором может осуществляться сигналами TTL уровня.

Для примера, на рисунке 10.22 приведена функциональная схема системы электропитания ЛБВ с сеточной модуляцией и параллельным включением ИЭП ускоряющего напряжения (замедляющей системы) и коллектора. Здесь оба ИЭП работают независимо. При этом жесткие требования по стабильности предъявляют только к ускоряющему напряжению, так как это напряжение определяет скорость электронов в потоке и, как следствие, в большей степени

влияет на фазу усиливаемых СВЧ колебаний. ИЭП коллектора, в свою очередь, может работать со значительными изменениями напряжения. В этом случае становится возможным уменьшить емкость и, как следствие, массу и габариты накопительного конденсатора $C_{кол}$.

Управление ЛБВ в схеме происходит путём подачи на управляющий электрод либо отрицательного запирающего напряжения смещения $U_{см}$, либо положительного открывающего напряжения превышения $U_{пр}$. При этом жестко формируются передний и задний фронты модулирующего импульса.

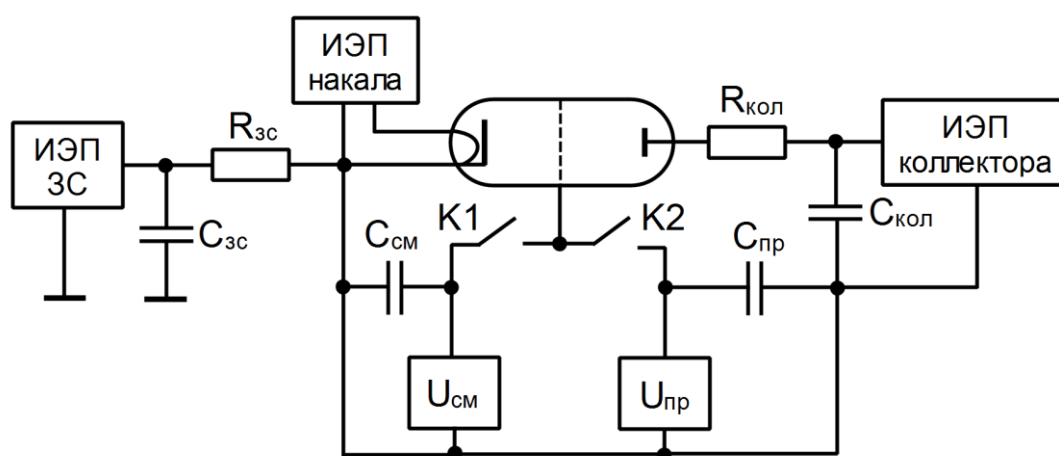


Рисунок 10.22 – Функциональная схема системы электропитания ЛБВ с сеточной модуляцией и с параллельным включением ИЭП

ИЭП – источник электропитания; 3С – замедляющая система; $U_{пр}$ – источник напряжения превышения; $U_{см}$ – источник напряжения смещения;

Рабочие напряжения сеточных ИМ обычно составляют 1-5 кВ, что позволяет получить частоты повторения импульсов вплоть до 1 МГц при минимальной длительности импульса в 40 нс. Длительности фронта и спада при этом не превышают 25 нс.

Применение ПУ, построенных на базе ЛБВ с твердотельными сеточными ИМ, способными формировать наносекундные импульсы, позволяет значительно увеличить разрешающую способность РЛС по дальности и увеличить число одновременно обрабатываемых целей.

Недостатком модуляторов такого типа является наличие двух коммутаторов, в свою очередь имеющих такой недостаток, как неравномерное распределение напряжения по цепи последовательно соединенных транзисторов, снижающее надежность модулятора, а также наличие паразитных емкостей. Кроме того, модулятор имеет сложную схему управления транзисторами, что дополнительно снижает его надежность.

II. Анодная модуляция

При анодной импульсной модуляции высокое напряжение на коллектор (или резонатор) электровакуумного СВЧ прибора подают только в момент усиления радиоимпульса.

К недостаткам анодной модуляции следует отнести большую мощность ИМ по сравнению с сеточным. Схема ИМ становится более сложной, резко возрастают его габариты и масса.

Электронные пушки ЛБВ для анодной импульсной модуляции не требуют внешних питающих напряжений. Эти пушки строят по схеме Пирса и фокусирующие электроды внутри лампы соединяются с катодом. Для работы таких приборов необходимо напряжение накала и ускоряющее напряжение.

Отметим, однако, что при осуществлении анодной модуляции ЛБВ возможно появление эффекта «заячьих ушей» – явления, когда в отсутствии СВЧ колебаний на входе прибора при нарастании или спаде ускоряющего напряжения на входе и выходе прибора появляются СВЧ колебания с мощностью, соизмеримой с рабочей выходной.

Очевидно, в РЛС появление мощных паразитных колебаний на выходе РПДУ недопустимо. Поэтому в ЛБВ использование анодной модуляции мало предпочтительно – и от нее отказываются в пользу сеточной.

Отметим также, что статическое сопротивление клистронов и ЛБВ в рабочей точке, как правило, велико и составляет для однолучевых приборов

1...100 кОм, для многолучевых – 200...1000 Ом, при этом усиление СВЧ колебаний в этих приборах происходит при любых ускоряющих напряжениях.

Использование одноктактных схем анодной модуляции в этом случае оказывается недопустимым, так как при приемлемых значениях длительности заднего фронта модулирующего импульса величина разрядного резистора оказывается соизмеримой с сопротивлением СВЧ прибора, что увеличивает рассеиваемую в этом резисторе мощность и значительно снижает КПД всей системы. Для исключения затягивания заднего фронта модулирующего импульса необходимо жестко фиксировать его тыл дополнительным высоковольтным коммутатором, шунтирующим СВЧ прибор во время пауз между импульсами.

На рисунке 10.23 приведена типовая функциональная схема системы электропитания СВЧ прибора с двухтактным анодным модулятором.

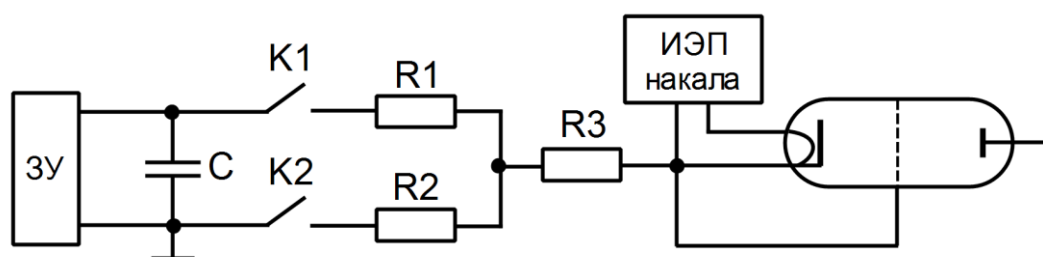


Рисунок 10.23 – Система электропитания ЛБВ с анодной модуляцией

ЗУ – зарядное устройство; ИЭП – источник электропитания

ЗУ заряжает накопительный конденсатор C . В отсутствии внешних управляющих импульсов разрядный коммутатор $K2$ находится в замкнутом состоянии и шунтирует СВЧ прибор. При этом катод находится под потенциалом корпуса. При появлении управляющего импульса запуска разрядный коммутатор $K2$ размыкается и, спустя небольшой интервал времени, замыкается зарядный коммутатор $K1$ – так формируются передний фронт модулирующего импульса и его плоская вершина. Пауза между выключением одного коммутатора и включением другого необходима для исключения протекания сквозных токов между коммутаторами. Резисторы $R1$ и $R2$ включены в схему для ограничения

токов перезаряда паразитных емкостей коммутаторов. Резисторы $R1$ и $R3$ ограничивают ток и энергию, выделяемую в СВЧ приборе во время пробоя.

Как видно из схемы на рисунке 10.23, анодную модуляцию клистрона осуществляют одним мощным ЗУ, работающим на один накопитель большой емкости C , а резонатор и коллектор имеют потенциал корпуса. Соответственно увеличение длительности модулирующих импульсов при заданном допустимом падении напряжения промежутка катод-резонаторы, обусловленном требованиями к сколу зондирующего радиоимпульса, осуществляют путём повышения емкости накопителя C . Однако при базировании РЛС на летательных аппаратах такой подход имеет существенное ограничение, так как с емкостью накопителя увеличиваются его масса и габариты.

Другим подходом является раздельное электропитание катода и коллектора при заземлении резонатора. Функциональная схема системы высоковольтного электропитания клистрона в этом случае будет иметь вид, приведенный на рисунке 10.24.

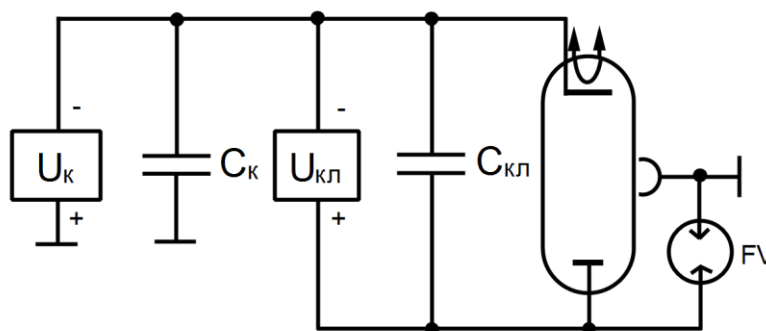


Рисунок 10.24 – Функциональная схема системы электропитания клистрона

U_k – источник напряжения катода; $U_{кл}$ – источник напряжения коллектора

Указанное техническое решение позволяет уменьшить общую емкость накопителя. Так как последняя при заданной длительности модулирующего импульса определяется допустимым падением напряжения промежутка катод-резонатор ΔU_{pz} и током катода I_k , 85-90% которого течет через коллектор, на практике общий накопитель делят на два. Один из них, C_k , поддерживает на до-

пустимом уровне падение напряжения промежутка катод-резонатор при относительно малом токе $I_{pz} = (0,01...0,15)I_k$; второй, $C_{кл}$, поддерживает напряжение промежутка катод-коллектор $\Delta U_{кл}$ выше, чем промежутка катод-резонатор, при большем токе $I_{кл} = (0,85...0,9)I_k$.

Для заряда соответствующих емкостей накопительных конденсаторов используют два высоковольтных ИЭП – U_k и $U_{кл}$. Падение напряжения на накопителе $C_{кл}$ может быть достаточно большим, единственным условием является поддержание положительного потенциала коллектора относительно резонатора, так как в противном случае существенно возрастёт ток резонаторов, что выведет из строя лучевую систему клистрона. Для защиты в случае пробоя клистрона используют газовый разрядник FV .

Пример. Пусть клистрон усиливает радиоимпульс с длительностью $t_u = 100$ мкс. Ток катода составляет $I_k = 50$ А, напряжение электропитания катода $U_k = -27$ кВ. Допустимое падение напряжения промежутка катод-резонатор ΔU_{pz} составляет 1%. Чему равен выигрыш в величине емкости накопителей при использовании системы электропитания по схеме на рисунке 4.17?

Ёмкость накопителя при электропитании клистрона по схеме на рисунке 4.16 составит:

$$C_k = \frac{I_k t_u}{\Delta U_{pz}} = \frac{50 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{27 \cdot 10^3 \cdot 0,01} = 18,5 \text{ мкФ.}$$

В случае высоковольтного электропитания по схеме, приведенной на рисунке 10.23, ёмкость цепи катод-резонатор C_k составит:

$$C_k = \frac{I_{pz} t_u}{\Delta U_{pz}} = \frac{5 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{27 \cdot 10^3 \cdot 0,01} = 1,85 \text{ мкФ.}$$

Возьмём ёмкость промежутка катод-коллектор $C_{кл}$ такую же, как промежутка катод-резонатор, то есть 1,85 мкФ. Тогда падение напряжения промежутка катод-коллектор составит:

$$\Delta U_{кл} = \frac{I_{кл} t_u}{C_{кл}} = \frac{45 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{1,85 \cdot 10^{-6}} = 2430 \text{ В,}$$

то есть с запасом напряжение промежутка катод-коллектор должно быть 29,5 кВ.

Общая емкость накопителей составит 3,7 мкФ, что в 5 раз меньше, чем в случае высоковольтного электропитания по схеме, представленной на рисунке 10.23. В рассмотренном случае выигрыш по массе конденсаторов, при использовании, например, К75-93, составляет более 100 кг. Также за счёт снижения емкости, соответственно и запасаемой энергии, облегчается режим работы системы перехвата энергии при пробое клистрона, следовательно, повышается срок его службы.

Однако схема на рисунке 10.24 не лишена и недостатков. Так, для её реализации требуется дополнительный ИЭП, а также несколько снижается общий КПД системы электропитания.

10.9 Структура РПДУ с электровакуумными СВЧ приборами

При составлении структурной схемы РПДУ с электровакуумным СВЧ прибором следует руководствоваться следующими правилами:

- между приборами необходимо включать ферритовые однонаправленные устройства (вентили и циркуляторы) для обеспечения электрической устойчивости;
- выходной сигнал РПДУ надо пропустить через полосовой фильтр с целью уменьшения побочных излучений и доведения их до требуемой нормы;
- с помощью устройств автоматического регулирования необходимо стабилизировать основные параметры РПДУ;
- непрерывно контролировать режимы работы всех каскадов и, в первую очередь, выходную мощность РПДУ;
- необходимо предусмотреть электронную защиту, снимающую напряжение электропитания с РПДУ при нарушении нормального режима эксплуатации электронных приборов или возникновении любых внештатных ситуаций;
- рекомендуется применять систему принудительного охлаждения для соблюдения температурного режима работы электровакуумных СВЧ приборов;
- все высоковольтные цепи должны быть выполнены с соблюдением норм по технике безопасности;

- радиопередатчик в целом должен быть экранирован для соблюдения норм по СВЧ излучению.

Покажем на конкретном примере, каким образом составляют структурную схему РПДУ с электровакуумными СВЧ приборами.

Исходные данные: частота 4 ГГц, импульсная мощность излучения $P_{\text{вых}} = 10$ кВт, ширина спектра излучаемого сигнала 200 МГц, мощность входного сигнала от возбуждителя: $P_{\text{вх}} = 0,1$ Вт.

Определяем общий коэффициент усиления:

$$K_P = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \right) = 10 \lg \left(\frac{10^4}{0,1} \right) = 50 \text{ дБ}.$$

С учетом требуемой полосы пропускания в 5% выбираем цепочку из двух приборов: ЛБВ с коэффициентом усиления $K_{\text{ЛБВ}} = 40$ дБ и амплитрон с коэффициентом усиления $K_{\text{ампл}} = 16$ дБ. Составляем структурную схему РПДУ (рисунок 10.25).

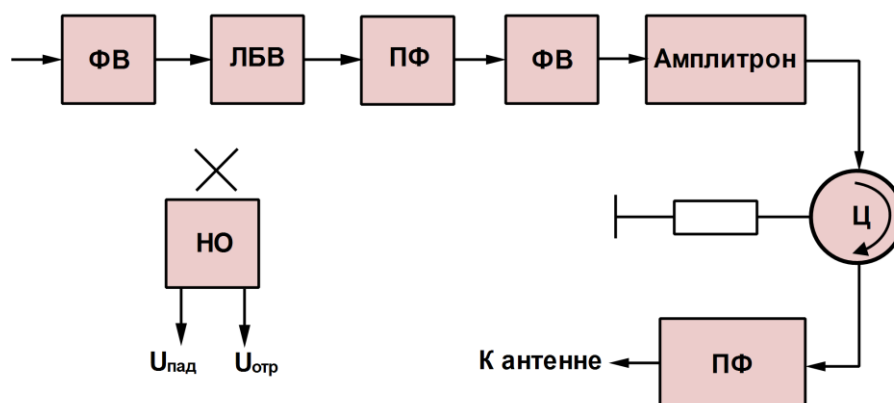


Рисунок 10.25 – Структура РПДУ

На схеме приняты следующие сокращения: ΦB – ферритовый вентиль, HO – направленный ответвитель, $ПФ$ – полосовой фильтр, $Ц$ – циркулятор. С помощью HO в выходном тракте РПДУ контролируют уровень падающей и отраженной мощности. На входе и между приборами включают ферритовый вентиль ΦB , на выходе – циркулятор $Ц$. Между приборами и на выходе РПДУ

включают полосовой фильтр *ПФ*. Общий коэффициент усиления РПДУ составляет

$$K_P = K_{ЛБВ} + K_{ампл} - K_{пот} = 40 + 16 - 5 = 51 \text{ дБ},$$

где $K_{пот} = -5$ дБ – сумма потерь на затухание в ферритовых вентилях, циркуляторе и полосовых фильтрах.

Требуемый коэффициент усиления обеспечен с небольшим запасом.

10.10 Требования к выходным импульсам электровакуумных СВЧ приборов

В электровакуумных СВЧ приборах в связи с конечностью времени пробега волны вдоль замедляющей системы имеется разность фаз между выходным и входным колебаниями, которая может изменяться при изменении режима работы прибора и формы модулирующего импульса.

Отклонения формы модулирующих импульсов от идеальной, нестабильности временных параметров импульсов (джиттер, изменение длительности) в общем случае приводят к искажениям выходных радиоимпульсов РПДУ. Появляется паразитная внутриимпульсная модуляция. В случае радиолокационных РПДУ эти искажения приводят к расширению тела неопределенности зондирующего сигнала, увеличению уровня его боковых лепестков и появлению дополнительных лепестков. В свою очередь, это приводит к уменьшению точности определения дальности и скорости целей. Допустимые уровни искажения формы модулирующих импульсов и нестабильности его временных характеристик в этом случае определяются требованиями к точности измерений параметров целей и уровню боковых лепестков тела неопределенности зондирующего сигнала.

В настоящее время от РЛС требуется разрешающая способность по дальности порядка 0,01...1 м, а также увеличение скрытности работы. Это, в свою очередь, заставляет уменьшать длительность зондирующих радиоимпульсов

вплоть до единиц наносекунд. Накладываются и жесткие требования к длительностям фронтов радиоимпульсов.

Как показывают расчеты, возможные минимальные длительности радиоимпульсов, которые способны формировать электровакуумные СВЧ приборы, составляют 0,1...5 нс. На практике получить столь короткие радиоимпульсы не удастся, так как оказывают влияние еще и паразитные параметры цепей электропитания.

Разрешающая способность зондирующего сигнала по дальности определяется шириной его спектра, по скорости – его длительностью. При этом для простых зондирующих сигналов (без внутриимпульсной модуляции) эти требования оказываются противоречивы. Приходится использовать сигналы с внутриимпульсной модуляцией (сложные сигналы), при этом длительность зондирующих импульсов выбирается исходя из требований к разрешающей способности по скорости и характеристик цели, расстояния до нее.

В случае многофункциональных РЛС требуется изменять длительность импульсов в широких пределах. В случае удаленных и малоподвижных целей для увеличения энергии зондирующего сигнала следует использовать радиоимпульсы большой длительности (от 10 мкс до сотен мс). Для высокоскоростных близко расположенных целей нет необходимости увеличивать энергетику зондирующего сигнала, поэтому следует использовать радиоимпульсы малой длительности (1...1000 нс). В этом случае можно обеспечить высокое разрешение целей по дальности и высокую скорость обзора пространства. Таким образом, для многофункциональных РЛС требуется иметь возможность формировать радиоимпульсы длительностью от 1 нс до сотен мс и более.

При использовании коротких радиоимпульсов для увеличения разрешающей способности по скорости используют пачечные режимы работы. В этом случае разрешение по скорости будет определяться длительностью пачки радиоимпульсов, а по дальности – параметрами одного радиоимпульса (или па-

раметрами его внутриимпульсной модуляции). Однако в этом случае в теле неопределенности зондирующего сигнала появляются побочные максимумы, которые приводят к появлению неоднозначности определения дальности до цели и ее скорости.

Число побочных максимумов по дальности определяется количеством радиоимпульсов в пачке, а по скорости – частотой повторения радиоимпульсов в пачке. Чем выше частота повторения радиоимпульсов в пачке, тем меньше число побочных максимумов тела неопределенности по доплеровскому сдвигу частоты попадают в полосу частот фильтра доплеровских частот, тем меньше неоднозначность определения скорости. Однако с ростом частоты увеличивается неоднозначность определения дальности до цели. Эта неоднозначность устраняется изменением от пачки к пачке частоты повторения радиоимпульсов. Диапазон изменения частоты повторения радиоимпульсов может лежать в пределах от 10 Гц до 1000 кГц и более.

Однако, как правило, на этот параметр оказывают существенное влияние тепловые режимы схемы, так как при увеличении частоты повторения радиоимпульсов существенно увеличиваются динамические потери в ИМ, что может привести к перегреву элементов его схемы. Поэтому максимальную частоту повторения радиоимпульсов приходится ограничивать значением, определяемым величиной динамических (а также статических) потерь в ИМ при конструктивно достижимых условиях отведения теплоты от его элементов.

Точность определения дальности до цели во многом зависит от длительности фронта радиоимпульса. Так, для сигналов без внутриимпульсной модуляции, на 1 нс длительности фронта приходится погрешность определения дальности 0,15 м. Чем большую часть излучаемого радиоимпульса занимают фронт и спад, тем больше энергетические потери на неидеальность формы радиоимпульса.

Поэтому необходимо стремиться к уменьшению длительностей фронта и спада радиоимпульса. Суммарная длительность фронта и спада радиоимпульса, как правило, не должна превышать 0,2 от длительности радиоимпульса. Типовые значения этих параметров лежат в диапазоне 1...200 нс.

10.11 Выбор между твердотельными и электровакуумными усилителями в радиолокации

ФАР перспективных РЛС должны иметь небольшие размеры и быть мобильными. Для обеспечения сопровождения большого числа скоростных целей необходимо, помимо мощности, во-первых, иметь возможность очень быстрого управления диаграммой направленности, а во-вторых, иметь многорежимный радиопередатчик.

Многорежимность должна включать в себя возможности:

- использования режима с очень большой частотой повторения импульсов для слежения за большим числом близких целей с быстрыми угловыми перемещениями;
- использования режима с большой паузой между импульсами для обнаружения целей на большой дальности. При этом необходимо располагать большой энергией в импульсе;
- кратковременного изменения длительности импульсов в любом из режимов для увеличения точности определения координат;
- изменения рабочей частоты для традиционного обеспечения требований по помехозащищенности.

Таким образом, все основные параметры РПДУ (выходная импульсная мощность, длительность импульсов, частота их повторения) должны иметь возможность быстро перестраиваться в соответствии с командами компьютера. Единственным параметром, который должен оставаться постоянным, является

средняя мощность. А эта мощность ограничивается исключительно типом применяемой элементной базы и ИЭП.

Перечислим преимущества и недостатки электровакуумных и полупроводниковых СВЧ приборов.

Преимуществами полупроводниковых СВЧ приборов являются:

- малые размеры, определяющие их использование в многоэлементных ФАР и возможность получить большую мощность сложением ее в пространстве;
- возможность изготовления крупных серий идентичных приборов;
- малая величина питающего напряжения;
- большая долговечность (из-за отсутствия высокотемпературного узла);
- относительно низкая стоимость одного элемента ФАР;
- относительно высокая надежность всей ФАР (отказ одного элемента не приводит к отказу всей ФАР).

Недостатки полупроводниковых СВЧ приборов:

- малая выходная мощность (малые размеры и материал проводника с малой теплопроводностью) – как следствие, требуется увеличение длительности импульса, что определяет низкую скважность и невозможность работы во всех режимах, особенно с высокой скважностью;
- низкий КПД (из-за больших потерь при движении носителей зарядов в полупроводнике и невозможности отвода тепла);
- уязвимость к воздействию СВЧ-оружия;
- резкое снижение уровня выходной мощности на частотах выше 6 ГГц.

Недостатки электровакуумных СВЧ приборов:

- наличие высокотемпературного узла – катода (он недолговечен и требует разогрева);
- высокое анодное напряжение (растут габариты и масса ИЭП) – как следствие, недоступность режима с высокой скважностью из-за необходимости за-

ряда паразитной емкости на большой мощности при анодной модуляции (как вариант, использование сеточной модуляции);

- неизбежное наличие пробоев в рабочем режиме, что чревато потерей сопровождения цели для РЛС и ухудшением надежности;

- большие габаритные размеры, что ограничивает использование в много-элементных ФАР;

- низкая надежность в случае применения единичного электровакуумного прибора: при выходе его из строя не работает вся РЛС.

Преимущества электровакуумных СВЧ приборов:

- высокий уровень мощности (и средней, и импульсной), недоступный никаким другим приборам. Он предопределяется большими размерами, электропрочностью, теплопроводностью медных пластин, пропускающей способностью вакуума;

- высокий КПД. Он предопределяется как абсолютным отсутствием потерь энергии электронов при их движении в вакууме, так и возможностью обеспечения и использования высокоупорядоченных форм их движения (до 80%).

Однако достигнутый сегодня уровень мощности электровакуумных СВЧ приборов является предельным по следующим двум причинам.

Первая – это ограниченность свойств всех конструкционных материалов по удельным нагрузкам – тепловым, электрическим и эмиссионным. Размеры электродов связаны с длиной волны и не могут быть значительно увеличены.

Вторая – это неустойчивость к пробоям системы из электровакуумного прибора и его ИЭП при повышении мощности.

Таким образом, выходная мощность существующих электровакуумных приборов с мощностью порядка нескольких десятков мегаватт в импульсе и со средней мощностью около ста киловатт близка к предельной и не имеет перспектив многократного увеличения. Иными словами, традиционная элементная

база, как полупроводниковая, так и электровакуумная, не позволяет РЛС осуществить необходимый качественный скачок по резкому повышению средней мощности.

Итак, один из основных недостатков электровакуумных СВЧ приборов – это высокое анодное напряжение. Оно составляет 30...50 кВ для приборов киловаттного уровня по средней мощности и 3...5 кВ для приборов мощностью около 100 Вт. Этот недостаток обычно воспринимают как неудобство конструирования РПДУ на высокий уровень напряжения из-за необходимости использования высоковольтной изоляции. Однако тот же недостаток обуславливает трудности реализации на практике режимом работы РЛС с высокой частотой повторения зондирующих импульсов.

При анодной импульсной модуляции паразитная емкость C_n , шунтирующая модулируемый прибор, должна быть заряжена до величины рабочего анодного напряжения U_a .

На ее заряд будет израсходована энергия $W = C_n U_a^2 / 2$. Вся энергия, запасенная в этой емкости, будет израсходована на активном сопротивлении модулирующего устройства в паузе между зондирующими импульсами. Дополнительная мощность P_∂ необратимых потерь этого процесса определяется как $P_\partial = f_n C_n U_a^2 / 2$, где f_n – частота повторения импульсов.

В таблице 10.5 представлены оценки относительной величины мощности P_∂ для приборов некоторых типов при использовании режима с частотой повторения импульсов $f_n = 10$ кГц:

- мощного электровакуумного прибора с анодной модуляцией ($U_a = 40$ кВ, $P_{имп} = 2$ МВт, $P_{ср} = 2$ кВт $C_n = 150$ пФ);
- мощного электровакуумного прибора с сеточной модуляцией;
- относительно маломощного электровакуумного прибора ($U_a = 10$ кВ, $P_{имп} = 100$ кВт, $P_{ср} = 500$ Вт $C_n = 150$ пФ);

- мощного усилителя М-типа с импульсной модуляцией по входному сигналу;

- полупроводникового прибора ($U_a = 10$ В, $P_{cp} = 20$ Вт, $C_n = 50$ пФ);

Таблица 10.5

Тип прибора	P_{cp} , Вт	P_d , Вт	P_d / P_{cp}
Мощный электровакуумный прибор, модуляция анодная	2000	1200	0,6
Мощный электровакуумный прибор, модуляция сеточная	2000	12	0,006
Маломощный электровакуумный прибор, модуляция анодная	0,5	0,075	0,15
Мощный прибор М типа с модуляцией входным сигналом	2000	0	0
Полупроводниковый прибор, модуляция стоковая	20	$25 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$

Как видно из таблицы, наибольшие потери достигаются в электровакуумных СВЧ приборах. Главная причина – на порядки бóльшая, чем у полупроводниковых приборов, величина рабочего напряжения. Разница на столько велика, что для полупроводниковых приборов этой проблемы практически не существует.

Данный недостаток может быть устранен при использовании так называемых схем «безмодуляторного электропитания». Для приборов О-типа (клистроны, ЛБВ) – это сеточное управление электронным потоком.

Для приборов М-типа – это обеспечение импульсного режима работы исключительно за счет модуляции входного СВЧ сигнала.

Малая величина самой выходной мощности у полупроводниковых приборов ограничивает возможности ее регулировки. Наличие этого потолка по мощности вынуждает разработчиков РЛС для обеспечения требуемой дальности набирать энергию в импульсе за счет увеличения длительности импульса: $W = P_{имп} t_{и}$. Это ведет к использованию режимов с малой скважностью (до 2-3), что ограничивает возможности многорежимности РЛС.

Электровакuumные СВЧ прибора, наоборот, располагают, как правило, бóльшим запасом по импульсной мощности и могут использоваться при скважности до 1000. Однако вариации самой импульсной мощности $P_{имп}$ не допускаются. Это значит, что величины t_u и f_n в формуле $P_{cp} = P_{имп} t_u f_n$ могут меняться лишь так, что их произведение остается постоянным при неизменной $P_{имп}$.

Вместе с тем необходимость в замещении полупроводниковых приборов в ФАР электровакuumными приборами явно присутствует.

Более двадцати лет назад появилась американская РЛС «Эгида». Ее радиопередатчик имел четыре ФАР, каждая из которых состояла из 32 передающих модулей на приборах М-типа SFD-261 десятисантиметрового диапазона с импульсной мощностью 132 кВт. Таким образом, общее число таких приборов в РЛС было 128, а их суммарная импульсная мощность 16 МВт при средней мощности 160 кВт.

Прибор SFD – это крупногабаритный усилитель, имеющий размеры, намного больше размеров одной ячейки ФАР. Один такой прибор обеспечивает питание управляемой подрешетки из 128 элементов, поскольку общее количество элементов на каждой из четырех ФАР – 4096.

РЛС «Эгида» (AN/SPY-1) – американская многофункциональная трёхкоординатная РЛС с ФАР. Является основой боевой информационно-управляющей системы «Иджис». Выполняет поиск по азимуту и углу места, захват, классификацию и сопровождение целей, командное управление зенитными ракетами на стартовом и маршевом участках траектории. Централизация всех этих функций в одной системе позволило сократить число радаров, уменьшить взаимные помехи, увеличить количество сопровождаемых и обстреливаемых целей (250 и 20 соответственно). Устанавливается на американские корабли типа «Тикондерога» и «Арли Бёрк», а также корабли других стран.

Контрольные вопросы

1. В чем состоят преимущества и недостатки твердотельных РПДУ?
2. В чем состоят преимущества и недостатки электровакуумных РПДУ?
3. Приведите примеры электровакуумных СВЧ приборов, применяемых в современных радиоэлектронных системах?
4. Каким усилительным и генераторным приборам отдают предпочтение на практике при построении радиоэлектронных систем? Ответ обоснуйте.
5. Что такое клистрон? Приведите его типовые характеристики и сферы применения.
6. Объясните устройство пролетного двухрезонаторного клистрона.
7. Почему клистрон может быть эффективен как умножитель частоты?
8. Какие факторы определяют выходную мощность и КПД клистрона? Как их можно увеличить?
9. Чем отражательный клистрон отличается от пролетного? Где их используют?
10. Какой клистрон называют многолучевым? В чем его преимущество перед другими типами клистронов?
11. Что такое клиTROD? Приведите его типовые характеристики и сферы применения.
12. Что такое ЛБВ типа О и типа М? Приведите их типовые характеристики и сферы применения.
13. Что такое ЛОВ типа О и типа М? Приведите их типовые характеристики и сферы применения.
14. Для чего в ЛБВ-О и ЛОВ-О используют фокусировку электронного луча и как ее осуществляют?
15. Какие виды модуляции сигнала осуществимы в ЛБВ?
16. Что такое магнетрон? Приведите его типовые характеристики и сферы применения.

17. Каковы особенности импульсной модуляции магнетронов?
18. Что такое амплитрон? Почему амплитронные усилители не используют при малой мощности входного сигнала?
19. Чем ограничены диапазон и скорость электронной перестройки частоты в автогенераторе на митроне?
20. Что такое стабилотрон? Приведите сферы его применения.
21. Что такое релятивистские СВЧ приборы? Какое применение на практике они могут найти при построении радиоэлектронных систем?
22. Как осуществляют электропитание электровакуумных СВЧ приборов? Какие требования предъявляют к импульсным модуляторам?
23. Приведите требования к выходным импульсам электровакуумных СВЧ приборов радиолокационных РПДУ.
24. Какие способы преодоления недостатков электровакуумных СВЧ приборов при их использовании в РЛС Вы знаете?
25. Приведите типовую структуру радиолокационного РПДУ на клистроне. Какие требования предъявляют ко входному сигналу клистрона?

Список литературы

1. Проектирование радиолокационных передатчиков / И.С. Гарбер, С.Д. Давыдов, А.И. Ерган и др.; под ред. А.И. Ергана. – Харьков: АРТА, 1961. – 278 с.
2. Верещагин Е.М. Модуляция в генераторах СВЧ. – М.: Советское радио, 1972. – 304 с.
3. Полищук А.Г., Млинник А.Ю., Монин С.В., Казанцев В.И. Высокоэффективные источники вторичного электропитания радиопередающих устройств СВЧ // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2000. – № 4. – С. 98-114.

4. Генераторы высоких и сверхвысоких частот: учебное пособие / О.В. Алексеев, А.А. Головков, А.В. Митрофанов и др. – М.: Высшая школа, 2003. – 326 с.

5. Монин С.В., Млинник А.Ю., Казанцев В.И. Сеточный твердотельный модулятор с широким диапазоном изменения параметров модулирующих импульсов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2003. – № 1. – С. 106-115.

6. Ушаков А.Б. Об основных достижениях и направлениях развития мощных электровакуумных СВЧ-приборов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – № 5-6. – С. 41-45.

7. Генераторы и усилители СВЧ / Под ред. И.В. Лебедева. – М.: Радиотехника, 2005. – 352 с.

8. Полищук А.Г. Вопросы разработки твердотельных импульсных модуляторов для электровакуумных приборов СВЧ // Современная электроника. – 2005. – № 3. – С. 52-55.

9. Щука А.А. Электроника: учебное пособие / Под ред. А.С. Сигова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 800 с.

10. Казанцев В.И. Практика разработки современных радиопередающих систем для мощных импульсных РЛС СВЧ- и КВЧ-диапазонов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спецвыпуск. – 2009. – № 2. – С. 130-144.

11. Макаров В.Н., Суходолец Л.Г. Перспективы развития мощных передатчиков РЛС с использованием электровакуумных приборов СВЧ // Радиотехника. – 2010. – № 1. – С. 97-106.

12. Справочник по вакуумной электронике. Компоненты и устройства / Под ред. Дж. Айхмайера и М. Тамма. – М.: Техносфера, 2011. – 504 с.

13. Борисов Л., Щелкунов Г. Мощные и сверхмощные СВЧ источники: от клистронов до нового класса приборов // Электроника НТБ. – 2012. – № 4. – С. 102-107.

14. Новоселец В.И., Панченко Л.В. Пути развития передающих приборов СВЧ для доплеровских РЛС на базе многолучевых клистронов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2012. – № 2. – С. 3-10.

15. Whitaker J. Power vacuum tubes. – London: CRC Press, 2012. – 662 p.

16. Скупяко М.В., Млинник А.Ю., Монин С.В. Сеточные твердотельные модуляторы для передающих устройств РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – № 3. – С. 67-71.

17. Платонов С.А. Твердотельные импульсные модуляторы мощных генераторных электровакуумных приборов СВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / Платонов Сергей Александрович. – М.: ОАО "Плутон", 2014. – 181 с.

18. Королев А.В., Синельщиков К.В., Шаплов В.Н. Повышение надежности усилительных каскадов на пролетных клистропах в бортовых РЛС // Успехи современной радиоэлектроники – 2015. – № 5. – С. 31-35.

19. Сверхширокополосные лампы бегущей волны. Исследования в СВЧ-, КВЧ- и ТГЧ-диапазонах. Внедрение в производство / Под ред. Н. А. Бушуева. – М.: Радиотехника, 2016. – 480 с.

20. Селемир В.Д., Воронин В.В., Степанов Н.В., Гутов А.В. Фазированные антенные решетки сверхбольшой мощности // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2016. – № 6. – С. 60-65.

21. Радиопередающие устройства: учебник для вузов / С.И. Дингес, В.В. Шахгильдян, М.С. Шумилин и др.; под ред. Р.Ю. Иванюшкина. – М.: Горячая линия-Телеком, 2019. – 1200 с.

22. Лобов И.Н., Березин О.К. Высоковольтный импульсный модулятор для аппаратуры передающего устройства МФР // Вестник воздушно-космической обороны. – 2020. – 3(27). – С. 22-30.