

Тема №1. Теоретические основы построения систем вооружения зенитных ракетных войск.

Занятие № 6. Общие сведения о радиопередающих устройствах, используемых в системах вооружения ЗРВ.

Учебные вопросы

1. Назначение и состав радиопередающего устройства РЛС.
2. Технические характеристики радиопередающих устройств РЛС.
3. Структурные схемы радиопередающих устройств, используемых в системах вооружения ЗРВ.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И СОСТАВ РАДИОПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА РЛС

Радиопередающее устройство (РПУ) РЛС представляет собой комплекс оборудования, предназначенный для формирования и излучения радиолокационных сигналов. В РПУ происходят три основных процесса:

- генерация колебаний сверхвысокой частоты (СВЧ), т. е. их создание;
- усиление колебаний СВЧ до необходимой мощности;
- управление параметрами колебаний СВЧ (амплитудой, частотой или фазой) в соответствии с передаваемой информацией.

Радиопередающим устройством (радиопередатчиком) называется однокаскадное или многокаскадное устройство, предназначенное для создания колебаний высокой частоты требуемой мощности и излучения в пространство этих колебаний в виде электромагнитных волн.

Структура и функции передатчика определяются требованиями, предъявляемыми к нему. Требования к передатчикам РЛС во многом сходны, во всех станциях необходимо сформировать ЗС:

- на заданной несущей частоте (частотах);
- с заданным законом (законами) модуляции;

– с заданной мощностью.

Следовательно, во всех РПУ использован сходный принцип построения (рис. 1).

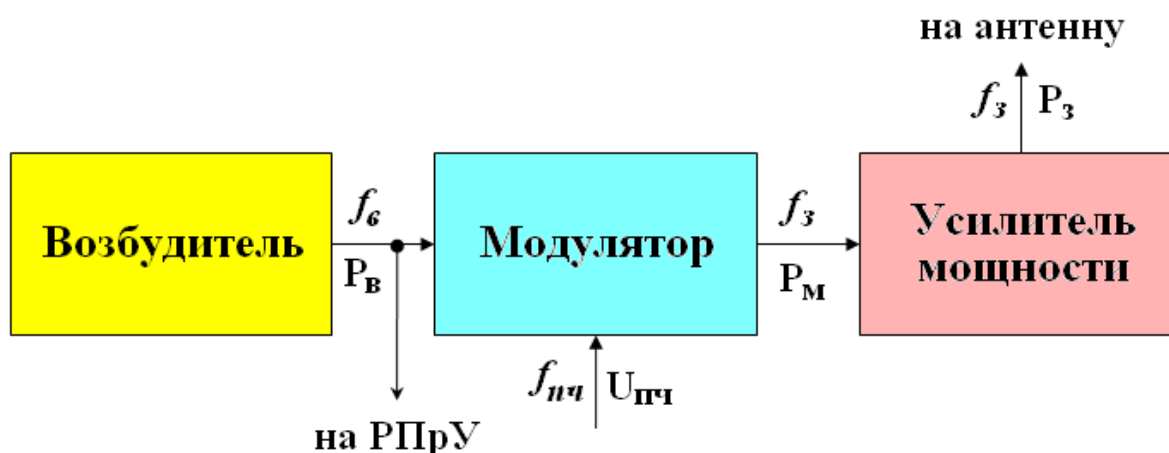


Рис.1. Структурная схема радиопередающего устройства РЛС

Возбудитель это задающий генератор, который обеспечивает формирование стабильного по частоте непрерывного сигнала малой мощности с параметрами f_v и P_v . Основными факторами, влияющими на выбор схемы возбудителя для конкретного РПУ, являются: частотный диапазон и требования к стабильности частоты передатчика, а также количество рабочих частот передающего канала.

Модулятор это функциональный узел обеспечивающий усиление сигнала возбудителя и ввод в него заданного закона модуляции или его части (например, модулятор обеспечивает изменение частоты сигнала, а преобразование непрерывного сигнала в импульсный осуществляется в последующих каскадах РПУ). Основными факторами, влияющими на выбор схемы модулятора для конкретного РПУ, являются: требуемый закон или законы модуляции ЗС, требования к стабильности частоты передатчика, возможности РПУ по перестройке частоты.

Усилитель мощности это функциональный узел обеспечивающий основное усиление сигнала по мощности и в некоторых случаях формирование импульсов из непрерывных колебаний. Основными

факторами, влияющими на выбор схемы усилителя мощности для конкретного РПУ, являются: требуемый закон модуляции ЗС, требования к выходной мощности РПУ, возможности РПУ по перестройке частоты.

Для доплеровских РЛС важной характеристикой радиопередающего устройства является стабильность частоты формируемых колебаний. В первую очередь она зависит от параметров задающего генератора, который может обеспечить достаточно высокую стабильность только при небольшой отдаваемой мощности.

Для повышения стабильности частоты задающий генератор проектируют иногда на более низкой частоте, чем та, на которой работает передатчик. В этом случае вводят дополнительные каскады для умножения частоты.

Возбудитель генератора формирует непрерывное высокочастотное колебание, которое после преобразований поступает на выходной усилитель. С его помощью осуществляется не только усиление зондирующего сигнала по мощности, но и формирование его в виде когерентной пачки прямоугольных радиоимпульсов. Управляющие импульсы, необходимые для коммутации тока луча выходного усилительного каскада, вырабатываются **модулятором**.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ РЛС

Технические характеристики РПУ определяются типом используемых в возбудителе, модуляторе и усилителе мощности генераторных и усилительных приборов.

Для генерации и усиления колебаний в диапазоне СВЧ были разработаны и созданы специальные электровакуумные приборы, которые реализуют так называемое динамическое управление электронным потоком. В них равномерный электронный поток от электронной пушки

преобразуется в поток с переменной плотностью, то есть в пульсирующий электрический ток. Это преобразование осуществляется с помощью переменного электрического поля, создаваемого специальными колебательными системами - объемными резонаторами. При этом лампа и резонаторы конструктивно объединяются в одну систему. Все подобные приборы разделяют на два типа О и М.

В приборах типа О электронный поток движется под действием электрического ускоряющего поля или электрического и магнитного полей, действующих сонаправлено. Траектория движения электронов при этом близка к прямолинейной, а усиление СВЧ сигнала обеспечивается за счет их кинетической энергии. Примерами приборов типа О являются: клистроны, лампы бегущей и обратной волны (ЛБВ и ЛОВ).

В приборах типа М электронный поток движется под действием скрещенных электрического и магнитного полей, направленных перпендикулярно друг другу. Траектория движения электронов при этом является сложной циклической, а усиление СВЧ сигнала обеспечивается за счет их потенциальной энергии. Примерами приборов типа М являются: магнетроны и амплитроны.

В РПУ РЛС для генерации, модуляции и усиления колебаний нашли применение *пролетные* клистроны (прибор типа О) (рис. 2).

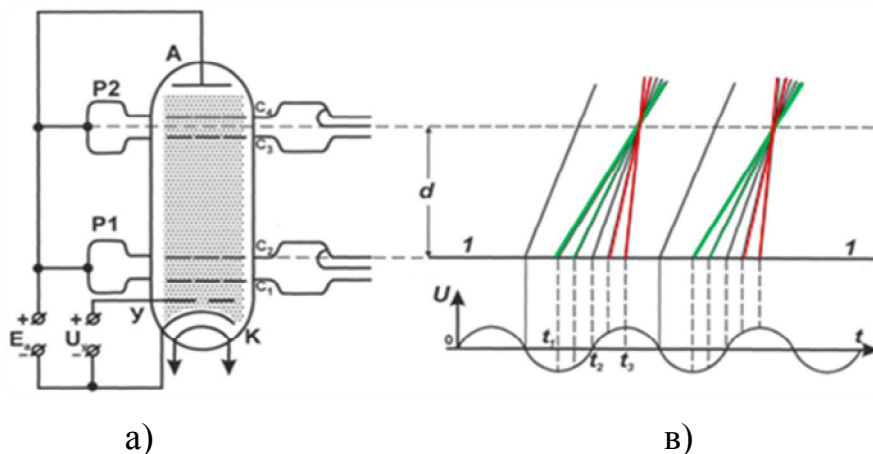


Рис.2. Устройство (а) и принцип формирования групп электронов (в) двухрезонаторного пролетного клистрона

Катод **К** излучает электроны, которые под действием положительного напряжения на ускоряющем электроде **У** приобретают высокую скорость и, пройдя сетки C_1 и C_2 , двигаются в направлении анода **А**. Он находится под высоким положительным потенциалом E_a и играет роль коллектора.

Сетки C_1 и C_2 это стенки объемного резонатора **Р₁**, являющегося входным колебательным контуром клистрона. К нему подводятся усиливаемые колебания.

При отсутствии входного СВЧ сигнала в лампе имеется равномерный поток электронов, летящих со скоростью V .

Когда на сетке C_2 будет положительное напряжение, а на сетке C_1 - отрицательное, электроны, находящиеся между ними, получают ускорение $+\Delta V$ и далее будут двигаться со скоростью $V + \Delta V$. Когда же на сетке C_1 будет положительное напряжение, а на сетке C_2 - отрицательное, электроны получат замедление $-\Delta V$ и в дальнейшем будут двигаться со скоростью $V - \Delta V$.

В междуэлектродном пространстве клистрона происходит образование групп электронов. Возникшие группы электронов (импульсы) отдают свою кинетическую энергию в цепи выходного колебательного контура **Р₂**.

Он помещается на участке наибольшей плотности групп электронов, которые, индуктируют в нем СВЧ сигнал, отдавая ему часть своей энергии, полученной от анодного источника E_a .

Коэффициент усиления по мощности K_p двухрезонаторного пролетного клистрона не превышает значения 20 дБ, а КПД - 50%.

Значение K_p повышается до 40-50 дБ, а КПД до 60%, если использовать многорезонаторные схемы (рис. 3).

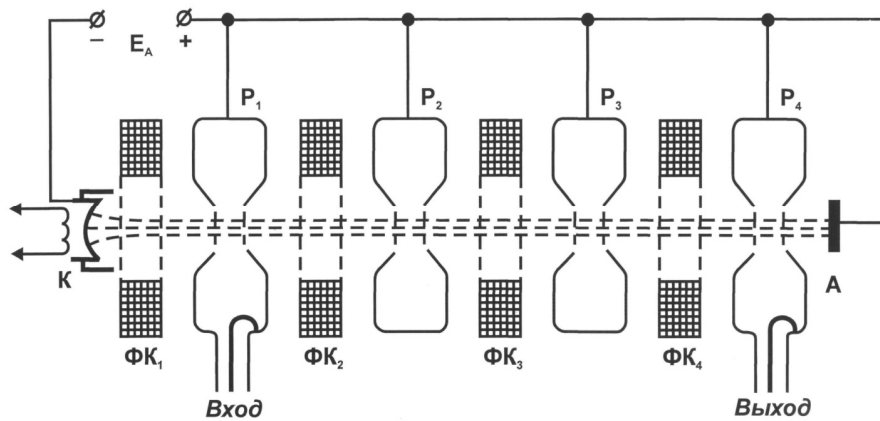


Рис. 3. Многорезонаторный клистрон.

На пути электронов, располагают еще несколько не связанных с нагрузкой резонаторов, чтобы электроны, пролетая через них, получали дополнительную скоростную модуляцию. В конце пространства дрейфа группировка электронов по плотности максимальна и импульсный электронный поток отдает большую энергию полю выходного резонатора.

Эксплуатационные характеристики клистронов

По роду работы клистроны подразделяют на импульсные и непрерывного действия. Импульсная работа обеспечивается подачей импульсов напряжения на резонаторы или управляющий электрод.

По уровню мощности выделяют маломощные, средней мощности и сверхмощные пролетные клистроны. Мощность в импульсе у маломощных импульсных клистронов менее 10 кВт, у клистронов средней мощности от 10 кВт - до 1 МВт, у сверхмощных - более 100 МВт. Для клистронов непрерывного действия мощность соответственно меньше 10 Вт, от 10 Вт до 1 кВт, от 1 до 100 кВт.

Полоса пропускания пролетных клистронов в сантиметровом диапазоне длин волн составляет десятые доли процента от несущей частоты.

Значения питающих напряжений для работы клистронов составляют единицы-десятки киловольт.

В клистронах применяется фокусировка полем постоянных магнитов, однако значения коэффициента шума для клистрона достаточно велики (тысячи).

Для ввода и вывода СВЧ-энергии используют коаксиальные, волноводные и коаксиально-волноводные системы. Охлаждение клистронов как правило используется принудительное жидкостное.

Вывод: *достоинствами* пролетных клистронов следует признать высокие значения коэффициента усиления и КПД, *недостатками* – узкополосность и высокий коэффициент шума.

Для усиления СВЧ колебаний в РПрУ используются лампы бегущей (рис. 4) и обратной волны (ЛБВ и ЛОВ) (О тип). Они принципиально отличаются от клистронов длительным взаимодействием электронов и СВЧ-поля, что позволяет получить необходимое группирование электронов при сравнительно слабом входном сигнале. Рассмотрим усилители СВЧ на примере ЛБВ.

В приборах с бегущей волной применяют специальные линии передачи – замедляющие системы, для понижения фазовой скорости волны до величины сравнимой со скоростью электронного потока, что значительно меньшей скорости света.

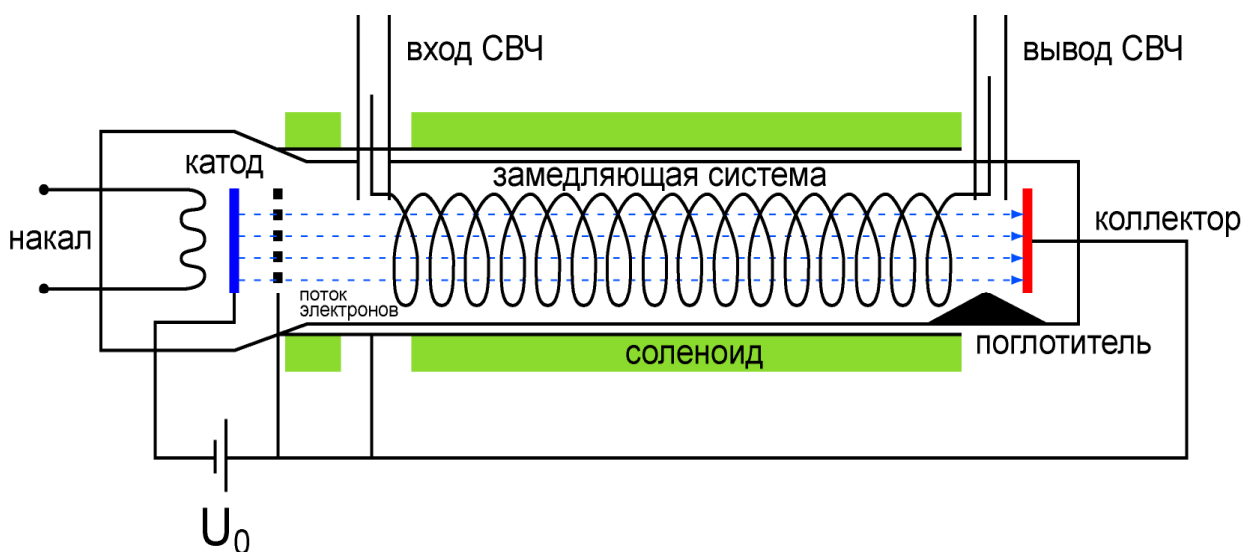


Рис. 4. Лампа бегущей волны

Электронная пушка (катод) обеспечивает формирование, необходимую начальную фокуси-ровку электронного пучка и регулировку его тока.

Трубка с «антеннкой» является элементом связи замедляющей системы (спирали) с входным волноводом. Такая же «антеннка» используется для связи с выходным волноводом.

Электронный поток проходит внутри спирали, взаимодействует с ее СВЧ-полем и затем попадает на коллектор, который имеет форму стакана или конуса.

Фокусирующая система (соленоид) обеспечивает фокусировку электронного пучка на всей длине прибора.

Замедляющая система выполняет роли как входного, так и выходного резонаторов клистрона, т.е. обеспечивает и модуляцию электронного потока по плотности, и передачу кинетической энергии электронов от промодулированного потока выходному сигналу.

Эксплуатационные характеристики ЛБВ (ЛОВ).

По величине *выходной мощности* ЛБВ (ЛОВ) подразделяются на приборы малой мощности (доли милливатта - 1 Вт), средней мощности (1-100 Вт), большой мощности (более 100 Вт) и сверхмощные (более 100 кВт).

По режиму работы различают приборы непрерывного и импульсного действия.

ЛБВ со спиральной замедляющей системой характеризуется *широкой полосой пропускания* (до 100% от несущей частоты) и относительно малой выходной мощностью, ЛОВ при аналогичной выходной мощности имеет узкую полосу пропускания (десятые доли процента от несущей частоты).

Значения питающих напряжений для работы ЛБВ (ЛОВ) составляют единицы киловольт.

Значения *коэффициента шума* для ЛБВ (ЛОВ) невелики, в малозумящих (входных) приборах $K_{ш}=2,5-20$ (или 4-13 дБ). В более мощных $K_{ш}=20-1000$ (13-30 дБ).

Для ввода и вывода СВЧ-энергии используют коаксиальные, волноводные и коаксиально-волноводные системы. Принудительное охлаждение ЛБВ как правило не используется.

Вывод: *достоинствами* приборов следует признать широкополосность и низкий коэффициент шума, *недостатками* – относительно невысокие значения коэффициента усиления и КПД.

В передающих трактах некогерентных систем используются генераторы СВЧ М типа – магнетроны (рис. 5, 6). Они принципиально отличаются от клистронов тем, что в энергию СВЧ-поля непосредственно преобразуется потенциальная энергия электронов, а не кинетическая. Такое взаимодействие электронов и СВЧ-поля обеспечивается при использовании взаимно перпендикулярных (скрещенных) электрического и магнитного полей.

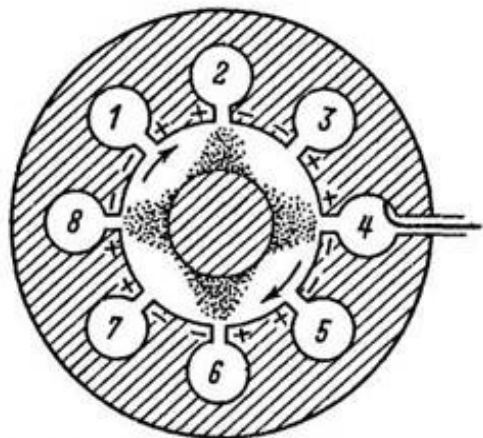
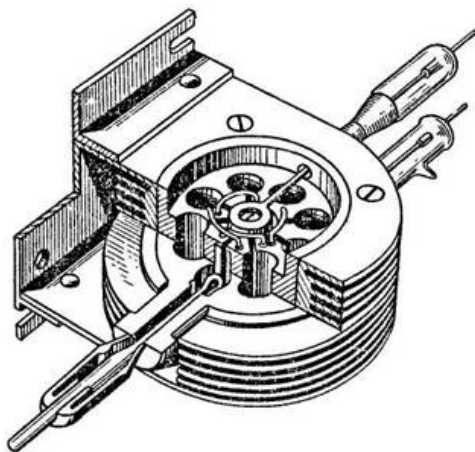


Рис. 5. Восьмирезонаторный магнетрон Рис. 6. Принцип работы магнетрона

Колебательная система магнетрона образована рядом объемных резонаторов, выполненных в материале анода. Электроны эмитируются цилиндрическим катодом. Между катодом и анодом пространство взаимодействия. Резонаторы связаны с ним через щели, так что СВЧ-поле «провисает» в это пространство.

Энергия выводится с помощью витка связи, находящегося в одном из резонаторов. Вакуумная камера магнетрона помещена между полюсами магнита, направление магнитного поля совпадает с осью катода.

В пространстве взаимодействия электрическое и магнитное поля взаимно перпендикулярны. Электроны, находясь в пространстве взаимодействия, движутся по траекториям, напоминающим циклоиду, и образуют электронный поток, вращающийся вокруг катода.

Осуществляется модуляция скорости электронов и изменение траектории их движения. В результате чего вращающееся электронное «облачко» из кольцевого превращается в зубчатое. Число электронных «спиц» равно половине числа резонаторов.

Электронное «облачко» вращается с такой скоростью, что «спицы» проходят мимо щелей в тот момент, когда там существует тормозящее поле. Промежутки между «спицами», проходят через ускоряющие поля. Происходит отдача электронным «облачком» энергии резонаторам и потеря энергии на разогрев катода и анода от электронной бомбардировки. Вся эта энергия потребляется от анодного источника.

Эксплуатационные характеристики магнетрона

Выходная мощность магнетронов непрерывного действия составляет от долей ватта до нескольких десятков киловатт, а магнетронов импульсного действия - от 10 Вт до 10 МВт. Электронный КПД магнетронов может превышать 70%. Собственная добротность резонаторов порядка 1000.

Магнетрон характеризуется *узкой полосой пропускания* (единицы процента от несущей частоты).

Значения питающих напряжений для работы магнетрона составляют от единиц до десятков киловольт.

Магнетроны находят широкое применение в СВЧ-устройствах в качестве генераторов в передающих трактах некогерентных систем.

Для ввода и вывода СВЧ-энергии используют коаксиальные, волноводные и коаксиально-волноводные системы.

Вывод: *достоинствами* магнетрона следует признать высокие значения КПД и выходной мощности, *недостатками* – узкополосность и невозможность генерации когерентных сигналов.

Следующим прибором М типа, применяемым в некогерентных РПрУ, является усилитель СВЧ – амплитрон (рис. 7). Схематически амплитрон имеет много общего с магнетроном. Он имеет замедляющую систему в виде цепочки резонаторов, но в отличие от магнетрона эта цепочка разомкнута и в анодном блоке образованы вход и выход. Чтобы устранить возможность самовозбуждения колебаний, в амплитроне делают обычно нечетное число резонаторов.

Так же, как и в магнетроне, возникает замкнутое вращающееся электронное «облачко», которое взаимодействует с движущейся навстречу электромагнитной волной. При передаче энергии электронов этой волне происходит усиление колебаний.

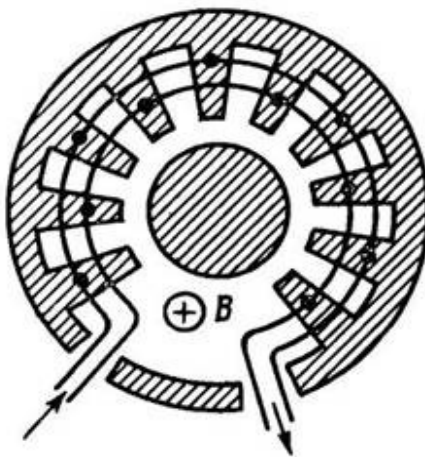


Рис. 7. Упрощенная схема амплитрона

Эксплуатационные характеристики амплитрона

КПД амплитронов не менее 55%, а в мощных и сверхмощных приборах достигает 85%.

В непрерывном режиме амплитроны дают *выходную мощность* до 500 кВт, а в импульсном — 10 МВт и даже больше.

Коэффициент усиления - десятки. *Относительная ширина полосы частот* 5 - 10%.

Анодное напряжение - единицы или десятки киловольт, а ток анода - десятки ампер.

Вывод: *достоинствами* амплитрона следует признать высокие значения КПД и выходной мощности, достаточно широкую полосу частот, *недостатками* – малое значение коэффициента усиления, необходимость формирования высоких уровней входных сигналов.

3. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ВООРУЖЕНИЯ ЗРВ

3.1. РПУ РЛС с импульсным зондирующим сигналом

Используется в РЛС обнаружения на средних и больших высотах на максимально возможных дальностях в условиях постановки противником помех. Диапазон длин волн – дециметровый.

Основные требования, предъявляемые к РПУ:

- формирование импульсного ЗС двух видов: простой прямоугольный радиоимпульс и радиоимпульс с линейной частотной модуляцией;
- высокая энергия формируемых сигналов, импульсная мощность должна составлять сотни киловатт, средняя - десятки киловатт;
- точное согласование параметров ЗС и характеристик оптимального фильтра приемного устройства;
- возможность быстрой смены номинала частоты ЗС в целях повышения скрытности работы и помехоустойчивости РЛС;
- резервирование каскадов РПУ, для повышения надежности.

Особенностью **радиопередающего устройства станции обнаружения целей на средних и больших высотах** является необходимость

формирования целого набора частот сигналов для обеспечения излучения в различных режимах работы РЛС (рисунок 8).

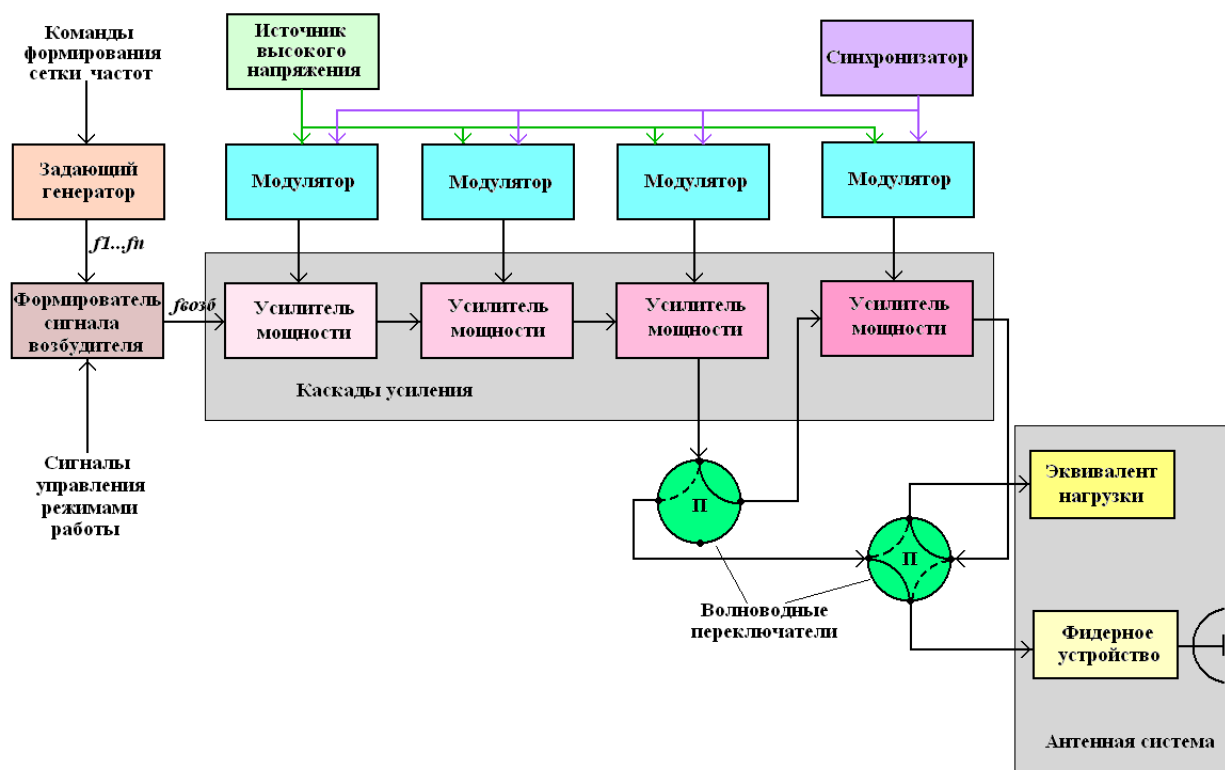


Рис.8. Вариант структурной схемы радиопередающего устройства РЛС обнаружения целей на средних и больших высотах

Задающий генератор на кварцевых генераторах и умножителях частоты формирует набор сигналов различных частот. Из полученного набора сигналов формирователь сигнала возбуждения выделяет сигнал на необходимой несущей частоте $f_{возб}$, соответствующий текущему режиму работы РЛС. Закон модуляции ЗС формируется с помощью того же фильтра, который применяется для обработки принятого сигнала в приемнике, что позволяет достичь точного соответствия параметров ЗС и устройства его обработки.

Далее этот сигнал проходит через каскады усиления. Каждый каскад представляет собой управляемый модулятором импульсный усилитель мощности. В результате работы усилительного каскада на его выходе формируется набор импульсных сигналов излучения в соответствии с

режимом работы станции. Входные каскады усилителя мощности собраны на ЛБВ, оконечные на амплитронах.

Волноводные переключатели выполняют роль маршрутизаторов излучаемого сигнала. В одном случае сигнал может миновать четвертый каскад усиления, в другом случае этот сигнал может быть направлен либо в нагрузку (передающий рупор) для излучения, либо в эквивалент нагрузки для работы без выхода в эфир.

3.2. РПУ РЛС с непрерывным зондирующим сигналом

Используется в РЛС обнаружения на малых высотах на дальности прямой видимости в условиях постановки противником помех. Диапазон длин волн – сантиметровой.

Основные требования, предъявляемые к РПУ:

- формирование ЗС двух видов: немодулированный непрерывный сигнал и непрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией;
- высокая энергия формируемых сигналов, средняя мощность должна составлять единицы киловатт;
- высокая стабильность частоты ЗС для измерения радиальной скорости;
- возможность быстрой смены номинала частоты ЗС в целях повышения скрытности работы и помехоустойчивости РЛС.

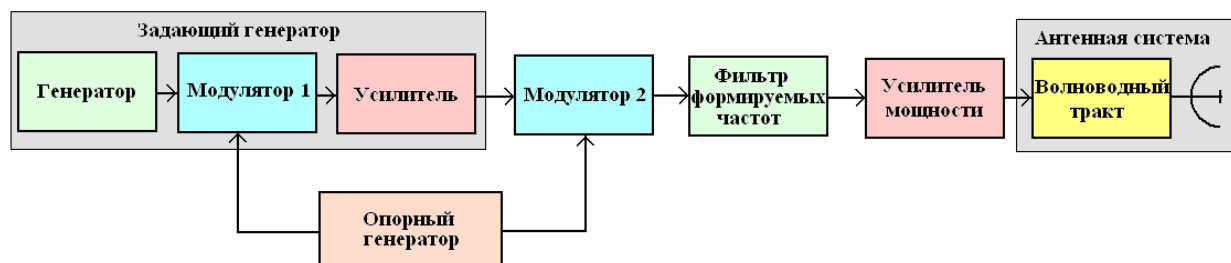


Рис.9. Вариант структурной схемы радиопередающего устройства РЛС обнаружения целей на малых высотах

Задающий генератор формирует сигнал опорной частоты, из которой в модуляторе 2 создается сетка литерных частот. Количество литерных частот от 4 до 6. Параметры модуляции задаются сигналом Модулятором 2. Задающий генератор и двухкаскадный модулятор реализованы на последовательно включенных отражательном клистроне, преобразователе частоты и пролетном двухрезонаторном клистроне.

Фильтр формируемых частот позволяет выделить для дальнейшей работы необходимую литерную частоту. Это устройство может быть выполнено в виде механически переключаемых волноводных секций, каждая из которых настроена на определенную резонансную частоту. Таким образом, на его выходе появится сигнал одной выбранной литерной частоты.

Усилитель мощности в данном случае может работать с сигналами, частота которых находится в допустимом диапазоне. При необходимости может быть использовано несколько усилителей, работающих в разных диапазонах частот.

Усиленный сигнал поступает в антенное устройство, с помощью которого формируется луч диаграммы направленности, в пределах которого и происходит излучение сформированной в передатчике электромагнитной энергии.

3.3. РПУ РЛС управления стрельбой

Радиопередающее устройство станции наведения ракет, также как и радиопередающее устройство станции обнаружения целей на средних и больших высотах работает в импульсном режиме. Вариант такого передатчика представлен на рисунке 4.

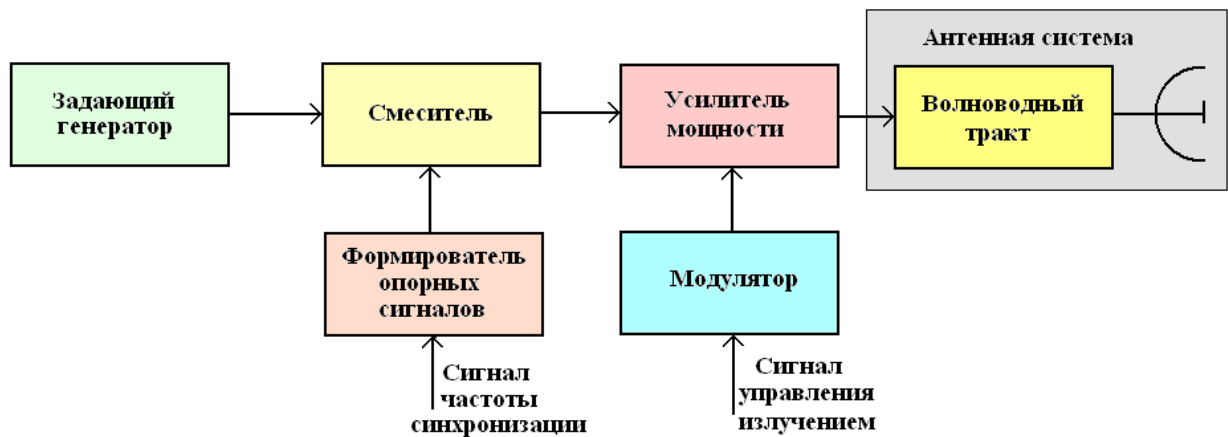


Рис.4. Вариант структурной схемы радиопередающего устройства РЛС управления стрельбой

К РПУ многофункциональной РЛС управления стрельбой в условиях постановки противником помех предъявляется ряд дополнительных требований:

- формирование различных видов сигналов:
 - при поиске и визировании цели КППРИ;
 - при захвате и визировании ракеты пачка запросных импульсов;
 - при передаче команд управления на борт ракеты их импульсный код;
 - при подсвете цели для бортовой аппаратуры ракеты одиночные радиоимпульсы большой длительности;
- высокая энергия формируемых сигналов, средняя мощность должна составлять единицы киловатт;
- высокая стабильность частоты ЗС для измерения радиальной скорости;
- возможность быстрой смены номинала частоты ЗС в целях повышения скрытности работы и помехоустойчивости РЛС;
- резервирование каскадов РПУ, для повышения надежности.

Диапазон длин волн – сантиметровый.

Задающий генератор СВЧ (возбудитель), обеспечивает формирование стабильного по частоте непрерывного сигнала малой мощности с параметрами f_b и P_b . Реализован на пролетном двухрезонаторном клистроне.

Модулятор это функциональный узел обеспечивающий усиление сигнала возбудителя и ввод в него заданного закона модуляции, модулятор обеспечивает изменение частоты сигнала, а преобразование непрерывного сигнала в импульсный осуществляется в последующих каскадах РПУ. Реализован на пролетном многорезонаторном клистроне.

Усилитель мощности это функциональный узел обеспечивающий основное усиление сигнала по мощности и формирование импульсов из непрерывных колебаний. Реализован на пролетном многорезонаторном клистроне.

В РЛС для компенсации уходов частоты РПУ f_b подается на РПрУ в качестве гетеродинного сигнала.

Выводы, которые можно сделать из материала занятия:

1. Технические параметры передающих устройств РЛС определяют достоинства их применения, необходимость и целесообразность.

2. Параметры РПУ определяют такие важнейшие тактические характеристики РЛС, как дальность обнаружения и сопровождения, помехозащищенность, точность определения координат цели и разрешающая способность.