

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**В.А. Подгорный, А.А. Гаврилов, А.И. Целебровский**

**ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ  
ЗЕНИТНЫХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ  
КОМПЛЕКСОВ**

Учебное пособие

Издательство  
Томского политехнического университета  
2024

УДК 358.116(075.8)

ББК 658.515я73

П44

**Подгорный В.А.**

П44

Основы построения зенитных артиллерийских комплексов : учебное пособие / В.А. Подгорный, А.А. Гаврилов, А.И. Целебровский ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2024. – 160 с.

В пособии изложены основные понятия и процессы, происходящие во время подготовки и проведения выстрела, а также терминология и назначение основных элементов и агрегатов входящих в состав зенитных артиллерийских комплексов, их устройство и функционирование.

Предназначено для студентов, проходящих техническую подготовку по специальностям «Боевое применение подразделений зенитной артиллерии» и «Боевое применение подразделений, вооружённых зенитными артиллерийскими самоходными установками с радиоприборными комплексами».

УДК 358.116(075.8)

ББК 658.515я73

*Рецензенты*

Начальник учебной части – заместитель начальника  
военного учебного центра при НИ ТГУ полковник  
*В.С. Лесной*

Начальник кафедры разведки и специальной подготовки  
военного учебного центра при НИ ТГУ полковник  
*И.В. Лантев*

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2024

© Подгорный В.А., Гаврилов А.А.,  
Целебровский А.И., 2024

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2024

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. Принципы построения зенитных артиллерийских комплексов.....</b>	<b>7</b>
Раздел 1. Основы стрельбы зенитной артиллерии .....	7
§ 1.1. Характеристики воздушной цели.....	7
§ 1.2. Сущность стрельбы по воздушной цели .....	8
§ 1.3. Координаты положения воздушной цели и параметры ее движения.....	10
§ 1.4. Измерение углов в зенитной артиллерии.....	16
Раздел 2. Основные сведения из внутренней и внешней баллистики .....	19
§ 2.1. Понятие о явлении выстрела .....	19
§ 2.2. Силы, действующие на снаряд при его движении в воздухе .....	20
§ 2.3. Табличные условия стрельбы.....	26
§ 2.4. Зоны зенитных орудий.....	27
Раздел 3. Структурная схема ЗАК.....	29
§ 3.1. Структурная схема ЗАК.....	29
§ 3.2. Боевые возможности ЗАК.....	31
§ 3.3. Принципы решения задачи встречи снаряда с целью в СРП ЗАК.....	32
<b>Глава 2. Основы радиолокации.....</b>	<b>35</b>
Раздел 1. Введение в радиолокацию .....	35
§ 1.1. Радиоволны и их основные свойства.....	35
§ 1.2. Радиолокация и её виды. Методы радиолокации .....	38
Раздел 2. Структурная схема радиолокатора .....	40
§ 2.1. Импульсный метод радиолокации. Импульсные РЛС.....	40
§ 2.2. Основные технические характеристики импульсного радиолокатора.....	42
§ 2.3. Принцип опознавания воздушных целей .....	44
§ 2.4. Эффективная площадь рассеивания цели .....	45
Раздел 3. Методы определения координат цели.....	47
§ 3.1. Импульсный метод определения дальности .....	47
§ 3.2. Методы определения угловых координат .....	49
Раздел 4. Линии передачи электромагнитной энергии. Антенны РЛС .....	51
§ 4.1. Назначение и типы линий передачи электромагнитной энергии .....	51
§ 4.2. Антенные устройства .....	54
Раздел 5. Импульсная техника .....	60
Введение .....	60
§ 5.1. Импульсы и их основные характеристики.....	60
§ 5.2. Цепи формирования импульсов.....	64
Раздел 6. Электровакуумные приборы .....	71
§ 6.1. Двухэлектродная лампа .....	72
§ 6.2. Трехэлектродная лампа, многоэлектродные лампы.....	74
§ 6.3. Электронные лучевые трубки .....	78
Раздел 7. Генераторы импульсов .....	83
§ 7.1. Назначение, состав и работа мультивибратора .....	84
§ 7.2. Назначение, состав и работа блокинг-генератора .....	87

Раздел 8. Радиопередающие устройства .....	89
§ 8.1. Структурная схема радиопередающего устройства.....	89
§ 8.2. Генераторы СВЧ.....	91
Раздел 9. Приемные устройства РЛС .....	95
§ 9.1. Структурные схемы приемных устройств РЛС.....	95
§ 9.2. Технические характеристики приемной системы .....	97
§ 9.3. Преобразователи частоты .....	99
Раздел 10. Устройство элементов приемной системы .....	101
§ 10.1. Усилители.....	101
§ 10.2. Детекторы.....	105
§ 10.3. Видеоусилители.....	107
Раздел 11. Индикаторные устройства РЛС .....	109
§ 11.1. Назначение и состав индикаторных устройств .....	109
§ 11.2. Устройство индикатора дальности .....	112
§ 11.3. Устройство индикатора кругового обзора .....	114
<b>Глава 3. Основы РЭБ в войсковой ПВО .....</b>	<b>117</b>
Раздел 1. Основы электронной защиты радиоэлектронных средств от помех.....	117
§ 1.1. Радиоэлектронная борьба и ее составные части.....	117
§ 1.2. Помехи радиоэлектронным средствам и их классификация.....	118
§ 1.3. Воздействие помех на РЛС.....	120
Раздел 2. Защита радиолокатора от помех.....	123
§ 2.1. Способы защиты РЭС от помех. Понятие электромагнитной совместимости.....	123
§ 2.2. Защита РЛС от помех.....	125
<b>Глава 4. Основы автоматике .....</b>	<b>130</b>
Раздел 1. Общие сведения о системах автоматике .....	130
§ 1.1. Принцип работы автоматической следящей системы .....	130
§ 1.2. Индикаторные синхронные передачи. Системы дистанционных синхронных передач координат .....	130
§ 1.3. Принцип работы вращающихся трансформаторов .....	134
Раздел 2. Принципы работы автоматических систем РЛС.....	137
§ 2.1. Принцип автоматического сопровождения по дальности .....	137
§ 2.2. Принцип автоматического сопровождения по угловым координатам.....	138
§ 2.3. Следящий привод управления антенной.....	140
Раздел 3. Элементы АСУ .....	142
§ 3.1. Система АПЧ .....	142
§ 3.2. Усилители мощности .....	143
Раздел 4. Исполнительные элементы следящих систем .....	146
§ 4.1. Электрические двигатели и гидравлические машины .....	146
§ 4.2. Электромагнитные реле. Реле времени .....	153
§ 4.3. Соединительные муфты.....	155
<b>Контрольные вопросы.....</b>	<b>157</b>
<b>Заключение.....</b>	<b>159</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>159</b>

## **Введение**

Дисциплина «Основы построения зенитных артиллерийских комплексов» – составная часть военно-технической подготовки, включающая глубокое изучение студентами принципов построения зенитных артиллерийских комплексов (зенитных артиллерийских комплексов с РПК) войсковой ПВО ВС РФ.

Данное пособие предназначено для изучения основных положений радиолокации, радиотехники, автоматики, а также работы типовых радиотехнических схем и узлов, используемых в материальной части зенитных артиллерийских комплексов.

Содержание материала, изложенного в настоящем пособии, определяется Программой подготовки офицеров запаса по ВУС «Боевое применение подразделений зенитной артиллерии» и «Боевое применение подразделений, вооружённых зенитными артиллерийскими самоходными установками с радиоприборными комплексами». При изучении вопросов, раскрываемых в пособии, рекомендуется: пользоваться иллюстрациями, следуя соответствующим ссылкам, а также плакатами соответствующей тематики.

### **Цели и задачи военно-специальной и военно-технической подготовки**

Исходя из сущности военно-учетных специальностей, происходит разделение процесса обучения на два направления:

- 1) боевое применение подразделений, вооружённых зенитными артиллерийскими самоходными установками с радиоприборными комплексами;
- 2) боевое применение подразделений зенитной артиллерии.

Сфера военно-профессиональной деятельности – эксплуатация вооружения и военной техники зенитных артиллерийских батарей, вооружённых зенитными артиллерийскими комплексами ЗСУ-23-4 и 23-мм спаренными установками ЗУ-23.

### **Основы построения зенитных артиллерийских комплексов**

#### **Изучить:**

- основные принципы построения зенитных артиллерийских комплексов (зенитных артиллерийских комплексов с РПК) войсковой ПВО ВС РФ;
- основные положения основ радиотехники, автоматики, позволяющем изучение материальной части зенитных артиллерийских комплексов;
- работу типовых радиотехнических схем и узлов, используемых в материальной части зенитных артиллерийских комплексов;
- боевые средства зенитных артиллерийских комплексов.

### **Устройство и эксплуатация зенитных артиллерийских комплексов**

#### **Изучить:**

- назначение, состав, боевые возможности и тактико-технические характеристики ЗАК;
- устройство и работа боевых средств ЗАК по структурной и функциональной схемам;
- виды, объем, периодичность проведения технического обслуживания комплекса;
- методику подготовки и проведения занятий по технической подготовке;
- методику оценки технического состояния ЗАК по результатам контроля функционирования и признакам нормальной работы;
- методику проведения проверок и настроек в объеме ЕТО и отдельных проверок в объеме ТО № 1.

**Научить:**

- использовать органы управления, контроля и сигнализации при проведении контроля функционирования радиоэлектронной аппаратурой комплекса;
- оценивать техническое состояние ЗАК;
- организовать и провести техническое обслуживание в объеме КО, ЕТО, ТО № 1 и текущий ремонт ЗАК;
- проводить занятие по технической подготовке.

**Стрельба и боевая работа на зенитных артиллерийских комплексах****Изучить:**

- положение теории стрельбы зенитных артиллерийских комплексов;
- правила стрельбы и боевой работы, курс стрельб зенитных ракетных комплексов ближнего действия и зенитных артиллерийских комплексов войсковой ПВО;
- порядок подготовки зенитных артиллерийских комплексов к боевой работе;
- порядок ведения огня по воздушным целям;
- организацию управления огнем подразделений войсковой ПВО.

**Научить:**

- выполнению обязанностей номера расчёта зенитного артиллерийского комплекса;
- управлять подразделением зенитного артиллерийского комплекса при ведении боевых действий.
- приводить зенитный артиллерийский комплекс в установленные степени боевой готовности, проверять и оценивать их готовность к выполнению огневых задач;
- проводить тренировку на учебно-тренировочных средствах в подразделении.

# Глава 1. Принципы построения зенитных артиллерийских комплексов

## Раздел 1. Основы стрельбы зенитной артиллерии

### § 1.1. Характеристики воздушной цели

**Зенитная артиллерия** – это вид артиллерии, предназначенный для уничтожения воздушных целей. На протяжении более века зенитная артиллерия служит Отечеству, выполняя боевые задачи по защите войсковых формирований от ударов средств воздушного нападения. До появления первых зенитных ракетных комплексов ствольная зенитная артиллерия являлась практически единственным наземным боевым средством, достаточно эффективно уничтожающим широкий спектр летательных аппаратов (аэростаты, дирижабли, самолеты, вертолеты, крылатые ракеты и другие).

Обладая высокой скорострельностью, значительным боевым могуществом снарядов (особенно среднего и большого калибров), сравнительной простотой процессов подготовки и ведения стрельбы и другими преимуществами, зенитная артиллерия на протяжении длительного исторического периода занимала ведущие позиции в противовоздушной обороне войск. Высокая универсальность ствольных орудий позволяла также интенсивно использовать зенитную артиллерию в ходе боевых действий для уничтожения наземных целей, включая бронированную технику (танки, боевые машины пехоты, БТР и т. п.) и живую силу противника.

Комплексы зенитной артиллерии, следуя объективным законам диалектики, непрерывно развивались и совершенствовались, впитывая современные достижения науки и техники, отвечая на вызовы времени, связанные с бурным развитием средств воздушного нападения (СВН).

Тенденции развития зенитной артиллерии на протяжении столетия, современное ее состояние, прогрессирующее развитие авиационных средств поражения наземных войск и объектов позволяет утверждать, что век зенитной артиллерии далеко не закончен.

В настоящее время и в обозримой перспективе зенитные артиллерийские комплексы (ЗАК), созданные на основе самых современных технических решений, прорывных инновационных технологий, применяемых в военном деле, включая системы технического зрения и искусственного интеллекта, являются и останутся одним из эффективных универсальных средств борьбы с современными СВН, включая малоразмерные низколетящие беспилотные летательные аппараты (БЛА).

**Главной задачей** стрельбы зенитной артиллерии является уничтожение воздушных целей. К воздушным целям относятся самолеты, вертолеты, планеры, аэростаты и цели, сбрасываемые на парашютах.

Основными характеристиками современных воздушных целей являются:

- большие скорости движения;
- большие высоты полетов, маневренность;
- большие дальности полетов при высокой грузоподъемности;
- высокая прочность и живучесть;
- выполнение боевых задач в сложных метеорологических условиях и ночью.

Скорости и высоты полётов самолётов являются одними из главных факторов, обеспечивающих успех действия истребительной, бомбардировочной и разведывательной авиации и затрудняющих стрельбу зенитной артиллерии

Живучесть современных самолётов является достаточно высокой. Она достигается:

- повышением прочности самолёта вследствие применения цельнометаллических конструкций и более прочных и лёгких материалов;

- бронированием мест расположения экипажа и важнейших частей самолёта;
- протектированием (защитой) баков с топливом и повышением стойкости от загорания топлива в реактивных двигателях;
- возможностью полёта при не всех работающих моторах;
- автоматизацией и дублированием органов управления, а также созданием специальных условий для действий экипажа самолёта.

Живучесть самолёта как цели оценивается числом попаданий осколков или снарядов, необходимых для его поражения.

Самолёты как цели зенитной артиллерии могут достигать значительных размеров, имея размах крыльев до 55 м, длину до 45 м и площадь до 400 м<sup>2</sup>. Но фактически поражаемая (или вернее уязвимая) поверхность цели значительно меньше и составляет примерно 10...20 % всей поверхности самолёта. Благодаря этому снижается вероятность попадания и увеличивается расход снарядов на поражение цели.

Самолёт, являющийся металлической конструкцией, хорошо отражает электромагнитные волны, излучаемые наземными и самолётными радиолокационными станциями, что позволяет обнаруживать и определять координаты самолётов наземным войскам и в воздухе воздушным силам с помощью приёмных радиотехнических устройств. Возможность обнаружения самолётов и определения их координат с большой точностью имеет решающее значение в действии зенитной артиллерии против скоростной авиации на больших высотах при всяких условиях видимости.

Радиус действия современных РЛС, обнаруживающих самолёты и определяющих их текущие координаты, вполне обеспечивает открытие огня зенитной артиллерией на предельной дальности зоны досягаемости.

Из перечня характеристик воздушных целей видно, что стрельба зенитной артиллерии связана с разнообразием условий, в которых действует авиация и с особенностями устройства боевых самолётов.

Поэтому для поражения целей огнём зенитной артиллерии нужны мощное орудие с возможно наименьшим временем полёта снаряда, максимальная автоматизация всей подготовки данных для стрельбы и её проведения, значительная скорострельность, большая точность стрельбы и своевременно обеспеченное целеуказание.

### **§ 1.2. Сущность стрельбы по воздушной цели**

Стрельба по воздушным целям, перемещающимся в пространстве с большой скоростью и обладающим маневренностью, существенно отличается от стрельбы по неподвижным целям. При стрельбе по неподвижным целям орудие наводится в цель путём придания ему соответствующих установок.

При стрельбе по самолётам и вообще по быстро движущимся целям необходимо учитывать упреждение на перемещение цели за время подготовки орудия к выстрелу и полёта снаряда до цели.

На рис. 1 точка  $O$  – место стояния прибора (орудия),  $A_0$  – исходная точка,  $A_B$  – точка выстрела,  $A_y$  – упреждённая точка. Угол  $A_0OA_y$  – угловое упреждение на полёт цели за время подготовки орудия (батареи) к выстрелу и время полёта снаряда до упреждённой точки.

Орудие наводится не в точку  $A_0$ , где находится цель в исходный момент, т. е. в момент последнего определения её координат, используемых для определения данных выстрела (залпа), и не в ту точку, где находится цель в момент производства выстрела  $A_B$ , а в некоторую точку  $A_y$ , лежащую на будущем пути цели, в которой по расчётам снаряд должен встретиться с целью.

Примем условно, что орудие и РЛС находится в одной точке  $O$ , и дадим определение некоторых терминов.



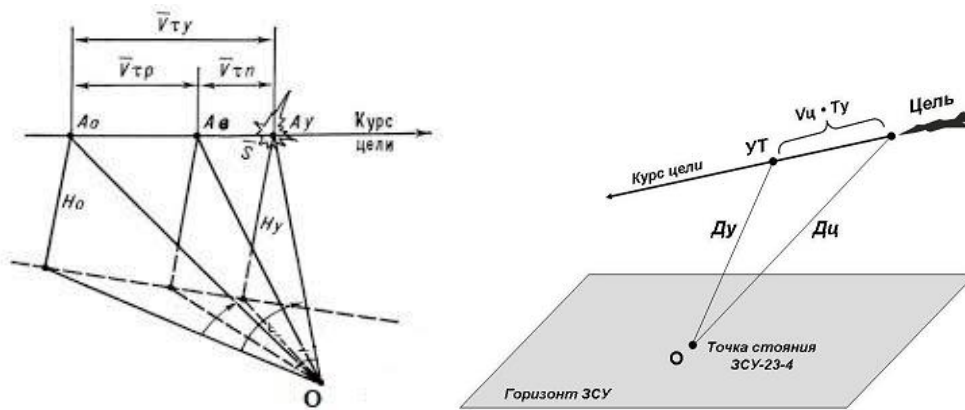


Рис. 1. Упредительный треугольник

*Работное время*  $\tau_p$  – промежуток времени между исходным моментом и моментом производства выстрела.

*Исходный момент* – момент последнего определения координат цели (последней засечки), используемых для исчисления данных выстрела (залпа). Исходному моменту отвечает исходная точка  $A_0$ .

*Приборное время*  $\tau_n$  – промежуток времени между исходным моментом и моментом окончания передачи данных с РЛС на орудие.

*Упредительное время*  $\tau_y$  – промежуток времени между исходным моментом и расчётным моментом встречи снаряда (поражающего элемента) с целью. Расстояние  $A_0A_y$  цель проходит за работное время  $\tau_p$  – время, затрачиваемое орудием (батареей) на подготовку выстрела (залпа). При существующих автоматизированных приборах управления огнём РПК с силовой синхронной передачей данных на орудия батареи (ССП) работное время равно нулю. Для некоторых способов стрельбы без РЛС, например стрельбы по заранее рассчитанным упреждённым точкам (постановка завес) работное время не равно нулю.

Расстояние  $A_yA_y$  цель проходит за полётное время  $t$  – *время полёта снаряда* до упреждённой точки. При некоторых способах стрельбы отрезок  $A_0A_y$  называется вектором упреждения или линейным упреждением.

Вектор упреждения  $A_0A_y = v\tau_y$ , где  $v$  – скорость движения цели;  $\tau_y = \tau_p + t$  – упредительное время.

Треугольник  $OA_0A_y$  называется упредительным треугольником.

Так как при стрельбе с РПК и синхронной передачей данных на орудия работное время  $\tau_p$  равно нулю, то орудия батареи всегда готовы к производству выстрела и, следовательно, линейное упреждение будет  $A_yA_y$ , а упредительное время  $\tau_y$  равно полётному времени  $t$ .

Чтобы направить снаряд в упреждённую точку, необходимо знать её упреждённые геометрические координаты, по которым определяются установки орудия. Упреждённую точку иногда называют точкой встречи, а определение её места называют решением задачи встречи.

Текущие координаты цели определяются в результате слежения за ней РЛС или оптических приборов. Определение величины и направления вектора скорости цели, решение задачи встречи и определение установок орудия производится непрерывно приборами управления артиллерийским зенитным РПК. Полученные установки – упреждённый азимут, угол возвышения передаются непрерывно синхронной передачей на орудия; таким образом, орудия всегда направлены в упреждённую точку. В батареях малого калибра стрельба ведётся назначенными очередями или непрерывным огнём.

**Сущность стрельбы по движущейся воздушной цели состоит в постановке ряда выстрелов (залпов), каждый из которых производится по новой упреждённой точке (по новому упреждённому положению цели) с новыми установками в расчёте на попадание и поражение цели.**

Встреча снаряда с целью в упреждённой точке возможна в том случае, когда, во-первых, траектория снаряда пройдёт через эту точку и, во-вторых, когда время полёта цели до упреждённой точки (считая это время с момента выстрела) будет равно времени полёта снаряда.

Подготовка первого выстрела (залпа) начинается с момента поимки цели оптическими приборами или начала сопровождения её РЛС и заканчивается в момент окончания наводки орудий. Во время, отводимое на подготовку, включается время входа РПК в установленный режим работы.

При стрельбе с РПК подготовка последующих выстрелов производится непрерывно. Весь процесс подготовки первого и последующих выстрелов можно подразделить на следующие этапы:

1. Определение координат текущего положения цели и её параметров.
2. Определение положения цели в момент выстрела.
3. Решение задачи встречи.

При стрельбе поражение цели достигается попаданием осколков снаряда, разрывающегося в момент действия взрывателя. Поражение цели может достигаться целым снарядом (ударное действие) или его фугасным действием, но вероятность прямого попадания в цель или разрыва снаряда в непосредственной близости от самолёта сравнительно мала.

Зенитная артиллерия всех калибров ведёт стрельбу по воздушным целям без пристрелки; каждый залп, очередь или выстрел рассчитывается на поражение цели.

### **§ 1.3. Координаты положения воздушной цели и параметры ее движения**

#### **Общие сведения. Плоские системы координат**

Из геометрии известно, что положение точки на плоскости определяется двумя координатами и может быть определено как в *полярной*, так и в *прямоугольной* системе координат.

*Полярная система координат* используется в зенитной артиллерии, например, для целеуказаний на местности, по карте, вычерчивания графиков. За основное направление принимается направление на север и отсчет углов ведется по направлению движения часовой стрелки. Точка, принимаемая за начало отсчета, называется началом координат.

Возьмем на плоскости точку  $O$  и прямую  $OL$  (рис. 2, а); тогда положение любой точки  $M$  на плоскости определится двумя величинами, а именно: расстоянием  $r$ , выражающим (в принятом масштабе) длину отрезка  $OM$ , и углом  $\beta$ , образующим прямой  $OL$  и отрезком  $OM$ .

Величины  $r$  и  $\beta$  называются полярными координатами точки  $M$ ; первая называется радиус-вектором точки  $M$ , а вторая – полярным углом. Прямая  $OL$  называется полярной осью рассматриваемой системы координат, а точка  $O$  – полюсом.

Если условимся длину радиуса-вектора всегда считать положительной и полярный угол брать в пределах от  $0$  до  $360^\circ$ , то каждой точке будет соответствовать одна пара чисел  $r$  и  $\beta$  и наоборот – каждой паре чисел  $r$  и  $\beta$  будет отвечать единственная точка. Исключение составляет полюс, для которого  $r = 0$ , а  $\beta$  неопределенно.

*Прямоугольная система координат* на плоскости (рис. 2, б) представляет собой две взаимно перпендикулярные оси  $X_1X$  и  $Y_1Y$ , проходящие через точку  $O$ , называемую началом координат.

Прямые  $X_1OX$  и  $Y_1OY$  называются осями прямоугольных координат. Ось  $X_1X$  называется осью абсцисс и ось  $Y_1Y$  осью ординат. Положение точки на плоскости определяется следующим образом: для точки  $M$ , например, задается отрезок  $FM$  или  $ON$ , определяющий расстояние точки  $M$  от оси  $X$ , и отрезок  $NM$  или  $OF$ , определяющий расстояние точки  $M$  от оси  $Y$ . Абсцисса и ордината называются координатами точки. Каждой точке на плоскости отвечает пара координат, и наоборот, каждой паре координат  $x$  и  $y$  отвечает единственная точка.

Необходимо иметь ввиду, что в топографии за положительное направление оси  $X$  принято считать направление на север, а за отрицательное – на юг, за положительное направление оси  $Y$  – на восток, а за отрицательное – на запад.

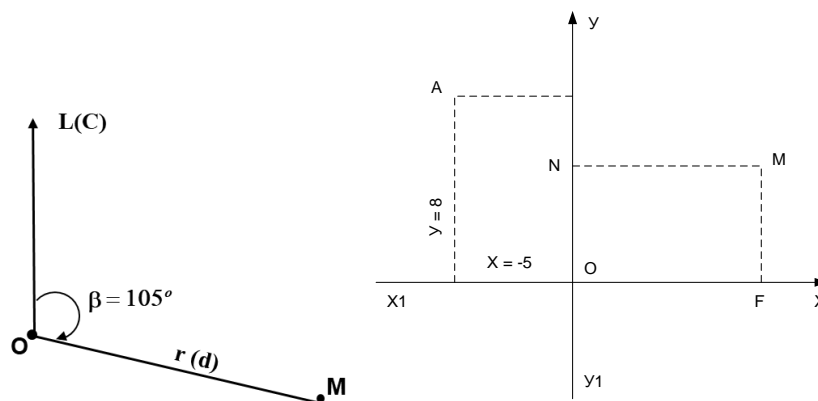


Рис. 2. Системы координат:  
а – полярная, б – прямоугольная

Прямоугольная система координат применяется при топографических работах (нанесение на карту или схему боевого порядка батареи и определение расстояний между его элементами), при определении по карте или планшету координат цели, при стрельбе по наземным целям с закрытых огневых позиций, вычерчивании графиков и др.

### Системы координат воздушной цели

Для стрельбы по воздушным целям необходимо определить то место пространства, где цель находится в данный момент. Величины, которые определяют положение цели в пространстве относительно РЛС (орудия, установки или наблюдателя), называются **координатами цели**.

Для определения положения цели в пространстве в войсках ПВО СВ применяют следующие координаты – наклонную дальность  $D$ , горизонтальную дальность  $d$ , высоту  $H$ , угол места  $\epsilon$  и азимут  $\beta$  (рис. 3).

Положение точки в пространстве определяется системой из трех независимых координат. В зенитной артиллерии наиболее часто применяется *сферическая, коническая, цилиндрическая, прямоугольная и параметрическая* системы координат.

На рис. 4 точкой  $A$  обозначена цель. За начало координат принимают точку стояния РЛС (орудия) – точку  $O$ . Наклонная и горизонтальная дальность, а также высота являются линейными координатами, а угол места и азимут – угловыми. Дадим определения этим координатам.

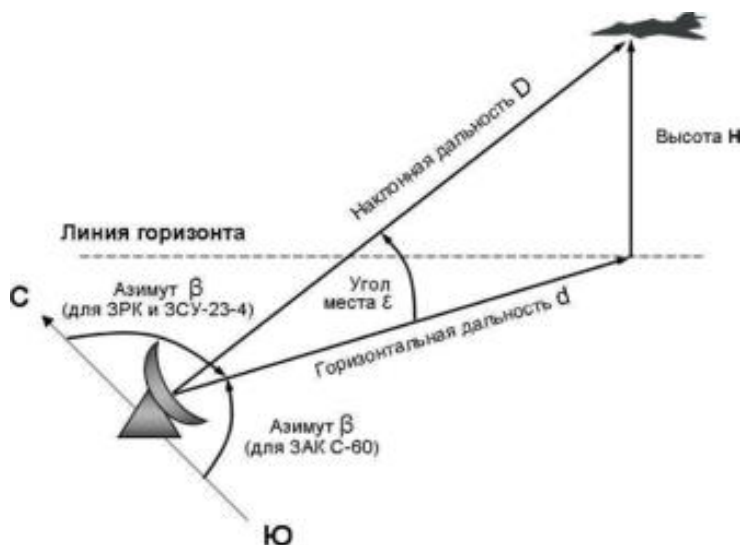


Рис. 3. Координаты положения воздушной цели

**Наклонная дальность ( $D$ )** – расстояние от РЛС до цели.

**Высота ( $H$ )** – расстояние от цели до горизонта РЛС (орудия) по вертикали.

**Горизонтальная дальность ( $d$ )** – проекция наклонной дальности на горизонт РЛС (орудия) или расстояние от РЛС (орудия) до проекции цели на горизонт.

**Угол места ( $\epsilon$ )** – угол между линией цели (визирования) и её проекцией на горизонтальную плоскость.

**Линия цели (линия визирования)** – прямая, соединяющая РЛС (орудие) с целью.

**Азимут (зенитный) ( $\beta$ )** – угол в горизонтальной плоскости между направлением на север и проекцией линии цели на горизонт, отсчитываемый по ходу часовой стрелки (для ЗСУ-23-4 и ЗУ-23). Артиллерийский азимут (для С-60) – отсчитывается против часовой стрелки от направления на Юг. Определяются оптическими приборами (буссолью, визирами и другими приборами наблюдения).

Азимут называют истинным пеленгом цели, если отсчет производится от северного меридиана, или курсовым углом (КУ), если направлением отсчета служит продольная ось машины.

Рассмотрим системы координат, применяющиеся в зенитной артиллерии.

### Сферическая система координат

Местоположение объекта (цели) характеризуется положением центра объекта (его центра масс) в некоторой опорной системе координат. При радиолокационном определении местоположения наиболее часто применяют местную горизонтальную сферическую систему координат, начало которой находится в точке размещения антенны РЛС. Если цель точечная, то ее положение в пространстве полностью определяется тремя координатами.

Система, в которой используются три координаты: наклонная дальность, угол места и азимут ( $D$ ,  $\epsilon$ ,  $\beta$ ), носит название **сферической системы** (рис. 4).

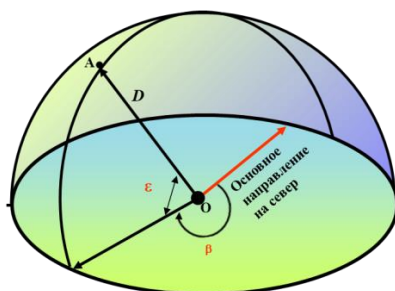


Рис. 4. Сферическая система координат

Система называется сферической потому, что все точки, имеющие одну и ту же наклонную дальность, но разные азимуты и углы места, лежат на поверхности сферы, центр которой находится в начале координат, а радиус равен наклонной дальности. *Сферическая система координат* может использоваться для решения задач автономного поиска целей в радиолокационных средствах ЗАК, при их самостоятельном ведении боевых действий (без выдачи целеуказания с ПУ-12).

### Коническая система координат

**Коническую систему координат** (рис. 5) составляют азимут, угол места и высота ( $\beta$ ,  $\epsilon$ ,  $H$ ). При пересечении вертикальной плоскостью  $B$ , определяемой азимутом  $\beta$ , конической поверхности  $U$ , задаваемой углом места цели  $\epsilon$ , образуется линия  $OE$ . Горизонтальная плоскость  $T$ , определяемая высотой  $H$ , пересекает линию  $OE$  в точке  $A$ . Эта точка и является положением цели. Высота  $H$  определяется по измеренной наклонной дальности  $D$  и углу места  $\epsilon$  по формуле  $H = D \sin \epsilon$ .

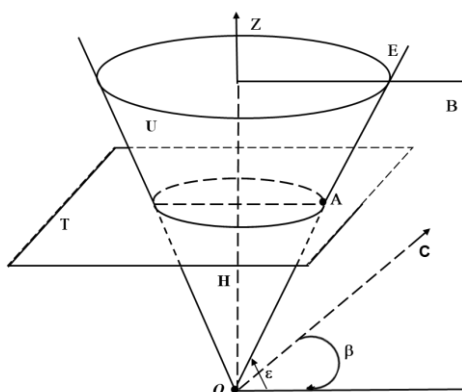


Рис. 5. Коническая система координат

### Цилиндрическая система координат

Наряду со сферической системой координат в радиолокации применяют **цилиндрическую систему** с координатами (рис. 6): азимут, горизонтальная дальность и высота ( $\beta, d, H$ ).

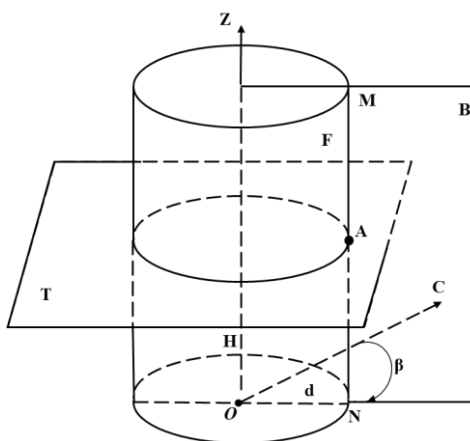


Рис. 6. Цилиндрическая система координат

При пересечении вертикальной плоскости  $B$ , определяемой азимутом  $\beta$ , с боковой поверхностью цилиндра  $F$  образуется вертикаль  $NM$ . Горизонтальная плоскость  $T$ , определяемая высотой  $H$ , пересекает вертикаль в точке  $A$ . Эта точка и является положением цели. В этой системе координат горизонтальная дальность определяется по наклонной дальности  $D$  и углу места  $\epsilon$  по формуле:  $d = D \cos \epsilon$ .

При решении задачи встречи возникает необходимость перехода от одной системы координат к другой. Например, текущие координаты цели  $D, \epsilon, \beta$  составляют сферическую систему координат, а для использования таблиц стрельбы удобнее использовать цилиндрическую систему  $\beta, d$  и  $H$ .

В прямоугольном треугольнике  $OAA$  (рис. 7) все четыре величины  $H, D, d$  и  $\epsilon$  составляют его элементы. Решая этот треугольник, можно найти зависимость между координатами различных систем. Формулами перехода будут:  $H = D \sin \epsilon$ ;  $H = d \operatorname{ctg} \epsilon$ ;  $d = D \cos \epsilon$ ;  $D = H / \sin \epsilon$ ;  $d = H \operatorname{ctg} \epsilon$ ;  $D = d / \cos \epsilon$ .

### Прямоугольная система координат

**Прямоугольную систему координат** (рис. 7) составляют независимые координаты: абсцисса  $x$ , ордината  $y$ , и аппликата  $z$  ( $x, y, z$ ). За начало системы координат принимают точку стояния прибора (орудия)  $O$ . Направление осей координат следующие:

- $X$  – восток – запад (В–З);
- $Y$  – юг – север (Ю–С);
- $Z$  – совпадает с направлением высоты  $H$ .

Задавшись некоторыми значениями координат  $x, y, z$ , получим в пространстве точку  $A$ . Эта точка и является положением цели.

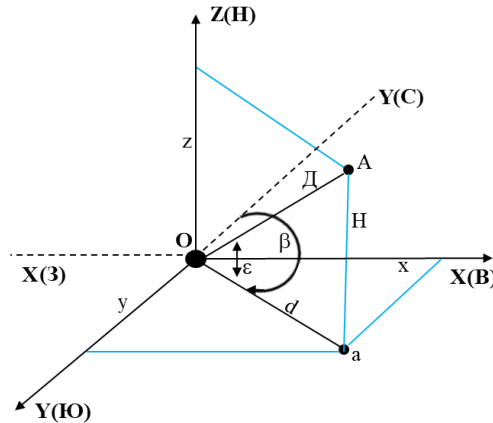


Рис. 7. Прямоугольная система координат

Из треугольника  $OaA$  и треугольников, расположенных на плоскости  $XOY$  можно установить зависимости между координатами прямоугольной системы и координатами ранее рассмотренных систем:

$$x = Oa \sin \beta = d \sin \beta; \quad y = Oa \cos \beta = d \cos \beta;$$

так как  $d = H \operatorname{ctg} \epsilon = D \operatorname{cosec} \epsilon$ ; то  $x = H \operatorname{ctg} \epsilon \sin \beta$ ;  $y = H \operatorname{ctg} \epsilon \cos \beta$ ;  $z = H$ .

Преимущество прямоугольной системы координат перед другими системами заключается в том, что координатные оси сохраняют постоянное направление, кроме того, составляющие вектора скорости цели по осям координат в случае прямолинейного и равномерного движения цели остаются постоянными.

Вышеперечисленные системы координат нашли широкое применение в зенитных комплексах войск ПВО СВ. В частности, сферическая система координат применяется в радиолокационных станциях ЗСУ-23-4 «Шилка» и ЗАК С-60. Прямоугольная система координат используется в работе счетно-решающего прибора этих комплексов для решения задачи встречи снаряда с целью.

### Параметры движения цели

При стрельбе по воздушным целям, кроме текущих координат цели, необходимо знать её скорость и направление полета. Величины, которые определяют скорость и курс цели в данный момент, называются **параметрами движения цели**.

К основным параметрам движения цели относятся (рис. 8):

**Горизонтальная (путевая) скорость цели  $V_r$**  – скорость полета цели относительно земли.

**Путевой угол  $Q$**  (азимут курса цели  $\beta_k$ ) – угол в горизонтальной плоскости между основным направлением и тем направлением, откуда летит цель, отсчитываемый по ходу часовой стрелки.

**Курсовой угол  $q$**  (угол курса цели  $q_k$ ) – угол в горизонтальной плоскости между проекцией курса цели и горизонтальной дальностью. Курсовые углы отсчитываются от 0 до 180°. Если курс цели проходит через орудие (установку, РЛС или наблюдателя) и цель приближается, то ее курсовой угол равен 0°, если удаляется – 180°.

**Курсовой параметр  $P$**  – кратчайшее расстояние между проекцией курса цели и точкой стояния орудия (установки, РЛС или наблюдателя).

**Угол пикирования (кабрирования)  $\lambda$**  – угол между горизонтальной плоскостью и направлением движения (курсом) цели в вертикальной плоскости. Угол считается положительным при кабрировании и отрицательным при пикировании цели. При горизонтальном полете цели угол  $\lambda$  равен нулю.

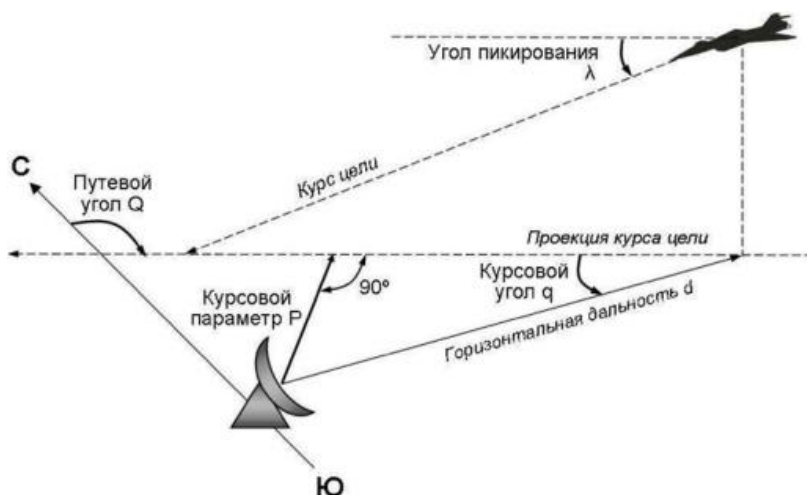


Рис. 8. Параметры движения цели

Для характеристики курса цели нужно дополнительно указывать, куда движется цель – вправо или влево относительно батареи. Кроме того, необходимо еще указывать, приближается ли цель или удаляется, т. е. движется ли цель до курсового параметра или после него. Чтобы определить величины и направления вектора скорости цели достаточно знать три независимых параметра из перечисленных выше. Сочетание трех параметров, определяющих величину и направления вектора скорости цели, называется системой параметров. На рис. 9 представлена параметрическая (курсовая) система.

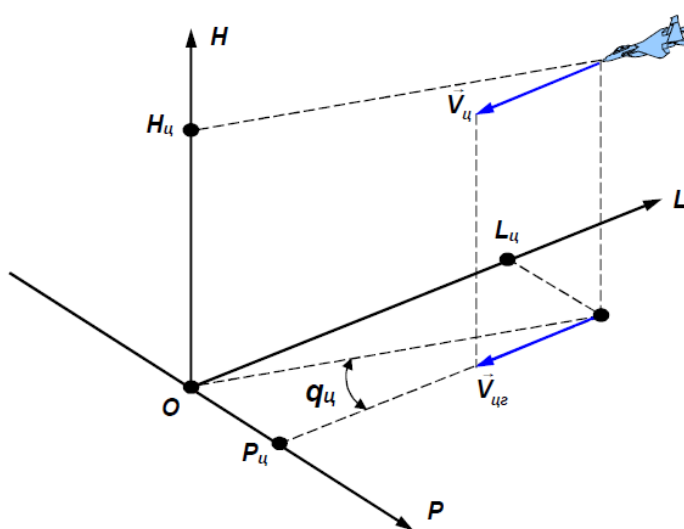


Рис. 9. Параметрическая (курсовая) система координат

В параметрической (курсовой) системе координат  $(L, P, H)$  может осуществляться определение границ зоны поражения ЗАК и упрежденной точки встречи с целью (решение задачи встречи).

### § 1.4. Измерение углов в зенитной артиллерии

Проведение расчетов при подготовке стрельбы и в ходе ее ведения непосредственно связано с необходимостью измерения углов. При решении подобных задач в геометрии пользуются общепринятыми единицами измерения – градусами, минутами и секундами. Однако данные единицы измерения в артиллерии неудобны, так как решение прикладных задач сводится в большинстве случаев к решению треугольников, что требовало бы постоянного использования таблиц тригонометрических функций, вследствие чего проведение расчетов в полевых условиях становится громоздким и неудобным, поэтому в артиллерии применяют особую меру углов. На всех артиллерийских приборах, их узлах и механизмах, предназначенных для измерения или установки углов (орудийной панораме и прицеле, кольцах буссоли, дальномере, сетке бинокля и перископа), имеются шкалы, нарезанные в специальных угловых мерах, называемых «делениями угломера» или «тысячными».

Сущность измерения углов заключается в следующем. За единицу измерения (меру углов) в стрелковой практике принимают центральный угол, длина дуги которого равна 1/6000 части длины окружности (рис. 10). Эту угловую единицу называют *делением угломера* или *тысячной*.

Как известно из геометрии, длина окружности равна  $2\pi R$ , или  $6,28R$  ( $R$  – радиус окружности). Если окружность разделить на 6000 равных частей, то каждая такая часть будет равна:

$$t = \frac{C}{6000} = \frac{2\pi R}{6000} = \frac{6,28}{6000} R = 0,001R.$$

Длина дуги, соответствующая этому углу, равна 1/955 (округленно 1/1000) длины радиуса этой окружности. Поэтому деление угломера обычно называют *тысячной* и условно обозначают –  $t$ . Относительная ошибка, которая получается при этом округлении, равна 4,5 %, или округленно 5 %, т. е. тысячная на 5 % меньше деления угломера. На практике этой ошибкой пренебрегают.

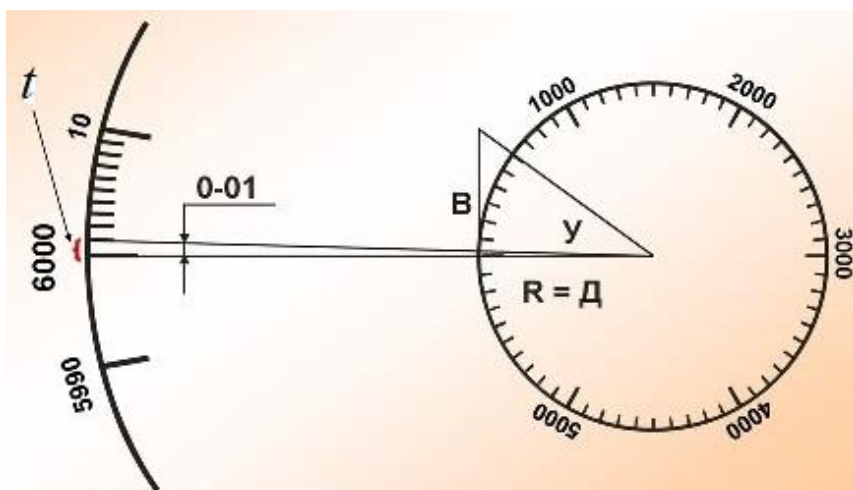


Рис. 10. Сущность угловой меры в тысячных

При измерении углов в тысячных принято называть и записывать отдельно сначала число сотен тысячных, а затем десятков и единиц, например: 13-15, 1-10. Произносить необходимо: «Тринадцать пятнадцать»; «один десять».

Таким образом, длина 1/6000 части окружности, т. е. цена деления угломера, округленно равна одной доле дальности до наблюдаемого объекта:

$$t = \frac{D}{1000} = 0.01.$$



Мерой углов здесь служит линейный отрезок, равный тысячной доле дальности до наблюдаемого объекта. Между делениями угломера в тысячных и градусной системой отсчета углов существует зависимость:

$$0-01 = \frac{260^{\circ} \cdot 60'}{6000} = \frac{21600'}{6000} = 3,6';$$

$$1-00 = 3,6' \cdot 100 = 360' = 6^{\circ}.$$

При решении ряда задач в артиллерии часто возникает необходимость знать линейные или угловые размеры цели, а также дальности до целей или расстояние между ними. В практике стрельбы радиус окружности  $R$  отождествляется с дальностью  $D$  до местного предмета (цели), когда центр окружности совмещен с точкой наблюдения. Тогда с достаточной степенью точности можно считать, что если предмет (цель) наблюдается под углом в одно деление угломера, то его линейная величина равна одной тысячной дальности наблюдения.

На практике для вычисления приближенных значений используется *формула тысячной*, которая вытекает из решения прямоугольного треугольника:

$$\frac{B}{D} = Y \cdot \frac{1}{1000},$$

где  $D$  – расстояние (дальность) до предмета в метрах;  $Y$  – угол, под которым виден предмет в тысячных;  $B$  – линейные размеры наблюдаемого предмета в метрах, т. е. длина хорды, а не дуги. При малых углах (до  $15^{\circ}$ ) разница между длиной дуги и хорды не превышает одной тысячной, поэтому при практической работе они считаются равными.

Формула тысячной трансформируется в зависимости от того, какая величина подлежит оценке:

- при определении расстояний:  $D = \frac{1000 \cdot B}{Y}$ ;
- при оценке размеров предмета:  $B = \frac{D \cdot Y}{1000}$ ;
- при определении угла:  $Y = \frac{1000 \cdot B}{D}$ .

Полученные формулы тысячной имеют широкое применение в стрелковой практике. Рассмотрим пример расчета дальности до цели.

**Пример:** Оператор комплекса наблюдает в бинокль воздушную цель под углом равным  $Y = 0-10$ , размеры которой  $B = 20$  м. Какова наклонная дальность до цели?

**Решение:**  $D = B/Y \cdot 1000 = 20/10 \cdot 1000 = 2000$  м.

Деление угломера (тысячная) позволяет легко переходить от угловых единиц к линейным и обратно, так как длина дуги, соответствующая делению угломера, на всех расстояниях равна одной тысячной длины радиуса, равного дальности стрельбы. Углу в одну тысячную соответствует дуга, равная на расстоянии 1000 м – 1 м (1000 м : 1000), на расстоянии 500 м – 0,5 м (500 : 1000), на расстоянии 250 м – 0,25 м (250 : 1000) и т. д. (рис. 11).

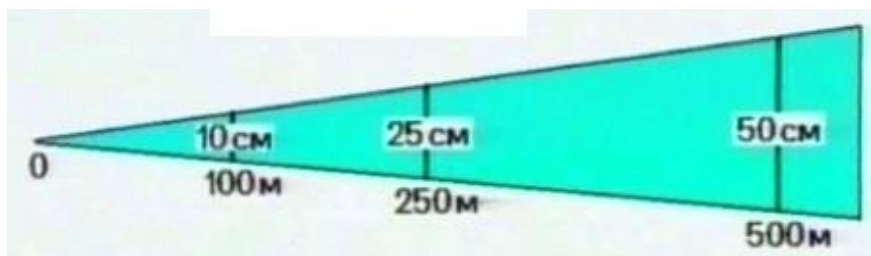


Рис. 11. Соотношение угловых и линейных величин

При решении некоторых задач возникает необходимость перевода углов, рассчитанных в делениях угломера, в градусную меру и наоборот. Так как окружность содержит  $360^\circ$  или  $360 \times 60 = 21600'$ , то одно малое деление угломера равно  $3,6'$ , а одно большое деление угломера  $3,6 \times 100 = 360' = 6^\circ$ , следовательно,  $1^\circ = 0-16,6 \approx 0-17$ . Из этих соотношений следует:

- $360^\circ = 60-00 \ 1-00 = 6^\circ$
- $180^\circ = 30-00 \ 0-01 = 3,6'$
- $90^\circ = 15-00 \ 0-02 = 7,2'$
- $45^\circ = 7-50$  и т. д.

**Пример № 1.** Перевести  $66^\circ 36'$  в деления угломера.

Решение:

1.  $36' / 60 = 0,6^\circ$ ;
2.  $66,6^\circ / 6 = 11,1$  (б. д. у.) = 11-10.

**Пример № 2.** Перевести  $242^\circ 45' 15''$  в деления угломера.

Решение:

1.  $15'' / 60 = 0,25'$ ;  $242^\circ 45' 15'' = 242^\circ 45,25'$ ;
2.  $45,25' / 60 = 0,75417^\circ$ ;  $242^\circ 45' 15'' = 242,75417^\circ$ ;
3.  $242,75417^\circ / 6 = 40,4590 = 40-45,9 = 40-46$ .

**Пример № 3.** Перевести 18-05 в градусы, минуты и секунды.

Решение:

1.  $18-05 = 18,05 \times 6 = 108,3^\circ$ ;
2.  $0,3 \times 60' = 18'$ ;
3.  $18-05 = 108,3^\circ = 108^\circ 18'$ .

**Пример № 4.** Перевести 29-54 в градусы, минуты и секунды.

Решение:

1.  $29-54 = 29,54 \times 6^\circ = 177,24^\circ$ ;
2.  $0,24 \times 60' = 14,4'$ ;  $177,24^\circ = 177^\circ 14,4'$ ;
3.  $0,4' \times 60'' = 24''$ ;  $177^\circ 14,4' = 177^\circ 14' 24''$ ;
4.  $29-54 = 177^\circ 14' 24''$ .

Измерение углов в делениях угломера (тысячных) может производиться: угломерным кругом буссоли, сеткой бинокля и перископа, артиллерийским кругом (на карте), целиком прицела, механизмом боковых поправок снайперского прицела и подручными предметами. Точность углового измерения с помощью того или иного прибора зависит от точности его шкалы.

## Раздел 2. Основные сведения из внутренней и внешней баллистики

### § 2.1. Понятие о явлении выстрела

В основе выстрела из орудия, связанного с полетом снаряда и разрушением цели, лежит энергия, необходимая для сообщения снаряду скорости.

Для того, чтобы забросить снаряд на значительное расстояние за минимальное полетное время (последнее важно для зенитной артиллерии), необходимо придать снаряду большую энергию движения, которая называется кинетической энергией и выражается половиной произведения массы снаряда на квадрат его скорости, т. е.

$$E = mv^2/2.$$

Метательные взрывчатые вещества или пороха могут быть разделены на две основные группы:

1. Пороха – механические смеси.
2. Бездымные, или коллоидные, пороха.

К порохам первой группы относится черный (дымный) порох, и представлял собой механическую смесь, состоящую, как правило, из 75 % селитры, 10 % серы и 15 % угля.

Исходным продуктом для получения всех порохов коллоидного типа является пироксилин. Более сильными являются пироксилины, содержащие большой процент азота.

Весь процесс от зажигания пороха и до полного его сгорания, обычно изучается внутренней баллистикой.

**Баллистикой** называют науку о движении снаряда. Слово баллистика происходит от греческого βαλλω (балло), что значит – мечу, бросаю. По характеру изучаемых явлений баллистику разделяют на внутреннюю и внешнюю.

**Внутренняя баллистика** изучает горение, работу пороха и движение снаряда в канале ствола от момента воспламенения пороха, до вылета снаряда из канала ствола.

**Внешняя баллистика** изучает явления, сопровождающие движение снаряда после того, как на него перестали действовать пороховые газы. Практически после вылета снаряда из канала ствола пороховые газы на некотором участке еще продолжают действовать на снаряд, увеличивая его скорость. Это явление называется последствием пороховых газов.

У дульного среза орудия принимают фиктивную начальную скорость, определяемую с учетом последствия пороховых газов, и считая, что область внешней баллистики начинается от дульного среза орудия. Центр дульного среза является начальной точкой траектории.

Под **выстрелом** во внутренней баллистике понимают процесс горения пороха боевого заряда, движение массы газов и движение снаряда под действием пороховых газов в канале ствола и на небольшом удалении от дульного среза.

При выстреле энергия пороха боевого заряда превращается в кинетическую энергию движения снаряда. Несмотря на кратковременность выстрела и динамический характер происходящих процессов, выстрел подчиняется определенным законам и имеет сложные зависимости между различными факторами, характеризующими это явление. В явлении выстрела различают **четыре периода**.

#### 1. Предварительный период

Первое время горение пороха происходит при неизменном объеме, так как давление недостаточно для срагивания снаряда с места. В орудиях с новым стволом это давление определяется силой, необходимой для врезания ведущего пояска снаряда в нарезки ствола, и составляет в зависимости от профиля нарезки, формы и размеров ведущего пояска 250–500 атм. Давление, необходимое для полного врезания ведущего пояска, называется давлением форсирования.

Период, в течение которого происходит горение пороха боевого заряда при неподвижном снаряде, называют предварительным периодом выстрела.

## 2. Первый (основной) период

Первый период начинается в тот момент, когда будет достигнуто давление форсирования, и снаряд начнет движение.

В его начале скорость движения снаряда небольшая и приток пороховых газов в заснарядном пространстве преобладает над увеличением заснарядного пространства. Это приводит к быстрому нарастанию давления пороховых газов. В течение первого периода выстрела пороховые газы совершают большую часть полезной работы (70–75 %), поэтому первый период и называется основным.

Когда снаряд пройдет в канале ствола расстояние, равное 0,5–0,8 длины нарезной части, заканчивается горение пороха боевого заряда, что соответствует концу первого периода.

## 3. Второй период

В течение второго периода приток новых порций газа отсутствует. По мере движения снаряда давление в канале ствола уменьшается, но на снаряд вследствие упругости пороховых газов продолжает действовать выталкивающая сила, увеличивающая скорость снаряда. По мере приближения снаряда к дулу величина ускорения постепенно уменьшается.

К моменту вылета снаряда из канала ствола, когда дно снаряда проходит дульный срез, снаряд имеет дульную скорость  $v_D$ . Давление пороховых газов в этот момент составляет 500–900 атм. Вылетом снаряда из канала ствола заканчивается второй период выстрела.

## 4. Третий период

После вылета из канала ствола выходящая вслед за снарядом масса газа продолжает действовать на снаряд, сообщая ему дополнительную скорость. По мере удаления снаряда от дульного среза последствие газов на снаряд ослабевает, но увеличение скорости снаряда происходит до тех пор, пока сила давления пороховых газов на дно снаряда не станет равной силе сопротивления воздуха, действующей на снаряд.

Период действия пороховых газов на снаряд после его вылета из канала ствола называется третьим периодом, или периодом последствия.

К концу периода последствия газов снаряд приобретает максимальную скорость.

**Начальная скорость  $v$**  – скорость движения снаряда у дульного среза ствола. За начальную скорость принимается условная скорость, которая несколько больше дульной и меньше максимальной. Она определяется опытным путем с последующими расчетами.

Увеличение *начальной скорости* снаряда за счет уменьшения веса снаряда имеет свой предел. Кроме того, уменьшение веса снаряда приводит к более быстрому уменьшению скорости снаряда на траектории и уменьшению дальности стрельбы. При проектировании орудий выбирается наиболее выгодное сочетание характеристик, тактико-технических требований и технологических возможностей.

### § 2.2. Силы, действующие на снаряд при его движении в воздухе

Внешняя баллистика изучает движение снаряда, исходя из предположения, то снаряд вращается вокруг своей оси и что на него действуют две силы:

1. Сила тяжести, равная весу снаряду  $q$ .
2. Сила сопротивления воздуха  $R$ .

Основной задачей внешней баллистики является изучение и установление законов движения снарядов в воздухе с учетом влияния меняющихся условий стрельбы на характер движения и использование установленных законов для практических надобностей.

Решение основных задач внешней баллистики сводится к нахождению элементов снаряда в различных точках его пути. К таким элементам относятся: геометрические координаты снаряда, время его полета, скорость в данной точке, наклон траектории и др. Эти элементы

сводятся в таблицы, называемые баллистическими. Баллистические таблицы составляются для определенных условий, которые называют нормальными или табличными. Для учета отклонений условий стрельбы от нормальных составляются поправочные таблицы или поправочные зависимости.

Снаряд, брошенный из точки  $O$  под углом бросания  $\theta_0$  и с начальной скоростью  $v_0$ , по закону инерции стремится сохранить прямолинейное и равномерное движение, направленное по линии бросания. Сила тяжести  $q$ , сообщая снаряду ускорение вертикально вниз на величину  $gt^2/2$ , в результате чего снаряд, описав криволинейный путь, за время  $t$  придет в точку  $M$  (рис. 12).

В воздухе кроме силы тяжести  $q$ , на полет снаряда влияет еще и сила сопротивления воздуха  $R$ , называемая иначе *аэродинамическим* (воздушным) сопротивлением. Причинами возникновения аэродинамического сопротивления являются:

- вязкость воздушной среды;
- инерция тех частиц воздуха, которые вынуждены изменять свое положение, огибая движущийся снаряд.

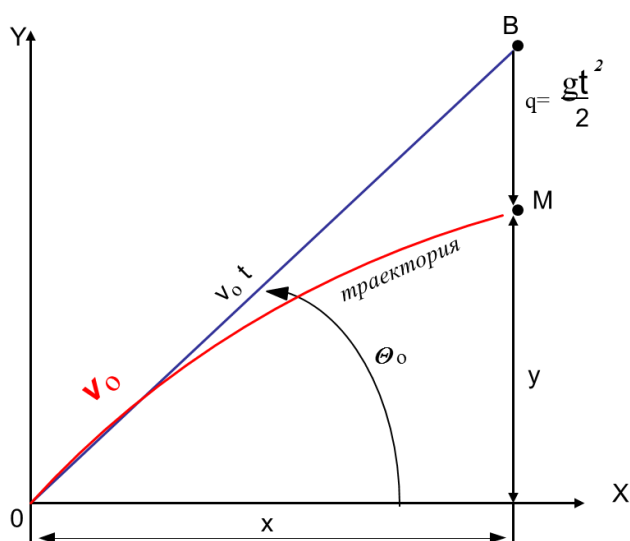


Рис. 12. Движение снаряда под действием силы тяжести при начальной скорости  $V_0$

Вязкостью, или внутренним трением, называется способность воздуха оказывать сопротивление сдвигу одного слоя по отношению к другому. Физика объясняет вязкость воздуха следующим образом. Вязкость воздуха зависит от его температуры. С повышением температуры скорость молекулярного движения возрастает, вследствие чего вязкость увеличивается.

Инерцией (или инертностью) называется свойство тел сохранять состояние покоя или прямолинейного равномерного движения. Сила инерции зависит от массы тела: чем больше масса, тем больше инерция, и наоборот.

Сила сопротивления воздуха зависит от следующих факторов:

- скорость снаряда;
- калибр и форма снаряда;
- метеорологических условий;
- высота полёта снаряда над горизонтом орудия.

Следует заметить, что такие факторы, как метеорологические условия, определяющие собой состояние атмосферы на данной высоте и в данный момент времени, могут достаточно быстро измениться, что на практике приводит к ошибкам стрельбы. Поэтому одним из важнейших условий, обеспечивающих точность стрельбы, является наиболее полное получение данных о метеорологических условиях на всей траектории снаряда. Кроме перечисленных

факторов, существенное влияние на величину силы сопротивления воздуха оказывает вращательное движение снаряда. Величина вращательного движения является переменной и зависит от того, в какой точке траектории находится снаряд, а с другой стороны – от формы самой траектории, определяемой углом возвышения.

Изменением баллистических свойств снаряда – калибра, веса и формы, можно увеличить дальность стрельбы:

- приданием оптимальной баллистической формы;
- увеличением веса снаряда.

Снаряд более крупного калибра выгоднее, так как при прочих равных условиях у него лучший баллистический коэффициент, что приводит к увеличению дальности стрельбы и уменьшению времени полета снаряда. Если через центр массы снаряда  $C$  провести горизонтальную ось, перпендикулярную плоскости стрельбы, то большая часть поверхности, подверженной прямому воздействию воздушного потока, будет расположена выше этой оси.

Из рис. 13 видно, что угол встречи  $\mu$  составленный струями воздушного потока и касательными к соответствующим точкам поверхности снаряда, в головной части больше, чем в цилиндрической. Вследствие этого направление равнодействующей силы сопротивления воздуха  $R$  составляет с осью снаряда угол  $\gamma$ , который по своей величине несколько больше угла нутации  $\delta$ .

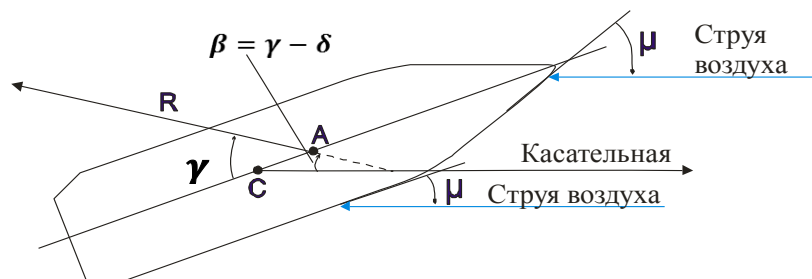


Рис. 13. Точка приложения и направление действия силы сопротивления воздуха

Углом нутации  $\delta$  называется угол, образующийся между осью снаряда и направлением его движения.

С касательной к траектории вектор силы  $R$  образует небольшой угол  $\beta = \gamma - \delta$ . В этом случае сила сопротивления воздуха будет не только тормозить движение снаряда, но и нарушать устойчивость его оси. Снаряд будет лететь, кувыркаясь, что крайне невыгодно, так как при этом возрастает сила сопротивления воздуха и, следовательно, уменьшается дальность.

Чтобы устранить эффект опрокидывания можно:

- уменьшить длину снаряда, что ухудшает его баллистические свойства и уменьшает мощность заряда, а это невыгодно.
- придать снаряду быстрое вращательное движение вокруг своей оси, с помощью нарезов на канале ствола при этом снаряд приобретает свойства гироскопа.

На основании рассмотренных явлений можно отметить некоторые положения, применимые к любому симметричному телу, быстро вращающемуся вокруг своей оси. Они распространяются и на вращающийся продолговатый снаряд, а именно:

- центр массы снаряда перемещается с большой скоростью по криволинейной траектории;
- плоскость силы, вызывающей прецессию, проходит через ось снаряда и через касательную к траектории (прецессия – конусообразное движение продольной оси вращающегося артиллерийского снаряда относительно касательной к траектории);
- касательная к траектории не сохраняет своего направления в пространстве, как вертикаль, а непрерывно понижается.

Угол между осью снаряда и динамической осью вращения снаряда (рис. 14) называется углом прецессии  $\nu$ . Скорость прецессии во много раз меньше скорости вращения снаряда.

Ось медленного конического движения (прецессии) называется динамической осью вращения. Ось вращающегося снаряда, поворачивается вслед за касательной.

Такое направление силы сопротивления воздуха в сочетании с гироскопическим эффектом при правой нарезке ствола приводит к смещению динамической оси вправо от касательной.

Прецессия снаряда вместе с двумя другими видами движения нутацией снаряда и собственным вращением приводит к боковому отклонению снаряда в полете.

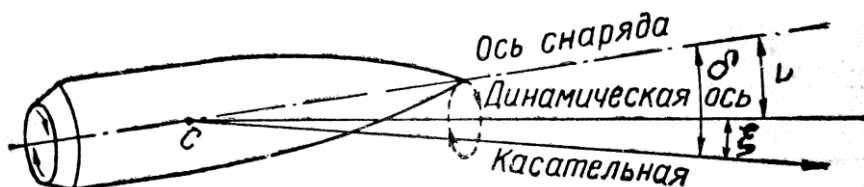


Рис. 14. Коническое движение снаряда вокруг динамической оси

Боковое отклонение продолговатого снаряда от плоскости бросания, вызываемое вращательным движением снаряда в воздухе, называется **деривацией**.

Она направлена в ту сторону, куда вращается снаряд (при правой нарезке – вправо, а при левой – влево), и определяется опытным путем у точки падения (встречи, разрыва); линейная величина деривации  $Z_c$  выражается в метрах, а угловая  $Z$  – в делениях угломера. Благодаря деривации траектория продолговатого вращающегося снаряда в воздухе становится кривой двойкой кривизны (рис. 15).

При составлении таблиц стрельбы все данные рассчитываются для плоской траектории (без учета деривации), деривация же дается в виде боковой поправки (в делениях угломера).

Траекторией называется кривая, описываемая центром масс снаряда при его движении в воздухе.

Траектория, построенная по опытным точкам, полученным стрельбой, называется **опытной траекторией**.

Траектория, полученная путем теоретических расчетов, называется **расчетной траекторией**.

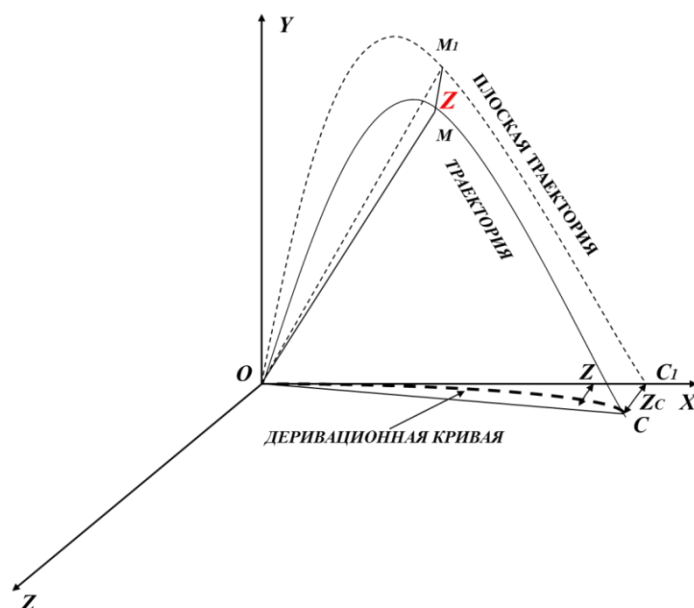


Рис. 15. Траектория – кривая двойкой кривизны

### Общие свойства траектории в воздухе (рис. 16)

1. Траектория снаряда в воздухе представляет собой кривую, несимметричную относительно своей вершины: восходящая ветвь траектории длиннее и более пологая, чем нисходящая ветвь.

2. Средняя скорость снаряда на восходящей ветви траектории больше средней скорости на нисходящей ветви; вследствие этого время полета снаряда от точки вылета до вершины траектории меньше, чем время полета от вершины до точки падения.

3. Достижимость орудия по высоте больше половины предельной дальности стрельбы по горизонту; у современных зенитных орудий высота подъема снаряда при максимальном угле возвышения составляет 69–76 % полной горизонтальной дальности.

4. Дальность стрельбы и время полета снаряда зависят:

- от угла бросания  $\theta_0$ ;
- начальной скорости  $V_0$ ;
- формы, калибра и веса снаряда;
- метеорологических условий.

5. Угол бросания  $\theta_0$ , отвечающий максимальной полной горизонтальной дальности, зависит от начальной скорости  $V_0$  и баллистического коэффициента.

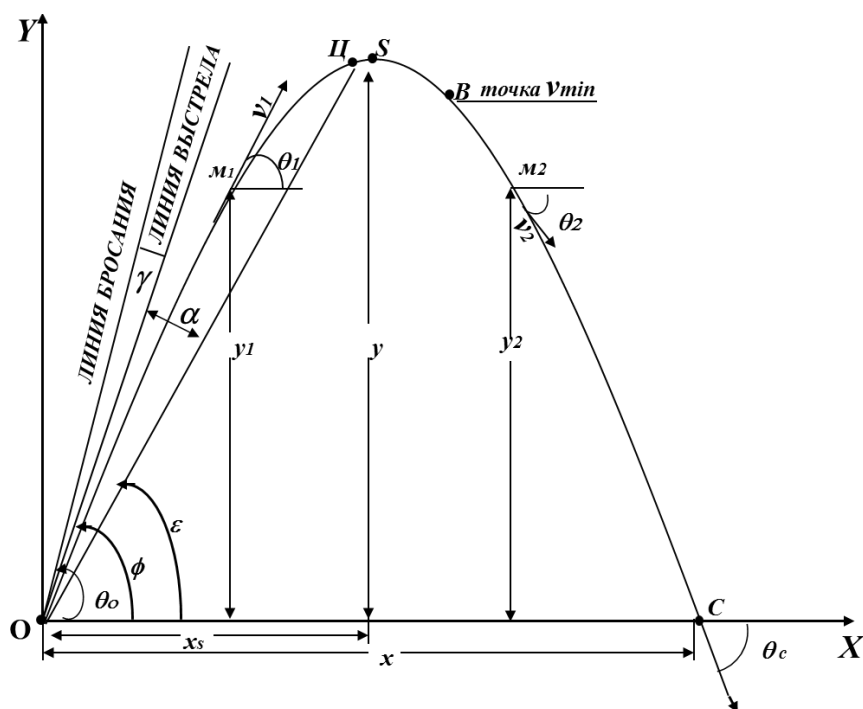


Рис. 16. Общие свойства траектории и её элементы

#### Элементы траектории в точке вылета

**Точка вылета  $O$**  – положение центра массы снаряда в момент прохождения дна снаряда через дульный срез орудия.

**Начальная скорость  $V_0$**  – скорость поступательного движения снаряда в точке вылета; практически определяется путем приведения к дулу скорости, измеренной на некотором расстоянии от дульного среза.

**Горизонт орудия** – горизонтальная плоскость, проходящая через точку вылета.

**Линия цели** – прямая, соединяющая орудие с целью.

**Угол места цели  $\varepsilon$**  – угол между горизонтом орудия и линией цели.

**Ось канала ствола** – прямая, соединяющая центры казенного и дульного срезов орудия.



**Линия выстрела** – продолжение оси канала ствола наведенного орудия перед выстрелом.

**Плоскость выстрела** (плоскость стрельбы) – вертикальная плоскость, проходящая через линию выстрела.

**Угол прицеливания  $\alpha$**  – угол в вертикальной плоскости между линией цели и линией выстрела.

**Угол возвышения  $\varphi$**  – угол, составленный линией выстрела и горизонтом орудия; измеряется от горизонта; равен алгебраической сумме углов места цели и прицеливания  $\varphi = \varepsilon + \alpha$ .

Из двух углов, составляющих угол возвышения, угол прицеливания всегда положительный, тогда как угол места цели может быть положительным, отрицательным и равным нулю. В тех случаях, когда угол места цели положительный, т. е. когда цель расположена выше горизонта орудия, угол возвышения положительный (рис. 17).

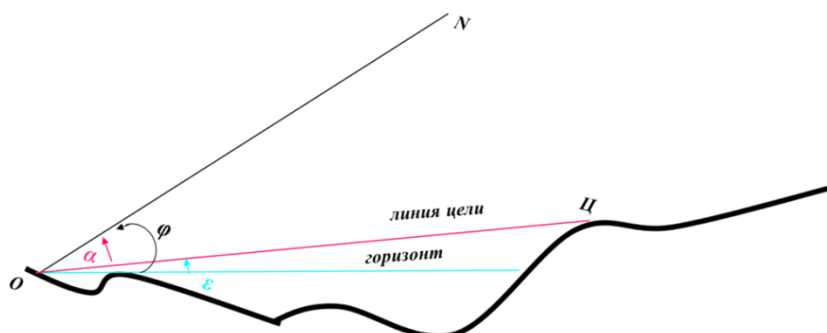


Рис. 17. Зависимость между углами места, прицеливания и возвышения.  
Угол места и угол возвышения положительные

Когда цель расположена на горизонте орудия, т. е. когда угол места цели равен нулю, угол возвышения равен углу прицеливания.

Когда цель расположена ниже горизонта орудия, но угол прицеливания по своей абсолютной величине больше угла места цели, угол возвышения продолжает оставаться положительным (рис. 18).

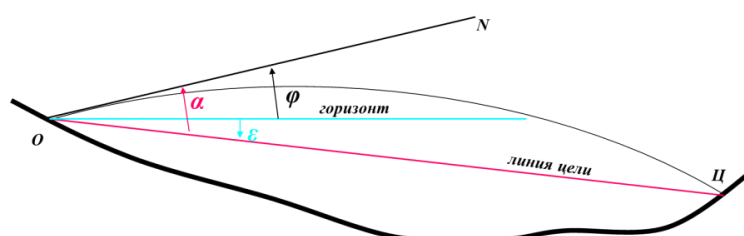


Рис. 18. Зависимость между углами места, прицеливания и возвышения.  
Угол места отрицательный, угол возвышения положительный

Когда цель расположена настолько ниже горизонта орудия, что угол прицеливания по своей абсолютной величине становится меньше угла места цели, угол возвышения имеет знак минус. Отрицательный угол возвышения называют углом склонения.

**Линия бросания** – продолжение оси канала ствола орудия в момент вылета снаряда.

**Плоскость бросания** – вертикальная плоскость, проходящая через линию бросания.

**Угол вылета  $\gamma$**  – угол, составленный линией бросания и линией выстрела; этот угол получается при отдаче вследствие упругой деформации частей лафета, несимметричного распределения откатывающихся масс, особенностей устройства системы и пр.; угол вылета может быть как положительным, так и отрицательным, вертикальным и боковым.

**Угол бросания  $\theta_0$**  – угол, составленный линией бросания с горизонтом орудия; измеряется от горизонта; равен алгебраической сумме углов возвышения и вылета:  $\theta_0 = \varphi + \gamma$ .

### **§ 2.3. Табличные условия стрельбы**

Для решения задач необходимо знать ряд величин, определяющих элементы траекторий данного снаряда при стрельбе из данного орудия. К таким величинам относятся: угол возвышения, установка дистанционного взрывателя, время полета снаряда, деривация и др.

Сборник величин, определяющих элементы траекторий данного снаряда при стрельбе из данного орудия, называется таблицами стрельбы.

К таблицам стрельбы предъявляются высокие требования в отношении их полноты и точности. Под полнотой и точностью таблиц понимается наиболее полное совпадение всех элементов траектории снаряда, применяемого при боевой стрельбе, с элементами траектории, построенной по таблицам.

Так как отдельные стрельбы могут протекать в самых разнообразных условиях, в той или иной мере влияющих на полет снаряда, а следовательно, и на элементы траекторий, то при составлении таблиц стрельбы выбираются какие-то средние условия. Эти вполне определенные условия, для которых составляются таблицы, называются нормальными, или табличными, условиями стрельбы. Для учета при стрельбе несоответствия между табличной и фактической траекториями при составлении таблиц стрельбы определяются соответствующие поправки.

С точки зрения внешней баллистики условия стрельбы можно разбить на баллистические и метеорологические. К баллистическим условиям относятся факторы, непосредственно относящиеся к орудию и боеприпасам, как-то: износ каналов стволов орудий, баллистические особенности партии зарядов, а также их температура, вес снаряда и деривация. К метеорологическим условиям относятся распределенные по высотам давление воздуха, его температура, направление и скорость ветра.

#### **Нормальные баллистические условия**

1. Начальная скорость  $V_0$  – табличная; под табличной начальной скоростью снаряда следует понимать скорость, принятую при составлении таблиц стрельбы и при расчете баллистических графиков, коноидов, баллистических потенциометров и прицельных приспособлений для данной системы, зенитных пушек, для определенного вида снаряда и типа взрывателя. Обычно в качестве табличной скорости берется начальная скорость, отвечающая стрельбе из ствола средней изношенности.

2. Температура заряда  $T_3 = +15$  °С.

3. Заряд нормальный, обеспечивающий получение штатной начальной скорости при стрельбе из нового ствола. Под штатной начальной скоростью понимается скорость, установленная тактико-техническими требованиями при разработке данной системы орудия; она несколько больше скорости, принимаемой за начальную для орудий средней изношенности.

4. Вес окончательно снаряженного снаряда  $q$  – штатный.

5. Форма и размеры снаряда и взрывателя соответствуют установленному чертежу.

6. Время действия дистанционного взрывателя соответствует времени действия эталонной партии взрывателя.

7. Деривация отсутствует.

#### **Нормальные метеорологические условия**

1. Давление воздуха в точке стояния орудия  $P_0 = 750$  мм.

2. Температура воздуха  $T_B = + 15$  °С.

3. Упругость водяных паров (при относительной влажности воздуха 50 %)  $e = 6,35$  мм; относительной влажностью называют степень насыщения воздуха водяными парами. Упругость водяных паров (или абсолютная влажность) показывает, какая часть общего атмосферного давления приходится на долю водяных паров.

4. Плотность или вес  $1 \text{ м}^3$  воздуха в точке стояния орудия  $\rho_0 = 1,206 \text{ кг/м}^3$ .
5. Скорость распространения звука в точке стояния орудия  $V_0 = 340,9 \text{ м/с}$ .
6. Ветер на всех высотах отсутствует.
7. Распределение метеорологических условий по высоте соответствует определенному закону.

Так как влияние влажности на плотность воздуха незначительно, то для упрощения расчетов условно принимают влажность воздуха равной нулю, соответственно изменяя температуру.

### § 2.4. Зоны зенитных орудий

**Кривая досягаемости** (рис. 19) представляет собой геометрическое место точек, отвечающих максимальным наклонным дальностям, при разных углах места для траекторий, построенных при  $V_0 = \text{const}$ . Кривая досягаемости является внешней границей досягаемости данного орудия. Так как для каждого орудия существует предельный угол бросания  $\theta_{\max}$  восходящая ветвь траектории, отвечающая  $\theta_{\max}$ , будет внутренней границей досягаемости орудия.

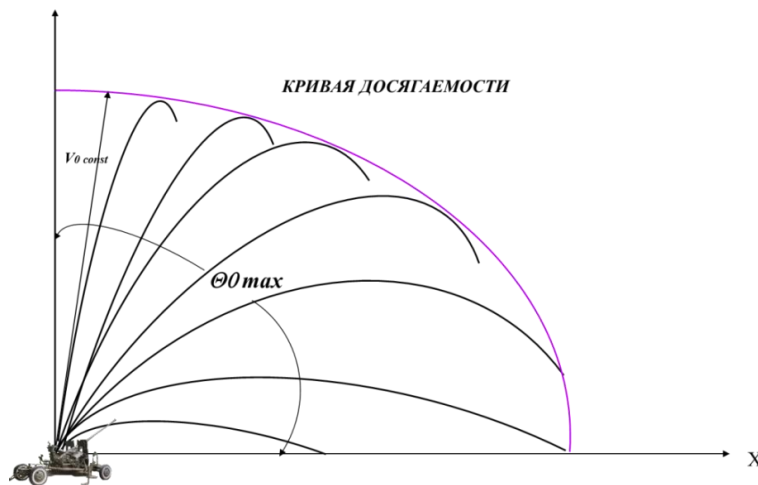


Рис. 19. Кривая досягаемости

Поворачивая вокруг вертикальной оси  $OY$  (линии зенита) кривую досягаемости и восходящую ветвь траектории, отвечающей  $\theta_{\max}$ , получим некоторый объем.

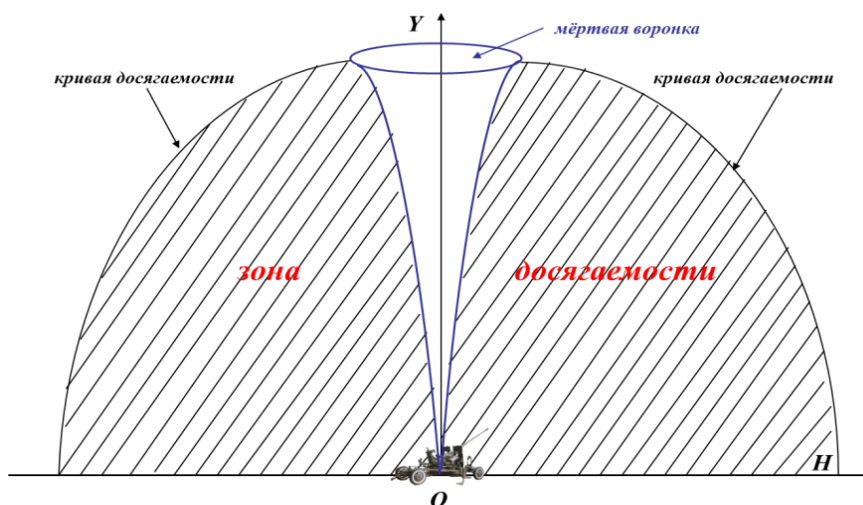


Рис. 20. Зона досягаемости

Объем, в пределах которого данное орудие может забросить данный снаряд, называется **зоной досягаемости** (рис. 20), а воронка внутри зоны досягаемости, образуемая, вращением восходящей ветви траектории при  $\theta_{\max}$  вокруг линии зенита  $OY$ , называется мертвой воронкой.

**Зоной обстрела** зенитной пушки малого калибра следует считать ту часть зоны досягаемости, где возможно прямое попадание в цель целым снарядом.

Зона обстрела (рис. 21) в вертикальном разрезе ограничена с внутренней стороны восходящей ветвью траектории при  $\theta_{\max}$  и с внешней стороны кривой, отвечающей наибольшей установке взрывателя.

Границами зоны обстрела орудий малого калибра в вертикальном ее разрезе являются: с внутренней стороны восходящая ветвь траектории при  $\theta_{\max}$ , а с внешней стороны изохронна, отвечающая времени действия самоликвидатора.

Кольцевая зона, получаемая в результате сечения зоны обстрела горизонтальной плоскостью на заданной высоте  $H$ , называется плоской зоной обстрела (рис. 22).

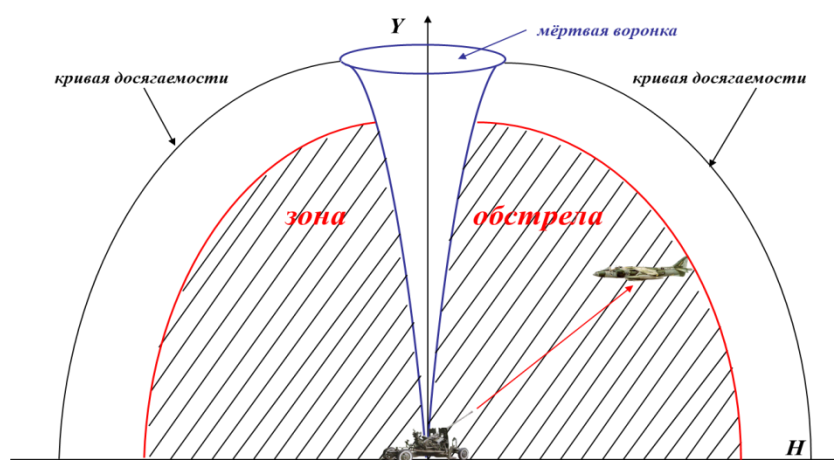


Рис. 21. Зона обстрела в вертикальном разрезе

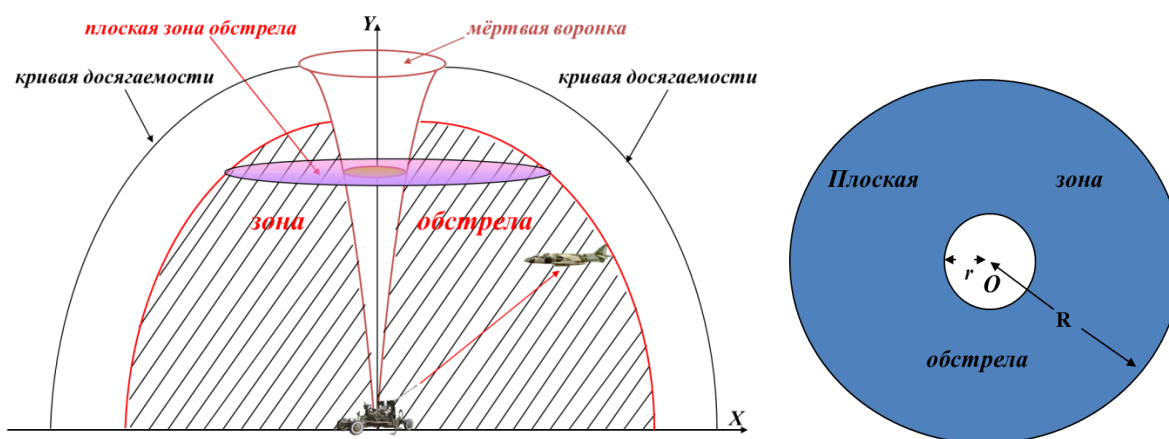


Рис. 22. Плоская зона обстрела

## Раздел 3. Структурная схема ЗАК

### § 3.1. Структурная схема ЗАК

**Зенитные артиллерийские комплексы (ЗАК)** предназначены для обнаружения, опознавания и последующего уничтожения самолетов, вертолетов и других воздушных целей по данным целеуказания с командного пункта батареи (части) или самостоятельно. Кроме того, они могут вести борьбу с наземными и надводными целями.

ЗАК, находящиеся на вооружении войсковой ПВО ВС РФ, включают:

- систему целеуказания;
- систему обеспечения прицельной стрельбы;
- систему стрельбы.

В зависимости от калибра все средства ЗАК могут размещаться на одной или нескольких базовых машинах. Проведем сравнительный анализ структурного построения ЗАК С-60 и ЗСУ-23-4.

В ЗАК С-60 (рис. 23), системы целеуказания и обеспечения прицельной стрельбы, размещены на радиолокационном приборном комплексе (РПК-1) выполненном на шасси УРАЛ-375. Система стрельбы представлена шестью 57-мм автоматическими зенитными пушками (АЗП-57).

ЗСУ-23-4 (рис. 24) является самоходным зенитным артиллерийским комплексом, в котором все системы размещены на одной базовой гусеничной машине ГМ-575.

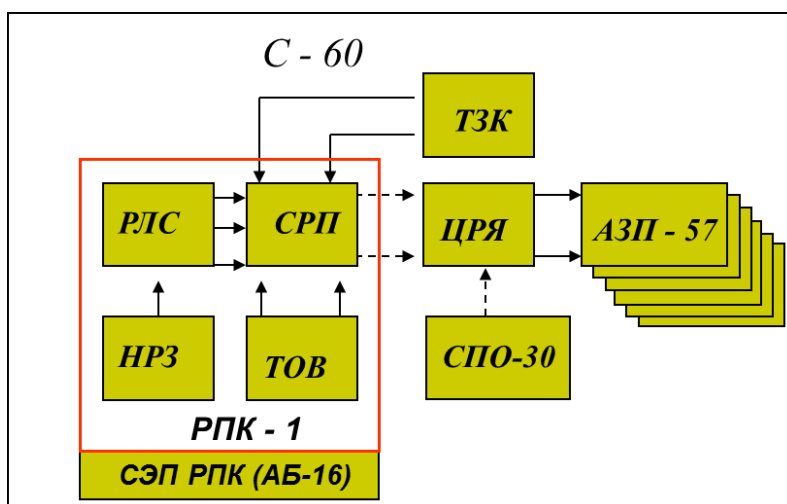


Рис. 23. Структурная схема ЗАК-60

В общем случае ЗАК С-60 и ЗСУ-23-4 включают:

- **радиолокационную станцию (РЛС)**, обеспечивающую поиск и обнаружение целей, взятие на сопровождение и непрерывное определение текущих координат выбранной для обстрела цели;
- **счетно-решающий прибор (СРП)**, решающий задачу встречи снаряда с целью в упрежденной точке, где входными данными, для решения задачи, являются текущие координаты, непрерывно поступающие с РЛС, выходными данными полные углы наведения пушек на цель;
- **наземный радиолокационный запросчик (НРЗ)**, определяющий принадлежность воздушной цели к своим вооруженным силам;
- **автоматическую зенитную пушку** (шесть 57-мм АЗП и счетверенную 23-мм АЗП соответственно), обеспечивающую уничтожение самолетов, вертолетов и других воздушных, а также наземных целей.

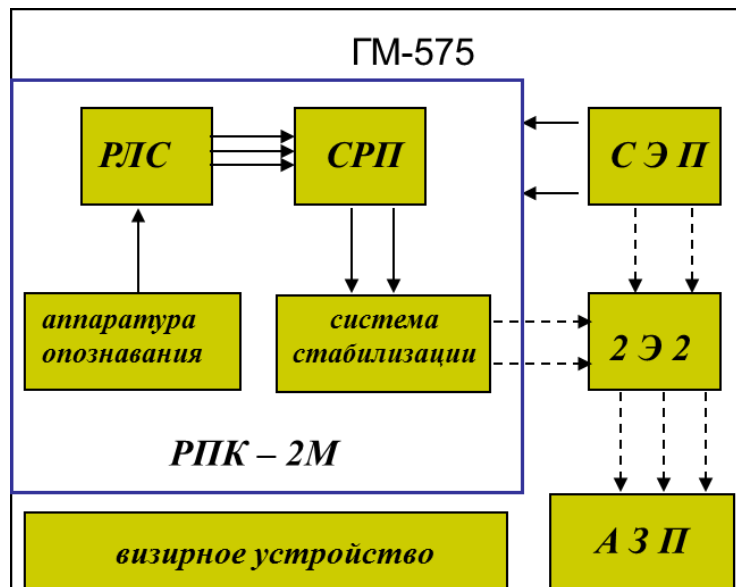


Рис. 24. Структурная схема ЗСУ-23-4

Радиолокационная станция совместно со счетно-решающим прибором и аппаратурой опознавания (НРЗ) образуют **радиолокационный приборный комплекс** (РПК-1 и РПК-2 соответственно), который предназначен для управления огнем автоматических зенитных пушек. Для наведения пушки в упрежденную точку устанавливаются силовые приводы вертикального и горизонтального наведения.

При полуавтоматическом режиме сопровождения воздушных целей в ЗАК С-60 используется телевизионный оптический визир (ТОВ), а в ЗСУ-23-4 – прицел-дублер (при установке на прицеле-дублере дистанционной шкалы, ЗСУ ведет стрельбу по наземным целям).

Для питания электроследящих приводов АЗП-57 трех фазным переменным током напряжения 220 В 50 Гц, используется станция питания орудий (СПО-30). В качестве первичного источника питания 220 В 400 Гц РПК-1, предусмотрен бензоэлектрический агрегат АБ-16М1. В ЗСУ-23-4 система первичного электропитания (СЭП) служит для обеспечения электроэнергией всех составных частей установки. Основным двигателем СЭП является газотурбинный двигатель, вспомогательным – базовый двигатель ГМ-575.

### Принципы работы ЗАК

Во время боевой работы РЛС РПК производит поиск цели по данным целеуказания (ЦУ) от станции разведки целей (СРЦ), трубы зенитной командирской (ТЗК) или самостоятельно (на ЗСУ по ЦУ от командира батареи или самостоятельно).

Обнаруженная цель опознается с помощью НРЗ. Если цель не отвечает на запрос, она признается самолетом противника. В этом случае операторы берут цель на сопровождение, РЛС определяют и выработывают текущие координаты; азимут ( $\beta$ ), угол места ( $\epsilon$ ) и наклонной дальности ( $D$ ).

Эти данные поступают на вход СРП, который решает задачу встречи снаряда с целью, определяя координаты упрежденной точки: упрежденного азимута ( $\beta_y$ ) и угла возвышения ( $\varphi$ ).

Полученные данные для РПК-1 через центральный распределительный ящик (ЦРЯ) по кабелю подаются на электрические следящие приводы зенитных орудий. Для ЗСУ данные от РПК-2 поступают в систему стабилизации, которая учитывает углы качки и рыскания ГМ-575 как на месте, так и в движении. Из системы стабилизации углы полного наведения АЗП  $Q$  и  $\Phi$  поступают в силовой привод 2Э2.

Стволы пушек разворачиваются в упрежденную точку встречи снаряда с целью. По команде, расчеты орудий, открывают огонь.

Работа ЗСУ-23-4 (РПК-2) в поиске, обнаружении, взятии на сопровождение цели, определении текущих координат и координат упрежденной точки аналогична работе ЗАК С-60. К несамостоятельным зенитным средствам относится зенитная установка ЗУ-23.

Дальнейшее развитие ЗАК направлено на улучшение их возможностей по обнаружению воздушных целей, а также на сокращение времени реакции комплекса (минимального времени, необходимого комплексу с момента обнаружения цели до момента готовности к открытию огня). Вместо аналоговых СРП устанавливаются бортовые вычислительные машины (ЗРПК 2С6М «Тунгуска»), которые будут решать не только задачу встречи снаряда с целью, но и ряд других задач, связанных с управлением огнем, распределением целей, определением наиболее опасных целей, поиском неисправностей и т. д.

Для успешной борьбы с воздушным противником к ЗАК предъявляются следующие требования:

- высокая эффективность стрельбы;
- возможность стрельбы в движении, с короткой остановки;
- высокая мобильность;
- автономность действия;
- всепогодность;
- малое время реакции.

### **§ 3.2. Боевые возможности ЗАК**

Для эффективного использования и обоснованного определения боевых задач зенитным артиллерийским подразделениям и частям необходимо знать и учитывать их боевые возможности, которые зависят от многих факторов. К основным факторам относятся:

- боевая готовность подразделений;
- эффективность огневых комплексов и их досягаемость по дальности и высоте;
- диапазон скоростей и высот полета воздушных целей, их уязвимость;
- помеховая обстановка;
- метеоусловия, время суток и условия рельефа местности.

Боевые возможности зенитных артиллерийских подразделений состоят из разведывательных, огневых и маневренных возможностей.

Разведывательные возможности характеризуются дальностями обнаружения и опознавания воздушных целей на различных высотах с заданной вероятностью, а также числом одновременно сопровождаемых целей.

Входящие в состав ЗАК радиолокационные станции могут обнаруживать воздушные цели на дальности до 60 км (С-60 и КС-19) и до 20 км (ЗСУ-23-4). Эти радиолокационные станции могут сопровождать только одну цель. В перспективных РЛС при использовании фазированных антенных решеток и цифровой обработки сигналов возможно сопровождение нескольких целей одновременно.

Огневые возможности характеризуются средним ожидаемым числом уничтоженных воздушных целей либо из числа участвующих в налете, либо при израсходовании установленного запаса боеприпасов. Они зависят от вероятности поражения воздушной цели, размеров зоны огня, числа одновременно обстреливаемых целей и продолжительности цикла стрельбы зенитных артиллерийских комплексов.

При оценке огневых возможностей зенитных артиллерийских подразделений необходимо особое внимание уделять борьбе с самолетами, вертолетами и крылатыми ракетами, летящими на малых и предельно малых высотах в условиях применения противником всех видов помех и противозенитного маневра.

Среднее ожидаемое число уничтожаемых воздушных целей при израсходовании установленного запаса боеприпасов на орудиях зенитного артиллерийского подразделения можно определить по формуле:

$$M_{ц} = N_{цк}mR,$$

где  $M_{ц}$  – математическое ожидание числа уничтоженных целей;  $N_{цк}$  – число боеготовых целевых каналов в подразделении;  $m$  – число стрельб, которое может провести каждый целевой канал;  $R$  – вероятность поражения воздушной цели.

Под целевым каналом (ЦК) обычно понимается наименьшее подразделение (комплекс с экипажем), способное самостоятельно выполнять огневую задачу по уничтожению воздушной цели. Максимальное число одновременно обстреливаемых целей равно числу имеющихся целевых каналов.

Зенитная артиллерийская батарея одновременно может обстрелять: по данным РПК – одну цель; с прицелом – как правило, две–три цели. Число стрельб  $m$  в зависимости от продолжительности цикла стрельбы  $\tau_{ц}$  и продолжительности налета  $T_{н}$  определяется по формуле

$$m = T_{н}/\tau_{ц}.$$

Последовательный обстрел воздушных целей одним целевым каналом возможен, если дистанции между целями по времени будут не меньше продолжительности цикла стрельбы, например, продолжительность цикла стрельбы батареи С-60 при стрельбе с РПК составляет 90 с, с прицелом – 60 с.

Маневренные возможности характеризуются временем развертывания (свертывания) подразделений в боевой (походный) порядок, скоростью передвижения, проходимостью и запасом хода средств транспортирования, возможностью стрельбы в движении и с короткой остановки.

Маневренные возможности зенитных артиллерийских подразделений определяют их способность непрерывно прикрывать наступающие общевойсковые подразделения. С учетом этого наибольшими возможностями по непрерывному прикрытию войск обладают самоходные установки, способные вести огонь в движении.

Для развертывания и свертывания зенитных артиллерийских батарей требуется больше времени, чем для развертывания и свертывания подразделений, вооруженных самоходными зенитными артиллерийскими комплексами. Например, для развертывания 57-мм батареи с РПК требуется 5...7 мин, для свертывания 8...10 мин. Средняя скорость движения по шоссе – до 40 км/ч, по грунтовым дорогам – до 30 км/ч.

Для ЗСУ время развёртывания в боевое положение составляет до 5-ти минут с РПК-2 и 1...2 минуты при стрельбе с прицелом-дублёром. ЗСУ имеет возможность ведения разведки и огня в движении со скоростью до 30 км/ч. На марше скорость передвижения по шоссе до 50 км/ч, по грунтовым дорогам до 30...40 км/ч и по бездорожью до 10 км/ч.

Поэтому зенитные артиллерийские батареи, вооруженные самоходными зенитными артиллерийскими комплексами, могут выполнять задачи по непрерывному прикрытию войск только в составе зенитных артиллерийских частей при последовательном перемещении батарей.

Маневренные возможности следует определять для конкретных условий обстановки с учетом особенностей рельефа местности, метеоусловий и времени суток.

### **§ 3.3. Принципы решения задачи встречи снаряда с целью в СРП ЗАК**

Сущность стрельбы ЗАК по воздушным целям сводится к определению координат точки пространства, в которой должна произойти встреча с целью, наведению пушки в точку встречи и производству выстрела в расчете на попадание и поражение цели.

Для решения задачи встречи снаряда с целью находятся геометрические координаты упрежденной точки и время полета снаряда до точки встречи согласовывается со временем полета цели к этой точке при условии неравенства их скоростей движения.

Для решения задачи встречи должны быть заданы: текущие координаты цели; параметры движения цели; характеристики пушки и снаряда; параметры условий стрельбы (направленные и скорость ветра, плотность и температура воздуха и т. д.).



На этапе обеспечения прицельной стрельбы решаются следующие задачи:

- определение текущих координат целей и параметров ее движения с помощью радиолокационной станции (РЛС);
- определение координат упреждений точки с помощью счётно-решающего прибора (СРП);
- определение установок для стрельбы пушек;
- наведение пушек, их зарядание;
- определение момента начала стрельбы с помощью СРП;
- производство выстрела.

В зенитной артиллерии установилась терминология, определяющая характер полета цели, относительное положение цели и пушки в характерные моменты времени.

*Зона досягаемости пушки* – пространство, в пределы которого данная пушка может забросить снаряд. Эта зона ограничивается кривой досягаемости и мертвой воронкой.

*Кривая досягаемости* – это геометрическое место точек, отвечающее максимальным наклонным дальностям, стрельбы при различных углах возвышения ствола пушки.

*Зоной обстрела* называется часть зоны досягаемости, в пределах которой можно получить дистанционный разрыв снаряда или его прямое попадание в цель. Сечение зоны обстрела горизонтальной плоскостью на заданной высоте называется плоской зоной обстрела.

Обычно ЗАК должен открывать огонь по целям на максимальных дальностях, соответствующих встрече снаряда с целью на дальней границе зоны обстрела, так как комплекс должен сделать максимальное число залпов по цели и тем самым увеличить вероятность ее поражения за стрельбу.

При решении задачи встречи делается предположение (гипотеза) о наиболее вероятном характере движения цели. В СРП ЗАК наиболее широкое распространение нашла гипотеза о том, что цель в течение полетного времени снаряда  $T = T_y$  движется равномерно и прямолинейно в любой плоскости. Рассмотрим логический и математический алгоритмы решения задачи при указанной гипотезе.



Рис. 25. Решение задачи встречи в СРП

При решении задачи встречи СРП производятся следующие операции (рис. 25):

- преобразование текущих сферических координат цели  $\beta, \epsilon, D$  в прямоугольные  $X, Y, H$  в связи с тем, что, во-первых, в прямоугольной системе координат технически проще реализовать определение упреждений; во вторых большинство поправок на условия стрельбы являются функциями высоты;

- определение скоростей изменения прямоугольных координат  $V_x, V_y, V_H$ ;
- расчет полетного времени снаряда  $T_y$ ;
- определение упреждений  $\Delta X, \Delta Y, \Delta H$ ;
- выработка упрежденных координат  $X_y, Y_y, H_y$ ;
- учет поправок на условия стрельбы, необходимый для увеличения точности стрельбы;
- выработка установок для стрельбы по упрежденным углу места  $\epsilon_y$  и азимуту  $\beta_y$ .

Математический алгоритм решаемых задач, следующий:

1. Пересчет координат цели из сферической системы координат  $\beta, \epsilon, D$  в прямоугольную  $X, Y, H$  осуществляется с помощью известных условий:

$$X = D \cos \epsilon \cos \beta; Y = D \cos \epsilon \sin \beta; H = D \sin \epsilon.$$

2. Определение скоростей изменения координат цели:

$$V_x = dx/dt; V_y = dy/dt; V_H = dH/dt.$$

3. Расчет упреждений

$$\Delta X = V_x T_y; \Delta Y = V_y T_y; \Delta H = V_H T_y.$$

4. Расчет упрежденных координат с помощью уравнений

$$X_y = X + \Delta X; Y_y = Y + \Delta Y; H_y = H + \Delta H.$$

5. Упрежденные координаты с учетом поправок на условия стрельбы:

$$X_y^* = X_y + \Delta X_{\text{п}}; Y_y^* = Y_y + \Delta Y_{\text{п}}; H_y^* = H_y + \Delta H_{\text{п}}.$$

6. Выработка установок для стрельбы  $\epsilon_y, \beta_y$ .

## Глава 2. Основы радиолокации

### Раздел 1. Введение в радиолокацию

#### § 1.1. Радиоволны и их основные свойства

**Электромагнитные** волны – это электромагнитные колебания (возмущения), распространяющиеся в пространстве со скоростью света. Между длиной электромагнитной волны  $\lambda$ , частотой колебаний  $f$  и скоростью распространения ЭМВ существует зависимость, имеющая вид:

$$\lambda = \frac{C}{f},$$

где  $f$  – это частота (число колебаний в единицу времени (секунду), Гц;  $\lambda$  – длина волны, кратчайшее расстояние между точками, колеблющимися в одинаковых фазах, м;  $C$  – скорость света,  $C = 3 \cdot 10^8$  м/с. Физическая модель электромагнитной волны изображена на рис. 26.

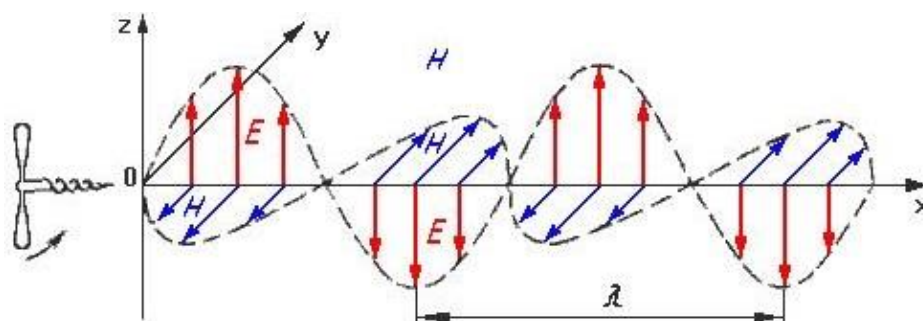


Рис. 26. Электромагнитная волна

Направления электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей в пространственной бегущей электромагнитной волне лежат в плоскости, перпендикулярной направлению движения волны. Направления полей соответствуют «правилу буравчика»: при повороте от вектора  $E$ , расположенного вертикально (ось  $Z$ ) к вектору  $H$ , лежащему в горизонтальной плоскости (ось  $Y$ ) продвижение буравчика совпадает с направлением распространения волны (вдоль оси  $X$ ). Поскольку ЭМЭ распространяется перпендикулярно вектору напряженности электрического поля и вектору индукции магнитного поля, то она является *поперечной*.

На рис. 26 электрическая составляющая поля во все моменты остается в вертикальной плоскости. Пространственная ориентация этой составляющей служит признаком свойства волн, называемого **поляризацией**.

Волна, показанная в данном примере, называется вертикально поляризованной. В зависимости от способа получения волн, поляризация может быть также горизонтальной или наклонной. Если в процессе распространения волн поляризация не изменяется, то она называется *линейной*.

Ориентация линейно поляризованной электромагнитной волны определяется вектором электрического поля (т. е. если вектор электрического поля будет вертикальным, то и излучение будет вертикально поляризованным).

В прямоугольном волноводе ЭМВ распространяется с максимумом напряженности электрического  $E$  поля на широкой стенке волновода. Поэтому сообразно разместив волновод в пространстве можно задать необходимую **поляризацию** в облучателе антенны. При отражении радиоволн от предметов и рассеянии на атмосферных аномалиях вектор поляризации также может измениться. Это свойство применяется при формировании узкой ДНА в двухполяризованной параболической антенне.

**Радиоволны** – это электромагнитные волны с частотами до 3 ТГц, распространяющиеся в пространстве без искусственного волновода. Радиоволны в электромагнитном спектре располагаются от крайне низких частот вплоть до инфракрасного диапазона. С учётом классификации Международным союзом электросвязи радиоволн по диапазонам, к радиоволнам относят электромагнитные волны с частотами от 30 кГц до 3 ТГц, что соответствует длине волны от 10 км до 0,1 мм.

В широком смысле радиоволнами являются всевозможные волновые процессы электромагнитного поля в аппаратуре (например, в волноводных устройствах, в интегральных схемах СВЧ и др.), в линиях передачи и в среде, разделяющей передающую и приёмную антенны.

**Радиоволны**, являясь электромагнитными волнами, распространяются в вакууме со скоростью света. Естественными источниками радиоволн являются вспышки молний и астрономические объекты. Искусственно созданные радиоволны используются для стационарной и подвижной радиосвязи, радиовещания, **радиолокации**, радионавигации, спутниковой связи, организации беспроводных компьютерных сетей и в других бесчисленных приложениях.

В зависимости от значения частоты (длины волны) радиоволны относят к тому или иному диапазону радиочастот или длин волн (рис. 27).

Название диапазона волн	Диапазон волн	Название диапазона частот	Диапазон частот
Сверхдлинные /мираметровые/	100...10 км	Очень низкие (ОНЧ)	3...30 кГц
Длинные /километровые/	10...1 км	Низкие (НЧ)	30...300 кГц
Средние /гектометровые/	1000...100 м	Средние (СЧ)	300...3000 кГц
Короткие /декаметровые/	100...10 м	Высокие (ВЧ)	3...30 МГц
Метровые /УКВ/	10...1 м	Очень высокие (ОВЧ)	30...300 МГц
Ультракороткие /дециметровые/	1000...100 мм	Ультравысокие (УВЧ)	300...3000 МГц
Сантиметровые /СМВ/	100...10 мм	Сверхвысокие (СВЧ)	3...30 ГГц

Рис. 27. Диапазоны радиоволн

Главное свойство **радиоволн** – способность переносить через пространство энергию, излучаемую генератором ЭМ колебаний. Основными свойствами радиоволн, которые используются в радиолокации, являются:

- прямолинейное распространение радиоволн с постоянной скоростью;
- отражение радиоволн;
- дифракция и интерференция;
- поляризация;
- удлинение (укорочение) длины волны  $\lambda$ , эффект Доплера.

Основное свойство радиоволн, применяемое в радиолокации – это способность распространяться в однородной среде **прямолинейно** и с **постоянной** скоростью. При распростра-

нении в пространстве радиоволны сильно ослабляются. Главная причина ослабления заключается в том, что по мере распространения энергия радиоволн распределяется во всём большем объёме пространства и, следовательно, на единицу объёма приходится всё меньшая доля энергии.

Свойство прямолинейности дает возможность **направленного излучения** радиоволн, т. е. возможностью концентрации их энергии с помощью антенны в узкие пучки. Форму этого пучка и распределение энергии в нём принято характеризовать диаграммой направленности антенны (ДНА).

Способность **отражаться** от границы разнородных сред дает возможность приносить в эхо-сигнале радиолокационную информацию (РЛИ) о цели и помехах.

Сущность эффекта **Доплера** состоит в том, что частота отражённого от цели сигнала, отличается от частоты зондирующего сигнала на величину пропорциональную скорости цели. Математическое описание явления выглядит следующим образом. Если источник волн движется относительно среды, то расстояние между гребнями волн (длина волны  $\lambda$ ) зависит от скорости и направления движения. Если источник движется по направлению к приёмнику, то есть догоняет испускаемую им волну, то длина волны уменьшается, если удаляется –  $\lambda$  увеличивается:

$$\lambda = \frac{2\pi(c - v)}{\omega_0},$$

где  $\omega_0$  – угловая частота, с которой источник испускает волны;  $c$  – скорость распространения волн в среде;  $v$  – скорость источника волн относительно среды (положительная, если источник приближается к приёмнику и отрицательная, если удаляется).

**Поляризация** радиоволн была уже рассмотрена в начале раздела об электромагнитных волнах.

**Дифракция** – это способность электромагнитных волн огибать неровности поверхности, на которую они падают, в том числе и кривизну земной поверхности, если размеры их соизмеримы с длиной волны. Явление **дифракции** можно объяснить тем, что любая точка поверхности, на которую падает электромагнитная волна, становится источником вторичного излучения, в результате чего и происходит как бы огибание неровности поверхности. Если на поверхности земли установлен передатчик  $A$ , то препятствием для радиоволн к приёмнику  $B$  является выпуклая поверхность земли (рис. 28). Так как высота этого препятствия  $H$  соизмерима с длиной волны в диапазонах длинных, средних и отчасти коротких волн, то волны этих диапазонов могут приходить в точку  $B$  за счёт явления дифракции. Это явление выражено тем слабее, чем короче длина волны. При работе на ультракоротких радиоволнах дифракцией волн можно пренебречь.

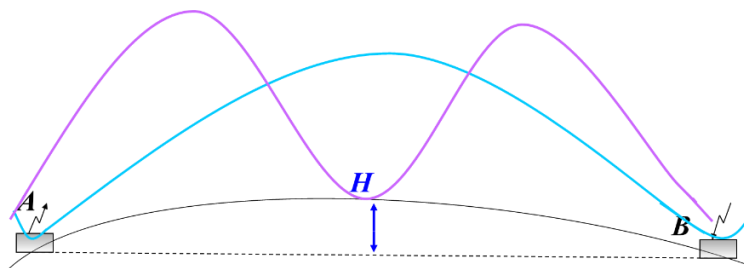


Рис. 28. Явление дифракции

Радиоволны, распространяющиеся вокруг земного шара и огибающие его вследствие явления дифракции, называются *земными* или *поверхностными* волнами. Так как поверхностная волна проникает в землю на некоторую глубину, то часть её энергии поглощается землёй, что и служит причиной затухания поверхностных радиоволн. Установлено, что интенсивность по-

глощения обратно пропорциональна квадрату длины волны. Поэтому при использовании поверхностных волн дальность радиосвязи уменьшается с уменьшением длины волны.

Возможен другой путь распространения радиоволн за счёт отражения от ионизированных слоев атмосферы. Благодаря наличию свободных электронов ионосфера обладает свойством проводника электричества и электромагнитные волны могут отражаться от неё. Так как поверхность земли также отражает радиоволны, то радиоволны излученные антенной передатчика, могут распространяться, последовательно отражаясь от ионосферы и поверхности земли, и достигать, таким образом, любой точки земли.

Волны, распространяющиеся подобным путём, называются **пространственными** или **ионосферными волнами**. При соответствующих условиях пространственная волна может обогнуть земной шар.

Явление **атмосферной рефракции** радиоволн происходит вследствие неоднородности земной атмосферы. Параметры атмосферы (давление, температура, влажность) изменяются с высотой, вследствие чего убывает показатель преломления. Это вызывает рефракцию по направлению к земной поверхности. Траектория луча оказывается искривлённой, что также позволяет принимать радиоволны за пределами горизонта.

В тех случаях, когда имеет место дифракция или отражения волн от ионосферы, влияние атмосферной рефракции на дальность распространения получается незначительным и им можно пренебречь. Однако для диапазонов УКВ атмосферная рефракция становится фактором, от которого зависит дальность действия радиотехнической аппаратуры.

### **§ 1.2. Радиолокация и её виды. Методы радиолокации**

Радиолокацией называется обнаружение и распознавание различных объектов в пространстве и определения координат и параметров движения с помощью радиоволн. По особенностям использования радиоволн радиолокация подразделяется на активную, полуактивную, с активным ответом и пассивную.

Радиолокационные станции представляют собой устройства, которые позволяют при помощи радиоволн обнаруживать самолеты, корабли, и другие цели, а так же определять их местоположение (координаты). Большинство современных РЛС используют метод активной радиолокации.

**Активная радиолокация** (рис. 29) осуществляется путём облучения цели радиоволнами и приёма отражённой от неё энергии в виде радиоэха (отражённого радиоимпульсарадиосигнала). Передающее устройство генерирует электромагнитную энергию (ЭМЭ) высокой частоты и используя антенну, излучает в пространство узким лучом в виде зондирующих импульсов (радиоимпульсов).

ЭМЭ радиоимпульсов отражается от цели, находящейся на пути распространения радиоволн. Вследствие рассеивания энергии в пространстве к приёмному устройству через  $\Delta t$  (время запаздывания) возвращается ничтожная доля излучённой передатчиком энергии, называемой отражённым сигналом или импульсом.

Приёмное устройство регистрирует отражённый импульс, после этого передающее устройство вновь вырабатывает зондирующий импульс. Передатчик генерирует эти импульсы с периодичностью равной периоду повторения  $T$ .

**Полуактивная радиолокация** является частным случаем активной радиолокации. Она отличается тем, что облучение цели и её обнаружение производится в различных пунктах. Так, например, в системе наведения ракет мощное передающее устройство, облучающее цель, может устанавливаться на земле или на самолёте, а приёмное устройство – непосредственно на борту ракеты.

**Радиолокация с активным ответом** (рис. 30) характеризуется тем, что на объекте устанавливается ответчик, представляющий собой переизлучатель (приёмно-передающее устройство), запускаемый сигналами активного локатора.



Рис. 29. Структурная схема РЛС активной радиолокации

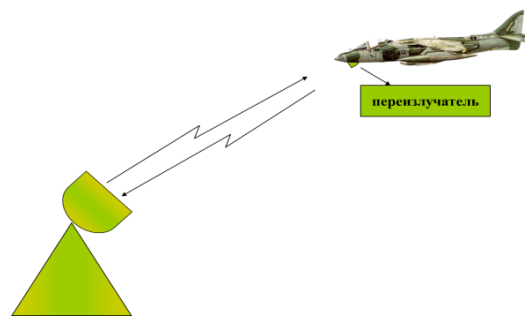


Рис. 30. Структурная схема РЛС с активным ответом

**Пассивная радиолокация** (рис. 31) в отличие от активной основывается на приёме собственного излучения цели в радиочастотном диапазоне.

Различные объекты в зависимости от температуры излучают электромагнитные колебания от инфракрасной области частот до волн сантиметрового диапазона. При этом излучение на коротких волнах распространяется до 8000 км, а на сверхдлинных волнах – ещё дальше.

Основное достоинство пассивной радиолокации состоит в полной скрытности работы, объясняющейся отсутствием передающего устройства, а также в возможности обнаружения некоторых целей, недоступных для активных радиолокаторов.

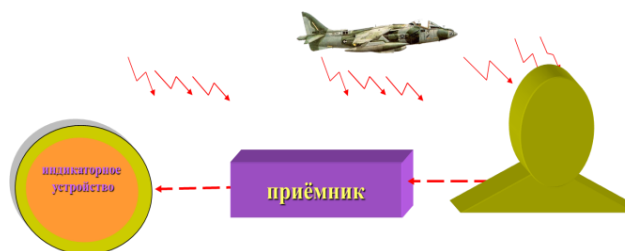


Рис. 31. Структурная схема РЛС пассивной радиолокации

В соответствии с выполненными тактическими функциями различают РЛС обнаружения целей, РЛС точного определения координат и параметров движения целей, РЛС распознавания и т. д.

РЛС обнаружения обычно являются многоцелевыми, РЛС точного определения координат, как правило, одноцелевые или рассчитаны на малое число целей. Существуют также и многофункциональные РЛС, обеспечивающие одновременное выполнение нескольких функций.

## Раздел 2. Структурная схема радиолокатора

### § 2.1. Импульсный метод радиолокации. Импульсные РЛС

Импульсный метод получил наиболее широкое распространение в радиолокации. Сущность его заключается в том, что передатчик вырабатывает высокочастотную энергию не непрерывно, а кратковременными импульсами. Импульсы электромагнитной энергии, излучаемые антенной радиолокационной станции, встречаются на пути своего распространения различные объекты, частично отражаются от них.

Некоторая часть отраженной энергии улавливается антенной радиолокационной станции, поступает на вход приемника в паузах между излучаемыми импульсами (рис. 32). Измеряя время между зондирующими и отраженными импульсами (эхо-сигнал), можно определить дальность до цели:

$$D = \frac{ct_{\text{зад}}}{2}.$$

Время задержки  $t_{\text{зад}}$  измеряется тысячными, а в некоторых случаях миллионными долями секунды. Такие малые промежутки времени измеряются с помощью электронно-лучевых индикаторов, основу которых составляют электронно-лучевые трубки (ЭЛТ).

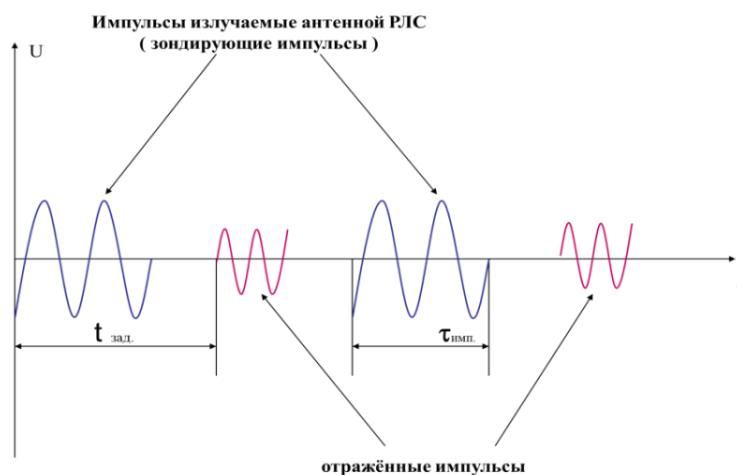


Рис. 32. Эюры напряжений прямого и отраженного импульсов

Пусть прямой ход луча горизонтальной развертки на экране ЭЛТ (рис. 33) начинается в момент излучения импульса, а скорость движения цели постоянна. Отраженные эхо-сигналы после усиления и детектирования в приемном устройстве подводятся к вертикальным отклоняющим пластинам ЭЛТ и создают вертикальное отклонение луча. Так как расстояние  $d_0$  на экране ЭЛТ пропорционально времени  $t_{\text{зад}}$  вследствие постоянной скорости движения луча, а действительное расстояние  $D$  до цели пропорционально тому же времени  $t_{\text{зад}}$  вследствие постоянства распространения электромагнитной энергии, то между  $d$  и  $D$  существует линейная зависимость. Чтобы на экране индикатора получить устойчивое изображение прямого и отраженного сигналов, электронный луч индикатора начинает движение в момент излучения каждого зондирующего импульса с одной и той же точки экрана.

Частота повторения импульсов выбирается таким образом, чтобы импульс, отраженный от наиболее удаленных целей, на обнаружение которых рассчитана РЛС, успел поступить в приемник до следующего зондирующего импульса, т. е. до следующего прямого хода луча на индикаторе. Этот метод радиообнаружения получил широкое распространение в радиолокационных станциях разведки и целеуказания, применяемых в радиотехнических, артиллерийских и зенитно-ракетных частях войсковой ПВО.



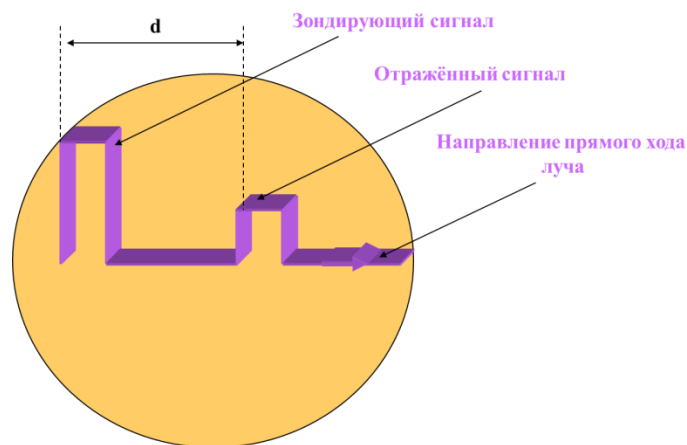


Рис. 33. Вид экрана электронно-лучевого индикатора

### Структурная схема импульсной РЛС (рис. 34)

**Радиолокационная станция** – это сложное радиотехническое устройство, предназначенное для обнаружения воздушных целей, определения их текущих координат (азимута  $\beta_{ц}$ , угла места  $\epsilon_{ц}$  и наклонной дальности  $D_{ц}$ ).

**Система синхронизации.** Импульсная РЛС излучает через определенные промежутки времени импульсы электромагнитных волн СВЧ. Частоту повторения или период следования этих импульсов задает система синхронизации станции, управляя работой передатчика. Вместе с тем система синхронизации вырабатывает управляющие сигналы, позволяющие согласовать по времени (синхронизировать) с работой передатчика работу остальных блоков и узлов РЛС.

**Передающая система** – генератор электромагнитных волн. Формирует периодическую последовательность радиоимпульсов СВЧ, излучаемых антенной в виде зондирующего сигнала. Создаваемые в передатчике радиоимпульсы с помощью специальных линий передач подводятся к антенне.



Рис. 34. Структурная схема импульсной РЛС

**Антенно-волноводная система (АВС)** осуществляет передачу высокочастотных сигналов с выхода передающей системы на вход антенны, излучение их в пространстве в заданном направлении, передачу принятых антенной отражённых от цели СВЧ сигналов на вход приемной системы. Направление максимумов напряженностей электрического и магнитного полей, создаваемых антенной, назовем электрической осью антенны. Линию, соединяющую антенну с «целью» – линией визирования цели (ЛВЦ).

Импульсы ЭМВ, поступающие на вход приемной системы, несут следующую информацию:

1. Наличие отраженных сигналов – это информация о наличии воздушных целей.
2. Структура сигналов несет информацию об отклонении цели от электрической оси антенны.

**Приемная система** – предназначена для усиления сигналов, принятых антенной, и их преобразования до величины и вида, обеспечивающей нормальную работу окончательных устройств – индикатора, системы измерения дальности (СИД), системы выделения сигнала ошибки (ВСО). Приемная система импульсных РЛС, как правило, построена по схеме супергетеродинного приемника с одно или двухразовым преобразованием частоты. Приемники современных РЛС обладают достаточно высокой чувствительностью (от  $10^{-9}$  до  $10^{-20}$  Вт). Приемные системы имеют средства защиты РЛС от различных помех.

**Система выделения сигнала ошибки (ВСО)** предназначена для выделения напряжения сигнала ошибки сопровождения цели по угловым координатам из импульсных сигналов, поступивших из приемной системы.  $U_{CO}$  – представляет собой синусоидальное напряжение низкой частоты (десятки Гц). Фаза  $U_{CO}$  будет изменяться при изменении направления отклонения ЛВЦ от электрической оси антенны, а амплитуда – от величины отклонения.  $U_{CO}$  содержит информацию о направлении и величине отклонения цели от электрической оси антенны.

**Система управления антенной** преобразует и усиливает по мощности  $U_{CO}$  и подает его на приводные усилители СУА. Последние будут разворачивать антенну РЛС по  $\beta$  и  $\epsilon$  до тех пор, пока электрическая ось антенны не совместится с ЛВЦ и  $U_{CO}$  на выходе системы ВСО не станет равным нулю. С датчиков антенны, расположенных в СУА, снимаются значения  $\epsilon_{ц}$ ,  $\beta_{ц}$ , соответствующих положению антенны относительно выбранного направления и плоскости горизонта.

**Индикатор РЛС.** Электронная схема и конструкция индикаторов определяются тактическим назначением РЛС, и поэтому они могут быть различны. Однако, назначение индикаторов большинства типов РЛС одинаково – воспроизводить боевую обстановку в зоне действия станции, определить координаты воздушных объектов и их взаимное расположение.

**Система измерения дальности (СИД)** – предназначена для точного измерения наклонной дальности до воздушного объекта. Конструктивные особенности СИД определяются способами измерения дальности.

Таким образом, с помощью импульсной РЛС получили точную информацию о месте положения воздушного объекта относительно РЛС – координаты цели ( $\beta_{ц}$ ,  $\epsilon_{ц}$ ,  $D_{ц}$ ).

## **§ 2.2. Основные технические характеристики импульсного радиолокатора**

Основными техническими характеристиками импульсной РЛС являются:

1. Длина основной рабочей волны передатчика  $\lambda$ .
2. Излучаемая мощность  $P_{изл}$ .
3. Чувствительность приемника  $P_{пр.min}$ .
4. Коэффициент усиления антенны  $g_a$ .
5. Ширина ДНА в горизонтальной  $\varphi_{0,5}$  и вертикальной  $\Theta_{0,5}$  плоскостях.
6. Частота повторения импульсов  $F_{п}$ .
7. Скорость вращения антенны  $n_{и}$ .
8. Потребляемая станцией энергия.
9. Длительность импульса  $\tau_{и}$ .
10. Полоса пропускания приемника  $\Delta F$ .

Рассмотрим каждую характеристику РЛС более подробно.

### Длина волны

От выбора рабочей длины волны РЛС зависят размеры антенной системы при требуемых значениях ширины диаграммы направленности и коэффициента направленного действия антенны. При выборе длины волны учитывают возможность получения необходимой мощности от передатчика и обеспечения требуемой чувствительности приемника. Учитывается также поглощающее и рассеивающее действие гидрометеоров и атмосферы. При настройке РЛС обычно изменяется частота излучаемых колебаний  $f$  которая находится с длиной волны в соотношении

$$\lambda = 3 \cdot 10^4 / f,$$

где  $\lambda$  – длина волны, см;  $f$  – частота, МГц.

Более высокие точности определения координат и разрешающая способность реализуются легче на более коротких волнах радиолокационного диапазона.

### Мощность передатчика

Излучаемая мощность  $P_{\text{изл}}$  РЛС характеризуется импульсной мощностью передатчика  $P_{\text{и}}$  под которой понимают среднюю в течение импульса мощность, отдаваемую передатчиком в волноводную систему. Импульсная мощность связана со средней мощностью передатчика за период следования импульсов  $P_{\text{ср}}$  соотношением

$$P_{\text{и}} = P_{\text{ср}} / \tau \cdot F_{\text{и}},$$

где  $\tau_{\text{и}}$  – длительность импульса, с;  $F_{\text{и}}$  – частота следования импульсов, Гц.

### Чувствительность приемника

Реальной чувствительностью приемника  $P_{\text{пр. min}}$  называют минимальную мощность сигнала на его входе, при которой еще обеспечивается прием и обнаружение отраженных сигналов с заданной вероятностью. Обнаружение сигналов происходит на фоне собственных шумов приемного устройства, а поэтому

$$P_{\text{пр. min}} = v_{\text{р}} P_{\text{шо}},$$

где  $P_{\text{шо}}$  – мощность шума в полосе пропускания приемника;  $v_{\text{р}}$  – коэффициент различимости.

### Коэффициент усиления антенны

Коэффициент усиления антенны  $g_{\text{а}}$  характеризует направленные свойства антенной системы и практически равен коэффициенту направленного действия антенны  $G$ , так как КПД антенны РЛС весьма высокий. Поэтому часто вместо коэффициента усиления пользуются коэффициентом направленного действия (КНД) антенны. Последний связан с эффективной площадью антенны  $S_{\text{А}}$  соотношением

$$G = 4\pi S_{\text{А}} / \lambda^2.$$

### Частота повторения импульсов

Частотой повторения импульсов называется количество импульсов одной и той же полярности в одну секунду.

$$F_{\text{и}} = 1 / T_{\text{и}}, \text{ Гц},$$

где  $T_{\text{и}}$  – период повторения импульсов.

Для однозначного определения целей на заданных расстояниях максимальная частота повторения  $F_{\text{и}}$  зондирующих импульсов должна удовлетворять условию

$$F_{\text{и. max}} \leq C / 2 \cdot D_{\text{max}} \cdot k_3,$$

где  $C$  – скорость распространения радиоволн;  $k_3$  – коэффициент заполнения, равный 1,15–1,25;  $D_{\text{max}}$  – максимальная дальность до цели.

### § 2.3. Принцип опознавания воздушных целей

Радиолокационные станции сами по себе не могут определить, какие из обнаруженных объектов являются своими, а какие принадлежат противнику. Для этой цели на все свои самолёты должны устанавливаться специальные радиолокационные приборы – ответчики.

Ответчик — это импульсный приёмопередатчик, который принимает сигналы запроса и автоматически посылает ответные сигналы. Чтобы противник не мог ввести в заблуждение РЛС, ответные сигналы должны быть кодированы.

Системы опознавания бывают совмещёнными и автономными.

**Совмещённая система опознавания.** Приёмник и передатчик ответчика настраиваются на волну радиолокационной станции. Ответчик запускается импульсами, посылаемыми радиолокационной станцией, никаких специальных запросных сигналов не применяется. Ответный сигнал воспринимается приёмником радиолокационной станции наряду с сигналами, отражёнными от цели (рис. 35).

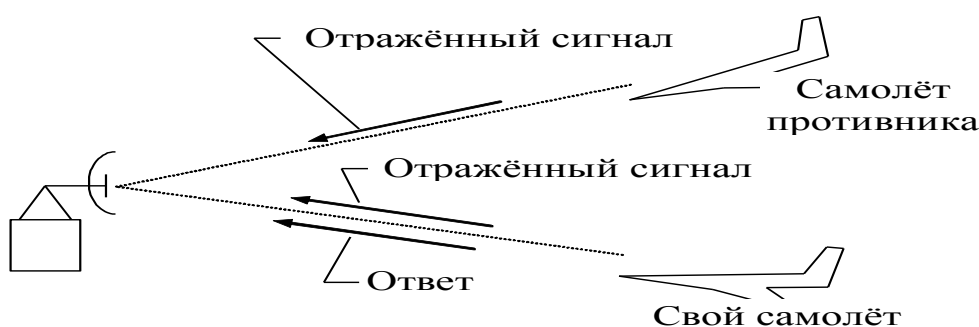


Рис. 35. Принцип действия совмещённой системы опознавания

Так как на включение передатчика ответчика необходимо некоторое время, ответный сигнал приходит несколько позже отражённого и наблюдается на индикаторе рядом с отражённым (рис. 36).

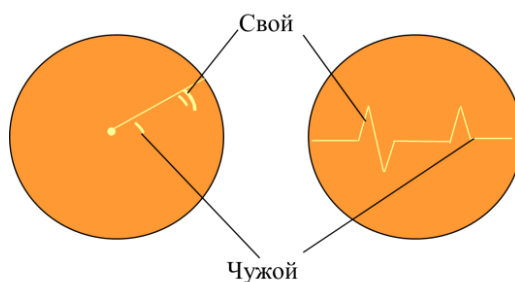


Рис. 36. Виды индикаторов РЛС с ответным сигналом опознавания

Достоинством совмещённой системы является то, что она не требует установки на радиолокационных станциях никаких дополнительных устройств.

Недостатки:

1. Так как существует много различных типов РЛС, работающих в разных диапазонах, эта система требует установки на самолётах нескольких ответчиков.

2. Ответчик отвечает на каждый импульс РЛС, независимо от того нужно это в данный момент или нет, что облегчает противнику обнаружение самолёта с таким ответчиком.

3. При наличии в воздухе большого количества самолётов возможно срабатывание ответчика от отражённых импульсов, что приводит к нарушению работы всей системы опознавания.

**Автономная система опознавания.** По своему устройству эта система более совершенна. Всей РЛС придаётся однотипный запросчик, который представляет собой маломощную РЛС (рис. 37). При необходимости опознавания обнаруженной цели оператор на несколько секунд включает передатчик запросчика. Передатчик работает в импульсном режиме синхронно с РЛС. Передатчик запросчика и ответчик настроены на волну отличную от волны РЛС.

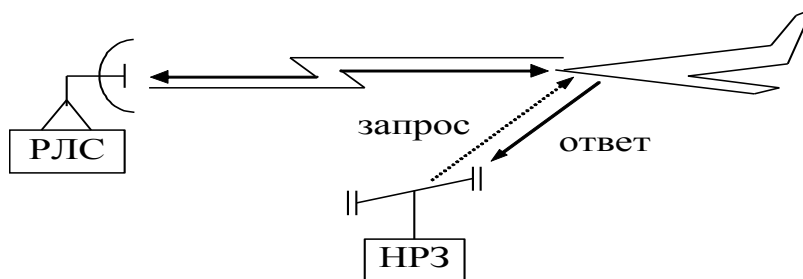


Рис. 37. Принцип действия автономной системы опознавания.

Ответные импульсы почти не воздействуют на антенну и приёмник РЛС, а воспринимаются антенной запросчика, усиливаются и преобразуются приёмником запросчика и наблюдаются на индикаторе (рис. 36). Чтобы ответчик отвечал только на вопросы своих РЛС сигналы запросчиков и ответчиков должны быть кодированы.

Наиболее надёжное кодирование – группирование запросных импульсов. В ответчике применяется схема, которая запускает передатчик только в случае поступления определённого количества импульсов, разделённых паузами определённой длительности. Код устанавливают на определённый промежуток времени, а потом меняют другим.

#### § 2.4. Эффективная площадь рассеивания цели

Под эффективной площадью рассеивания (ЭПР) цели понимают такую поверхность, которая при равномерном рассеивании энергии по всем направлениям даёт такую же интенсивность отраженного сигнала в месте приема, как и реальная цель.

Реально энергия рассеивается в различных направлениях по-разному, однако учесть направленность вторичного излучения весьма трудно, так как при облучении сложного объекта (ракета, самолет и т. д.) характер отражения сигнала от различных элементов объекта все время изменяется в следствии изменения ориентации и вибрации цели. Одновременно изменяются фазовые соотношения между сигналами, отраженными от различных элементов. Поэтому направленностью отраженного сигнала обычно пренебрегают.

Цели с большой эффективной площадью рассеивания дают большую амплитуду отраженного сигнала. Величина  $S_e$  в зависимости от характера воздушной цели колеблется в пределах от единиц до сотен квадратных метров.

Средние значения ЭПР некоторых целей

Тип цели	$S_e, \text{ м}^2$
Истребитель	3...5
Дальний бомбардировщик	20
Головка баллистической ракеты	0,2
Транспортный самолет	50
Человек	0,8

Не при любой дальности цели мощность отраженного сигнала достаточна для того, чтобы различить на экране индикатора отраженный импульс на фоне шумов. Расстояние до цели, при котором мощность отраженного сигнала  $P_c$  упадет до значения  $P_{c, \text{min}}$ , и будет мак-

симальной дальностью действия станции. При большей дальности цели мощность  $P_c < P_{c, \min}$ , а отраженный импульс на экране индикатора будет не различим в шумах. Максимальная дальность действия радиолокационной станции

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{\max} G S_e S_A}{16\pi^2 P_{c, \min}}}$$

Из формулы следует, что максимальная дальность действия радиолокационной станции  $D_{\max}$  растет прямо пропорционально корню четвертой степени максимальной импульсной мощности  $P_{\max}$ , коэффициента направленного действия передающей антенны  $G$ , эффективной площади приемной антенны  $S_A$  и эффективной отражающей площади рассеивания цели  $S_e$ . Кроме того, дальность  $D_{\max}$  тем больше, чем выше чувствительность приемника.

Чтобы увеличить максимальную дальность действия в два раза, необходимо повысить мощность передатчика в 16 раз. Более эффективным способом увеличения дальности является увеличение коэффициента направленного действия (КНД) антенны  $G$ .

На максимальную дальность действия влияют не только параметры самой станции, но и свойства цели. Поэтому, указывая для определенного типа станции значение  $D_{\max}$ , оговаривают, для какой именно цели (например, для какого типа самолета) дается это значение.

### Зоны видимости РЛС

Зоной обнаружения станции называется пространство, в пределах которого станция обнаруживает цели с заданной вероятностью и измеряет координаты цели с заданной точностью.

Зоной видимости называется область пространства, на границе которой цель обнаруживается с заданной вероятностью.

Случайный характер положения границы зоны видимости обусловлен вуалированием сигнала шумом и флуктуацией ЭПР цели. Вследствие этого обнаружение сигнала происходит случайно, т. е. может произойти, а может и не произойти.

Граница зоны видимости определяется результирующей диаграммой направленности антенны (ДНА). В РЛС обнаружения и целеуказания ДНА известна раздельно в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Зоны видимости поэтому тоже строятся в этих плоскостях. Зона видимости в вертикальной плоскости берется по максимуму ДНА в горизонтальной плоскости.

Зона видимости в горизонтальной плоскости представляет собой горизонтальное сечение на определенной высоте зон видимости в вертикальной плоскости. На ровной однородной позиции зона видимости в горизонтальной плоскости является окружностью.

На неровной позиции зона видимости в горизонтальной плоскости определяется из совокупности зон видимости вертикальной плоскости для характерных азимутальных направлений с учетом экранирующего действия местных предметов на заданной высоте.

Максимальная дальность действия, дальность действия на определенной высоте, диаграмма направленности антенны на позиции уточняются на основе данных, полученных в реальных условиях эксплуатации РЛС. В необходимых случаях уточнение может производиться путем облета.

## Раздел 3. Методы определения координат цели

### § 3.1. Импульсный метод определения дальности

Для того чтобы определить положение цели в пространстве, необходимо определить её координаты. Одной из важных координат является дальность.

Различают следующие методы определения дальности до цели:

- частотный метод с непрерывным излучением;
- фазовый метод с непрерывным излучением;
- частотно-импульсный метод;
- импульсный метод.

В соответствии с этим различают и методы радиолокации. В большинстве эксплуатируемых в настоящее время радиолокационных станций применяется импульсный метод определения расстояния.

Существенным **достоинством** импульсного метода является:

- удобство визуального наблюдения цели в виде отметки на экране электронно-лучевой трубки;

- возможность размещения передатчика и приёмника на одной станции;
- поочерёдная работа передатчика и приёмника станции с использованием одной антенны.

В то же время импульсный метод имеет **недостатки**:

- большую пиковую мощность излучения, создающую опасность пробоя на выходе передатчика и антенно-волноводного тракта;

- широкую полосу пропускания приёмника, необходимую для неискажённого усиления импульсных сигналов и снижающую помехоустойчивость, и дальность действия РЛС;

- наличие «мёртвой» зоны, делающей невозможным обнаружение и определение координат целей вблизи станции;

- трудность разделения сигналов, отражённых от неподвижных и движущихся целей, требующая применения в импульсных РЛС специальных систем селекции движущихся целей (СДЦ).

Большинство из указанных недостатков импульсного метода можно существенно ослабить путём применения оптимальных фильтров, корреляционных приёмников, систем СДЦ и др.

В импульсных РЛС задача измерения дальности сводится к измерению времени запаздывания  $t_{\text{зап}}$  импульсов, отражённых от цели, по отношению к моменту излучения зондирующих импульсов (рис. 38). В этом случае:

$$D = \frac{Ct_{\text{зап}}}{2}, \quad t_{\text{зап}} = \frac{2D}{C}.$$

Встаёт вопрос, каким образом измерить  $t_{\text{зап}}$  с высокой точностью. Для измерения  $t_{\text{зап}}$  с высокой точностью необходимо выбрать эталон, с которым она будет сравниваться в процессе измерения и способ сравнения. Эти обстоятельства и будут определять метод измерения дальности.

Поскольку в импульсной РЛС измерение дальности сводится к измерению текущего времени запаздывания  $t_{\text{зап}}$  отражённого от цели сигнала относительно зондирующего, то при этом целесообразно производить не непосредственное измерение, а косвенное, т. е. обеспечить его сравнение со временем задержки  $t_{\text{зАД}}$  вспомогательных визирных импульсов, вырабатываемых устройством временной задержки.

Для измерения времени задержки в качестве эталона в РЛС РПК-1 используется период эталонных электромагнитных колебаний кварцевого генератора  $U_{\text{кГ}}(t) = U_{\text{кГ}} \sin \omega_{\text{кГ}} t$ , относительная стабильность которого довольно высока  $\approx 5 \times 10^{-7}$ .

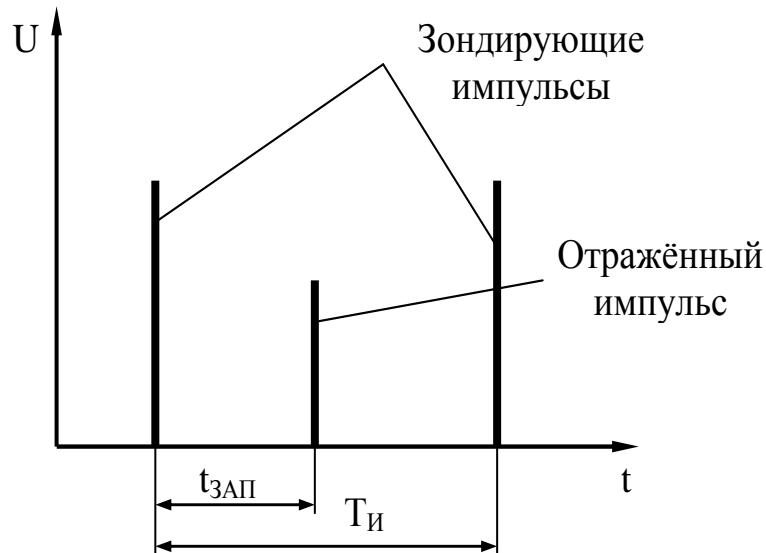


Рис. 38. Импульсный метод определения дальности

Период колебаний кварцевого генератора  $T_{\text{кв.г}}$  обычно выбирается таким, чтобы он соответствовал времени запаздывания сигнала, отражённого от цели, находящейся на расстоянии  $D_0 = 1000$  м. В этом случае  $T_{\text{кв.г}} = \frac{2D_0}{C} = \frac{2}{299756 \pm 16} = 6,67$  мкс, и частота кварцевого генератора  $f_{\text{кв.г}} = (149878 \pm 8)$  Гц. Обычно в эксплуатационной документации приводится величина  $f_{\text{кв.г}} = 150$  Гц.

Целое число периодов кварцевого генератора даёт возможность измерить дальность до цели с точностью до 1 км. Такая точность явно низкая.

Для более точного измерения необходимо обеспечить измерение времени задержки и в пределах  $T_{\text{кв.г}}$ . Для этой цели в качестве устройства управления фазой колебаний кварцевого генератора в пределах периода целесообразно применить фазовращатель, в котором угол поворота ротора  $\alpha_{\text{ф.в}}$  соответствует величине изменения фазы колебаний кварцевого генератора  $\alpha_{\text{ф.в}} = \varphi$ , где  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ , т. е. на выходе фазовращателя напряжение колебаний будет иметь вид:

$$U_{\text{ф.в}} = U_{\text{к.г}} \sin(\omega_{\text{к.г}} t + \varphi).$$

Таким образом, измерение времени задержки можно осуществить в соответствии с зависимостью:

$$t_{\text{зад}} = nT_{\text{кв.г}} + t'_{\text{зад}},$$

где  $n$  – число периодов колебаний,  $0 \leq t'_{\text{зад}} \leq T_{\text{кв.г}}$ .

Для ликвидации неоднозначности в отсчёте времени  $t_{\text{зад}}$  в структурной схеме измерения дальности необходимо иметь два канала: канал грубой задержки, обеспечивающий измерение целого числа периодов  $nT_{\text{кв.г}}$  и канал точной задержки для измерения

$$t'_{\text{зад}} = \frac{\varphi}{2\pi T_{\text{кв.г}}}.$$

Следовательно, устройство временной задержки при данном способе измерения является двухканальным. Результат измерения обычно фиксируется импульсом напряжения. Его временное положение характеризует величину  $t_{\text{зад}}$ , поэтому он называется измерительным импульсом дальности (ИИД).



Для точной фиксации временного интервала  $t_{3AD}$  необходимо иметь кратковременные импульсы, жёстко связанные с фазой колебаний кварцевого генератора на выходе фазовращателя. Их можно получить с помощью преобразователя. Для выделения кратковременных импульсов, временное положение которых изменяется в пределах  $T_{кв.г.}$ , необходимо иметь селектор.

В РЛС РПК кварцевые генераторы могут работать в непрерывном режиме, а могут запускаться в каждом периоде повторения специально формируемыми импульсами дальности сопровождения. В последнем случае для исключения первых нестабильных периодов колебаний запуск его осуществляется раньше начала отсчёта дальности на несколько периодов ( $4 \dots 7T_{кв.г.}$ ). Формирование кратковременных импульсов, жёстко связанных с фазой колебаний напряжения кварцевого генератора, можно осуществлять в преобразователе с помощью ограничителя напряжения колебаний, с выхода фазовращателя с последующим дифференцированием и выделением импульсов одной полярности.

### **§ 3.2. Методы определения угловых координат**

Исходя из основного назначения РЛС РПК определение текущих угловых координат одной цели при сопровождении с точностью 0-01...0-02, необходимо, чтобы ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) станции была игольчатой формы, а ширина луча не превышала нескольких градусов. С другой стороны, для обеспечения обнаружения воздушных целей в требуемом секторе поиска ширина ДНА станции должна иметь величину угла в вертикальной плоскости порядка  $15^\circ \dots 20^\circ$ . Таким образом, аппаратура РЛС РПК должна обеспечивать решение двух противоречивых задач:

- точно определить координаты целей;
- обеспечить обнаружение цели при поиске.

Предпочтение отдают первой задаче, которая является главной.

Существует несколько методов определения угловых координат цели, имеющие различную точность и различное техническое осуществление:

1. Метод максимального сигнала является самым грубым, однако, в то же время наиболее простой по техническому осуществлению и широко используется для РЛС в режиме поиска.

2. Метод минимального сигнала — это более точный метод, но техническая реализация сложна, отсчёт угловой координаты цели производится при отсутствии сигнала цели.

3. Метод развёртывания по центру тяжести качки является точным методом определения угловых координат, но для технической реализации этого метода необходимо для каждой измеряемой угловой координаты  $\beta$  и  $\epsilon$  иметь свою собственную систему. Антенна такой станции будет громоздкой.

4. Метод равносигнальной зоны, является точным методом и технически чаще всего реализуется в двух решениях: при коническом или моноимпульсном методе обзора пространства.

Моноимпульсный метод является самым точным, так как при этом методе полностью исключается влияние изменения эффективной отражающей площади цели. Технически реализуется сложно.

При коническом методе точность также достаточно велика, кроме того, этот метод позволяет полностью автоматизировать процесс определения текущих угловых координат цели. При этом используется простая и надёжная конструкция антенны, имеющая небольшие габариты.

Рассмотрим более подробно этот метод. Так при коническом методе обзора пространства ДНА РЛС имеет игольчатую форму, сама же диаграмма смещена относительно оси антенны на угол  $\Psi_0$ ,  $\Psi_0 = (0,25 \dots 0,4)\theta_{0,5}$ . К тому же ДНА вращается с постоянной угловой скоростью, описывая в пространстве конус (рис. 39).

Если представить в пространстве плоскость  $N$ , проходящую через цель и перпендикулярную геометрической оси антенны, то при вращении луча ось ДНА опишет на этой плоскости окружность.

Если цель находится в точке Ц, т. е. на геометрической оси антенны, то при любом положении ДНА импульсы, отражённые от цели будут оставаться неизменными (рис. 40). Поэтому направление на точку Ц называется направлением равносигнальной зоны или электрической осью антенны, которая совпадает с геометрической.

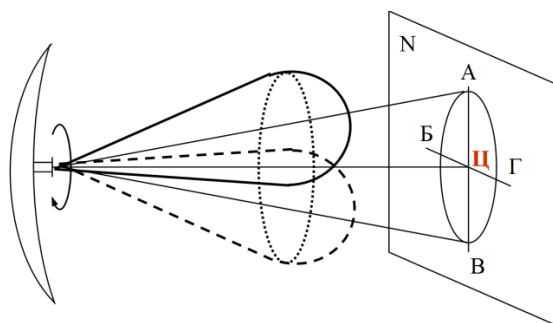


Рис. 39. Конический метод обзора пространства

Если цель из точки Ц сместится, допустим, в точку А, то величина принятых станцией отражённых от этой цели импульсов будет максимальной.

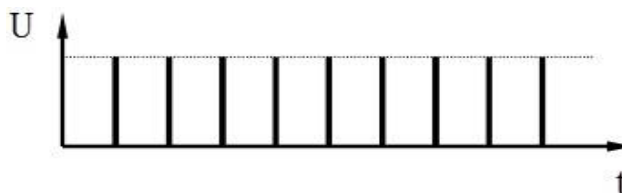


Рис. 40. Отраженные от цели импульсы при нахождении цели в точке Ц

Минимальная же величина отражённых импульсов будет тогда, когда ось диаграммы направленности отклонена от оси антенны в сторону, противоположную смещению. Таким образом, при вращении диаграммы направленности с постоянной скоростью величина отражённых сигналов периодически изменяется по закону близкому к синусоидальному, т. е. оказывается промодулированной. Амплитуда периодических изменений величин отражённых сигналов в некоторых пределах приблизительно пропорциональна отклонению цели от геометрической оси антенны (рис. 41).

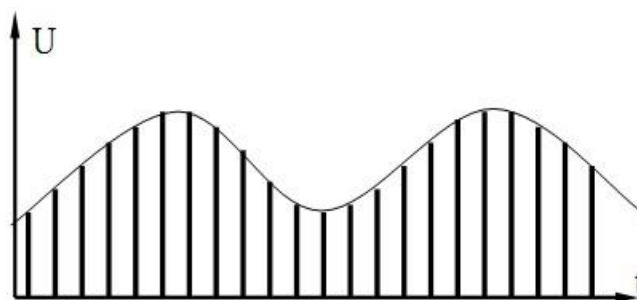


Рис. 41. Амплитуда периодических изменений величин отраженных сигналов

Сравнение сигналов, принятых в верхнем и нижнем положении луча, даёт возможность определить угол места, а сравнение сигналов при правом и левом положении луча даёт возможность определить азимут цели.

Недостатком метода равносигнальной зоны является то, что при определении координат интенсивность облучения цели несколько меньше максимальной (на 20...40 %) вследствие чего уменьшается дальность действия станции.

## Раздел 4. Линии передачи электромагнитной энергии. Антенны РЛС

### § 4.1. Назначение и типы линий передачи электромагнитной энергии

Для передачи электромагнитной энергии от источника к нагрузке служат линии передачи. Линии, применяемые для передачи электромагнитной энергии, бывают *однопроводные* и *многопроводные*. Наибольшее применение в радиотехнике находят двухпроводные линии.

Простейшая двухпроводная линия (рис. 42) представляет собой два линейных, близко расположенных параллельных проводника. Точки, к которым подключен генератор, называются входом линии. Нагрузка подключается на противоположном конце линии, который называется выходом. По одному из проводов линии (прямому) течет ток от генератора к нагрузке, а по второму (обратному) ток возвращается к генератору.



Рис. 42. Двухпроводная линия

Линия называется *длинной*, если ее длина сравнима с длиной волны генератора или превышает ее. Длинные линии, соединяющие антенны с передатчиками или приемниками, называются *фидерами*. В радиотехнике длинные линии используются также в качестве трансформаторов сопротивлений опорных изоляторов, колебательных контуров, реактивных сопротивлений и фильтров.

Каждая линия характеризуется первичными и вторичными параметрами. К первичным относятся индуктивность  $L$ , емкость  $C$ , активное сопротивление  $R$  и активная проводимость (утечка)  $G$ , к вторичным – волновое сопротивление  $\rho$ , скорость распространения электромагнитной энергии и коэффициент затухания.

По конструкции различают 4 типа линий:

- 1) воздушную;
- 2) изолированную;
- 3) экранированную;
- 4) коаксиальную.

*Линии передачи* электромагнитной энергии предназначены для передачи энергии с минимумом потерь и отсутствием излучения энергии, то есть отсутствием антенного эффекта. Рассмотрим конструкции линий:

1. Воздушная (открытая) линия (рис. 43). Состоит из двух параллельных прямолинейных проводов диаметров 1...6 мм. Расстояние между проводами менее четверти длины волны, обычно оно составляет 5...30 см и поддерживается с помощью изоляторов.

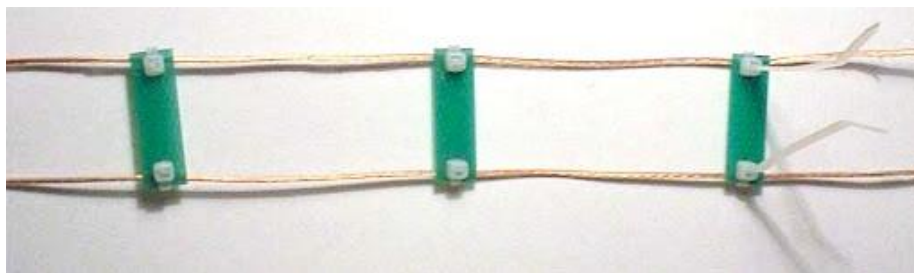


Рис. 43. Воздушная (открытая) линия

2. Изолированная линия (рис. 44). Отличается от воздушной тем, что ее провода окружены высокочастотным диэлектриком, защищенным от механических повреждений наружной изоляцией (резиной).



Рис. 44. Изолированная линия

Так как пробивное напряжение диэлектрика больше, чем воздуха, по изолированной линии можно подать большую мощность, чем по воздушной линии тех же размеров. Изолированная линия более удобна при монтаже.

3. Экранированная линия, (двухпроводной кабель) (рис. 45). Отличается наличием экрана – медной гибкой оплетки или свинцовой оболочки.



Рис. 45. Экранированная линия

Экран полностью устраняет антенный эффект и влияние внешних электромагнитных полей. Для прокладки экранированной линии не требуется изолятора ее можно прокладывать в земле, в воде, если экраном служит свинцовая оболочка.

4. Коаксиальная линия (рис. 46). Коаксиальной называют линию, состоящую из внешнего и внутреннего проводов, расположенных коаксиально (соосно). Слово «коаксиальный» произошло от латинского *axis* – ось и приставки *co* – совместный. Соосное расположение проводников защищает кабель от внешнего электромагнитного поля и обеспечивает передачу сигнала с небольшими энергозатратами. Внешний провод представляет медную оплетку или медную трубу жесткой конструкции.

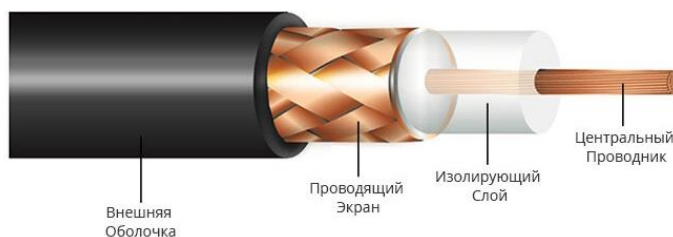


Рис. 46. Коаксиальная линия

Провода изолированы один от другого колпачками из высококачественного диэлектрика или сплошным эластичным диэлектриком. Коаксиальная линия не симметрична.

В радиолокационной технике применяются следующие типы линий передачи электромагнитной энергии:

- двухпроводная линия (воздушная, изолированная и экранированная);
- коаксиальная линия (гибкая, жесткая);
- волноводы.

Первые два типа линий, применяемые для соединения антенны с передатчиком или приемником, называются *фидерами*.

*Гибкие коаксиальные фидеры* состоят из внутреннего и внешнего проводов, расположенных концентрически (соосно). Внешний вид представляет собой гибкую, мощную оплетку. Пространство между внутренним проводом и оплеткой заполнено эластичным диэлектриком, например, фторопластом или полиэтиленом. Медная оплетка защищена от механических повреждений наружной виниловой оболочкой.

Электромагнитное поле коаксиального фидера заключено между наружной поверхностью внутреннего провода и внутренней поверхностью внешнего провода. Так как внешний провод коаксиального фидера, обычно, заземлен, то электромагнитное поле создается только токами и зарядами внутреннего провода, а внешний провод выполняет роль экрана. Следовательно, потери энергии на излучение отсутствуют, а само поле внутри фидера защищено от влияния внешних полей.

Гибкие коаксиальные фидеры применяются в радиотехнической аппаратуре, работающей на волнах участка метрового диапазона ( $\lambda = 1 \dots 3$  м).

*Волноводами* называются полые металлические трубки, способные передавать электромагнитную энергию определенной частоты (рис. 47). Они применяются в качестве линий передач радиотехнической аппаратуры, работающей в сантиметровом диапазоне волн ( $f \sim 3000$  МГц). По своей конструкции волноводы бывают двух типов: прямоугольного и круглого сечения.



Рис. 47. Волноводы

Переход от двухпроводной открытой линии к прямоугольному волноводу и возможность передачи по нему электромагнитной энергии объясняется следующим образом. В двухпроводной открытой линии, нагруженной на сопротивление  $R_n = p$  и питаемой генератором в т. ч. тока, существует режим бегущих волн.

Энергия передается вдоль линии от генератора к нагрузке полностью поглощается последней. Если в этой линии с двух сторон подключить короткозамкнутые металлические отрезки, длина которых составляет  $\lambda/4$ , то свойства линии от этого не изменятся, так как входное сопротивление этих отрезков бесконечно большое. В линии по-прежнему будет существовать режим бегущих волн. Если к линии подключить бесконечно большое число таких отрезков, плотно прилегающих друг к другу, то образуется прямоугольный волновод, по которому энергия по-прежнему будет передаваться от генератора к нагрузке.

По сравнению с коаксиальным фидером волноводы обладают следующими *преимуществами*:

1. В волноводе нет внутреннего провода и поддерживающих его изоляторов, поэтому электрические и активные потери энергии в нем меньше.
2. При одинаковых геометрических размерах с коаксиальным фидером волновод позволяет передавать энергию большей мощности без опасности пробоя, так как у него линия пробоя длиннее, чем у фидера.

3. Полная экранировка передаваемой по нему электромагнитной энергии, что исключает потери ее на излучение и воздействие на нее внешних полей.

*Недостатком* является невозможность передачи энергии волн любой длины. Внутри волновода могут распространяться волны короче некоторой предельной (критической) волны. Длина предельной волны связана с размерами поперечного сечения волновода и типом волны.

#### **§ 4.2. Антенные устройства**

Система проводников, служащих для получения электромагнитной энергии и ориентированных определенным образом в пространстве, при помощи различного рода приспособлений и механизмов называется антенным устройством.

*Антенной* называется электрическая часть антенного устройства, принимающая непосредственное участие в излучении электромагнитной энергии.

Все многообразие антенн независимо от их конструкции, но в зависимости от характера распределения в пространстве излучаемой энергии, разделяют на два вида:

- антенна направленного действия;
- антенна ненаправленного действия.

*Антеннами направленного действия* называются такие антенны, которые излучают электромагнитную энергию преимущественно в одном направлении.

*Направленные антенны* применяются при магистральных связях, для связи между двумя корреспондентами и во всех радиолокационных станциях.

*Достоинством* этих антенн являются:

- рациональное использование излучаемой энергии, в целях облучения заданного пространства;
- уменьшения действия помех;
- отсутствие побочного бесполезного облучения;
- возможность определения угловых координат цели.

*Недостатком* таких антенн является малый угол зрения.

*Антеннами ненаправленного действия* называются такие антенны, которые излучают электромагнитную энергию во всех направлениях.

Направленные антенны применяются только при коротких, и ультракоротких волнах. Антенны ненаправленного действия применяются для волн всех диапазонов. В зависимости от полосы частот излучаемой энергии, которую может пропустить антенна, различают:

- антенны настроенные;
- антенны диапазонные.

Настроенные системы пропускают только строго определенную частоту колебаний излучаемой энергии, т. е. могут работать на определенной длине волны. В процессе работ переход с одной волны на другую невозможен. К настроенным антеннам принадлежат все антенны РЛС и некоторые антенны коротких волн.

Диапазонные антенны позволяют изменить пропускаемую частоту в некоторых пределах при сохранении излучающих свойств и направленности.

#### **Основные характеристики и параметры антенн**

Для описания свойств антенн используются следующие основные характеристики и параметры:

- входное сопротивление;
- коэффициент полезного действия;
- диаграмма направленности;
- коэффициент направленного действия;
- коэффициент усиления;

- действующая высота антенны, поглощающая поверхность антенны;
- коэффициент защитного действия приемной антенны.

Перечисленные характеристики и параметры относятся как к передающим, так и приемным антеннам. Исключение составляет коэффициент защитного действия, являющийся параметром только приемных антенн.

**1. Входное сопротивление** является важным параметром антенны. Входным сопротивлением ( $Z_A$ ) передающей антенны называется сопротивление, на которое нагружен питающий фидер антенны. В случае передающей антенны оно определяется, как отношение амплитуды входного напряжения  $U_m$  к амплитуде входного тока  $I_m$  и содержит в общем случае как активную составляющую  $R_A$ , в которую входят сопротивление излучения, отнесенное к току на входе антенны ( $RZ_A$ ) и сопротивление потерь  $R_A = RZ_A + R_p$ .

**2. Коэффициент полезного действия** антенны определяется, как отношение мощности  $P_{изл}$ , излучаемой антенной в пространство, к мощности  $P_A$ , подведенной к ней передатчиком.

**3. Диаграмма направленности** – это графическое изображение мощности или напряженности поля, создаваемых антенной по различным направлениям (рис. 48). Строят диаграммы направленности в полярных или прямоугольных координатах. Различают диаграммы направленности по напряженности поля и по мощности. У любой реальной антенны имеется направление максимального излучения, называемое основным направлением ДНА.

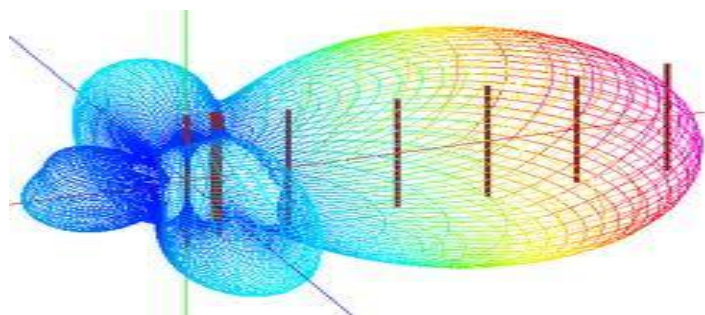


Рис. 48. Диаграмма направленности параболической антенны

Диаграммы направленности в большинстве случаев имеют несколько максимумов, отделенных друг от друга минимумами.

Область, примыкающая к максимуму и расположенная между двумя минимумами, называется *лепестком*. Лепесток, соответствующий максимальному излучению, называется основным, другие лепестки называются боковыми.

Обнаружение цели производится по направлению основного лепестка. Боковые лепестки являются паразитными и поэтому применяются такие конструкции антенн, у которых боковые лепестки диаграммы направленности уменьшены. Основной характеристикой диаграммы направленности является *ширина диаграммы направленности*.

Ширина ДНА определяется углом направленности или углом раствора. Углом раствора антенны называется угол между прямыми, исходящими из центра антенны, по направлению которых мощность излучения (приема) равна 0,5 от мощности или 0,707 от напряженности поля в направлении основного лепестка. Ширина ДНА измеряется в градусах в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

**4. Коэффициент направленного действия** – это отношение мощности в направлении максимального излучения  $P_m$  к средней мощности  $P_{ср}$ , излучаемой по всем направлениям.  $D = P_m/P_{ср}$ .

**5. Коэффициент усиления.** Под коэффициентом усиления передающей антенны понимают отношение мощности излучения, создаваемого антенной в данном направлении на расстоянии  $r$ , к мощности излучения стандартной антенны на том же расстоянии, при условии, что к обеим антеннам подводится одинаковая мощность.

**6. Действующая высота антенны** – это фиктивная длина некоторой эквивалентной линейной антенны с равнополярным распределением тока вдоль провода и «площадью тока», равной ( $S_i$ ) площади тока реальной антенны.

$$R_g = S_i / I_A,$$

где  $I_A$  – ток на клемме антенны.

**7. Эффективная поверхность антенны  $S_A$**  – это площадь эквивалентной плоской антенны с равномерным амплитудно-фазовым распределением, обладающей тем же максимальным значением коэффициента направленного действия, что и данная антенна. Из-за дифракции радиоволн, эффективная площадь антенны всегда меньше её геометрической площади. Слишком длинные волны антенну огибают, слишком короткие чувствительны к точности поверхности антенны. Площадь излучающей поверхности размером  $S_r$  равна

$$S_A = S_r \cdot K_{\text{ип}},$$

где  $K_{\text{ип}}$  – коэффициент использования поверхности.

### Типы антенн

Устройство антенн зависит от их назначения, диапазона работы и их геометрические формы весьма разнообразны. Наиболее часто встречаются следующие типы антенн:

- полуволновой (симметричный) вибратор – диполь;
- директорная антенна;
- щелевая и рупорная антенны;
- параболическая антенна.

**1. Симметричный вибратор, диполь** – простейшая и наиболее распространённая антенна. В наиболее простом варианте он представляет собой прямолинейный проводник длиной  $L = 2l$  (где  $l$  – длина плеча) (рис. 49, а), равный половине длины электромагнитной волны (рис. 49, б). Часто его называют – *полуволновым вибратором*. Длина плеча диполя составляет четверть длины волны, поэтому также его называют – *четвертьволновым вибратором*,  $\lambda/4$ . Питание вибратора осуществляется в середине от генератора высокой частоты. Наиболее широко применяется в УКВ диапазоне.

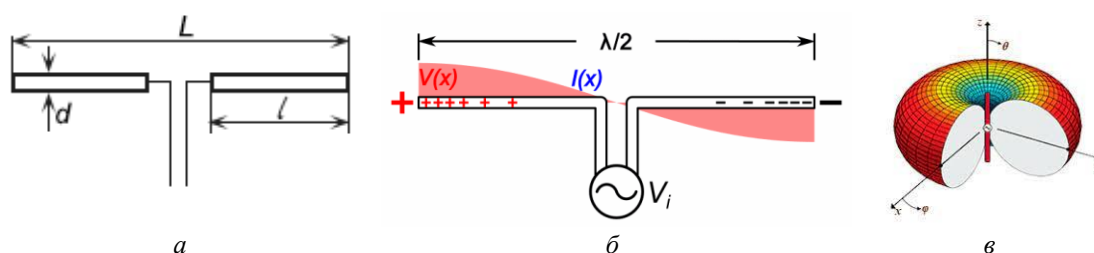


Рис. 49. Симметричный вибратор

Диаграмма направленности симметричного вибратора имеет торообразную форму исходящую от центра. ДНА вертикально расположенного диполя изображена на рис. 49, в. Такая антенна с одинаковым успехом принимает сигнал со всех направлений относительно горизонта.

**2. Параболические (зеркальные) антенны** являются одними из самых распространённых узконаправленных антенн диапазона УКВ. Зеркальная антенна – антенна, у которой электромагнитное поле в раскрыве образуется за счёт отражения электромагнитной волны от металлической поверхности специального зеркала (рефлектора). В качестве источника волны обычно выступает небольшой излучатель, располагаемый в фокусе зеркала. В его роли может быть любая другая антенна с фазовым центром, излучающая сферическую волну. Ос-



новная цель зеркальных антенн сводится к преобразованию сферического или цилиндрического фронта волны в плоский фронт. Обычно в зеркальных антеннах происходит преобразование более широкой диаграммы направленности облучателя в узкую диаграмму направленности самой антенны.

Кромка зеркала и плоскость  $Z$  образуют поверхность, называемую раскрывом зеркала. При этом радиус  $R$  называется радиусом раскрыва, а угол  $2\psi$  – углом раскрыва зеркала. От угла раскрыва зависит тип зеркала.

Фокус облучателя антенны может располагаться как в фокусе зеркала  $F$ , так и быть смещённым относительно него (рис. 50). Если фокус облучателя расположен в фокусе антенны, то она называется прямофокусной. Прямофокусные антенны существуют различных размеров, в то время как осесимметричные антенны, облучатель которых находится не в фокусе зеркала, обычно не превышают в диаметре более 1,5 м. Такие антенны часто называют офсетными. Преимущество офсетной антенны – это больший коэффициент усиления антенны, что обусловлено отсутствием затенения раскрыва зеркала облучателем. Рефлектор офсетных антенн представляет собой боковую вырезку из параболоида вращения. Фокус облучателей в таких антеннах расположен в фокальной плоскости рефлектора.

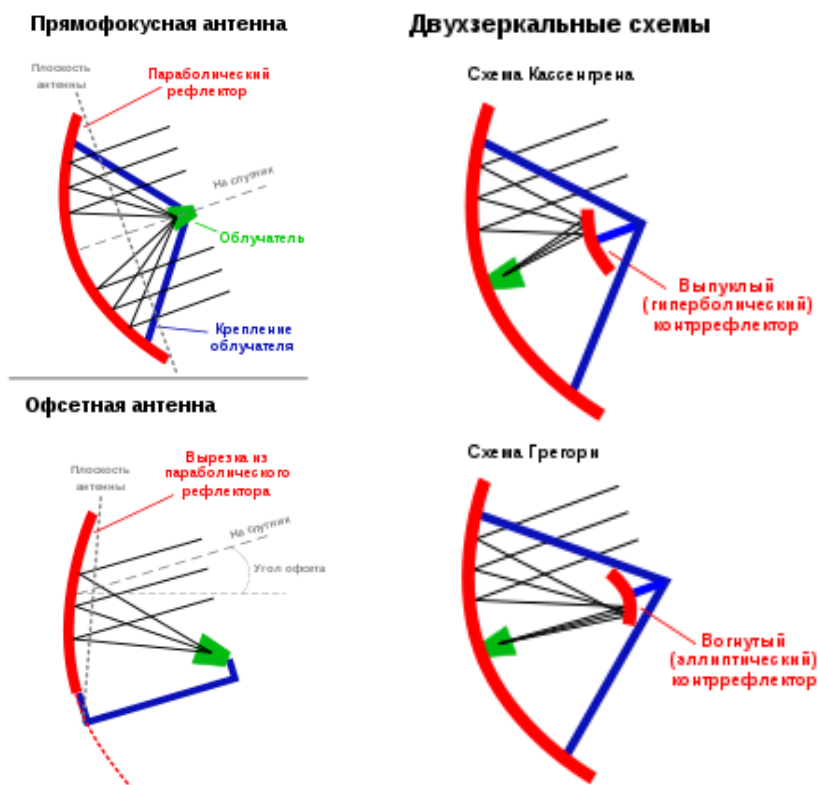


Рис. 50. Основные типы конструкций параболических антенн

Зеркальная антенна может иметь дополнительное эллиптическое зеркало (двухзеркальная схема Грегори) или дополнительное гиперболическое зеркало (двухзеркальная схема Кассегрена), с фокусами, расположенными в фокальной плоскости зеркальной антенны. При этом облучатель расположен в фокусе дополнительного зеркала.

Зеркальная антенна может иметь одновременно несколько облучателей, расположенных в фокальной плоскости антенны. Каждый облучатель формирует диаграмму направленности, направленную в нужном направлении. Облучатели могут работать в разных диапазонах волн или каждый одновременно в нескольких диапазонах.

Расположение фокуса и фокальной плоскости зеркала антенны не зависит от рабочего диапазона волн.

В зависимости от поставленных задач и облучателя зеркальная антенна формирует одну узконаправленную суммарную, суммарно-разностную диаграмму направленности (для пеленгаторов) или одновременно несколько разнонаправленных диаграмм – при использовании нескольких облучателей.

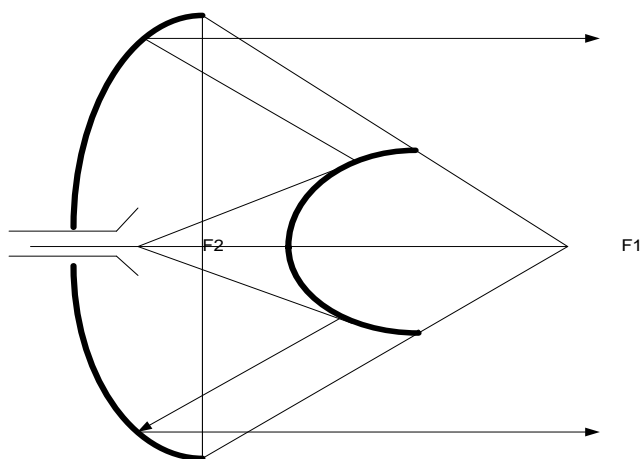


Рис. 51. Двухзеркальная параболическая антенна

представить обратную картину, если на параболический отражатель падает пучок параллельных лучей, то лучи будут сходиться в точка  $F_1$ . В точке  $F_1$  находится первичный излучатель в качестве которого применяется открытый конец прямоугольного волновода.

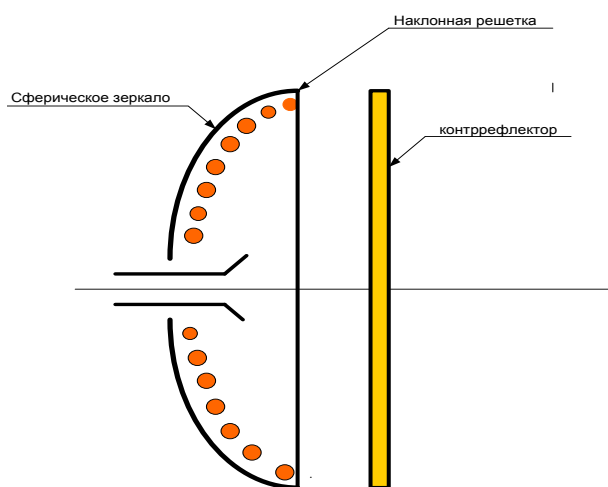


Рис. 52. Зеркальная система

*Контррефлектор* представляет собой плоскую решетку из параллельных металлических проволок. Расстояние между осями проволочек подобрано таким образом, что падающие на решетку электромагнитные волны, вектор  $E$  которых параллелен проволочкам решетки, полностью отражаются, а электромагнитные волны, вектор  $E$  которых перпендикулярен проволочкам беспрепятственно проходят через них.

*Наклонная решетка* (рис. 53) также составлена из параллельных проволок. Она расположена над поверхностью сферического зеркала на расстоянии  $\lambda/4$ . Проволочки решетки расположены под углом  $45^\circ$  по отношению к вертикальной оси зеркала.

**3. Двухзеркальная параболическая антенна** применяется в радиолокационной станции 1РЛ35 ЗАК С-60 (рис. 51). Она включает в себя основное параболическое зеркало, гиперболический отражатель, облучатель. Такая антенная система обладает следующим свойством: если в точку с фокусом  $F_1$  гиперболоида поместить источник лучей, то исходящие из точки  $F_1$  лучи встретят на своем пути поверхность гиперболоида, отразятся от нее и пойдут в направлении параболического отражателя, также как если бы источник излучения находился бы в точка  $F_2$ . Отразившись от параболоида, лучи формируются в пучок лучей, параллельных геометрической оси параболического отражателя. Нетрудно

**4. Двухзеркальная параболическая антенна с поляризационным фильтром** применяется в радиолокационной станции 1РЛ33 ЗСУ-23-4 «Шилка». Она предназначена для излучения электромагнитной энергии в пространство узким лучом и для приема энергии, отраженной от цели, находящейся в пределах этого луча. Конструктивные особенности такой антенны позволяют уменьшить ее габариты и создавать ДНА с узким лучом для пеленга воздушной цели. Антенна представляет собой двух зеркальную решетчатую систему с поворотом плоскости поляризации. Зеркальная система (рис. 52) состоит из контррефлектора (поляризационного фильтра) и рефлектора, состоящего из сферического зеркала и наклонной решетки, повторяющей профиль зеркала.

Облучатель излучает линейно поляризованные электромагнитные волны плоскость поляризации, которых (вектор  $E$ ) параллелен осям проволочек поляризационного фильтра (контррефлектора). Поляризационный фильтр расположен от рефлектора на расстоянии равном половине фокусного расстояния рефлектора (рис. 54).

Поляризованные волны отражаются от контррефлектора и падают на рефлектор. При отражении от рефлектора, за счет действия наклонной решетки плоскость поляризации вектора  $E$  поворачивается на  $90^\circ$  и становится перпендикулярной проволочкам поляризационного фильтра, т. е. проходит сквозь них свободно (рис. 55).

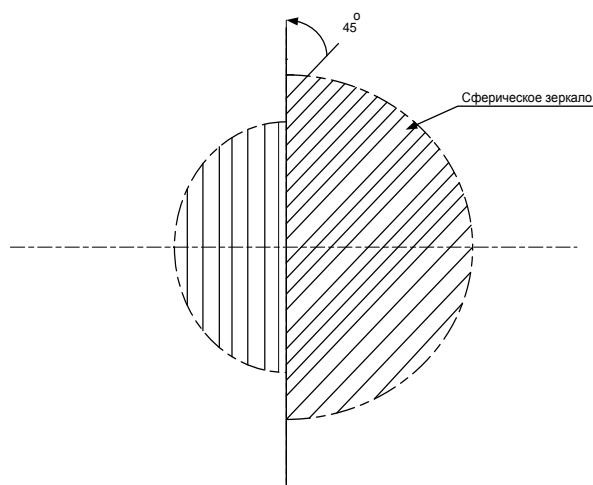


Рис. 53. Наклонная решетка

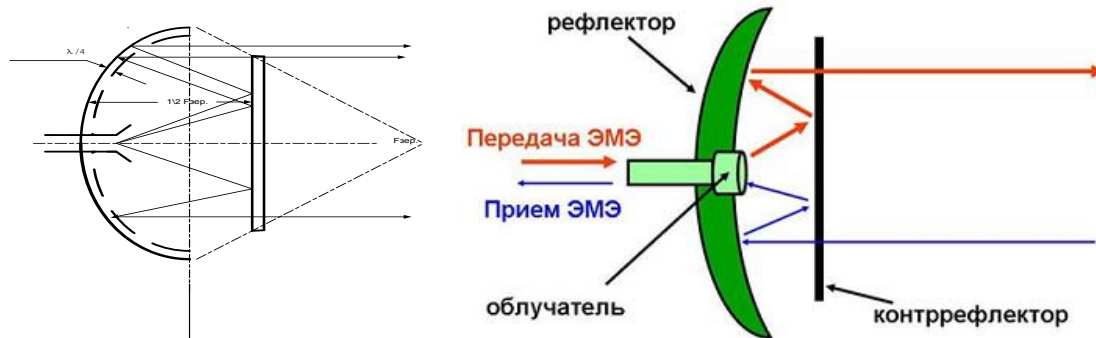


Рис. 54. Двух зеркальная параболическая антенна. Схема переизлучения

Поворот плоскости поляризации вектора  $E$  происходит следующим образом.

При падении волны на рефлектор отраженной от контррефлектора электромагнитной волны, вектор напряженности электрического поля  $E_{\text{пад}}$  можно представить, как сумму двух составляющих: составляющей параллельно проволочкам решетки  $E_{\parallel}$  и составляющей перпендикулярной проволочкам решетки  $E_{\perp}$ . Составляющая  $E_{\perp}$  перпендикулярная проволочкам решетки, проходит сквозь нее и отражается от рефлектора. Но так как расстояние между рефлектором и решеткой составляет  $\lambda/4$ , то до рефлектора и назад волна проходит расстояние равное  $\lambda/2$ , поэтому фаза вектора  $E_{\perp}$  изменится на  $180^\circ$  относительно вектора  $E_{\perp}$  падающей волны. В результате суммарный вектор  $E_{\text{отр}}$  оказывается повернутым на  $90^\circ$  по отношению к вектору  $E_{\text{пад}}$ . Что позволяет электромагнитной волне беспрепятственно проходить через поляризационный фильтр.

Поляризация вектора  $E$  излучаемой волны позволяет избирательно принимать отраженные от предметов электромагнитные волны, тем самым отстраиваться от различного рода активных неполяризованных помех.

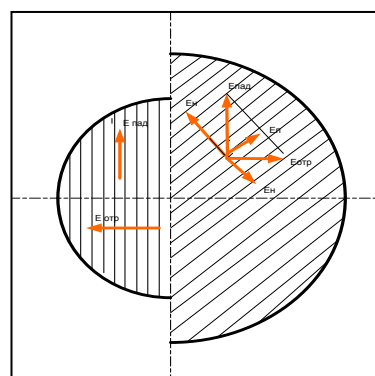


Рис. 55. Поляризация вектора  $E$  излучаемой волны

## Раздел 5. Импульсная техника

### *Введение*

Физический процесс, несущий информацию, называют **сигналом**. Сигналы могут быть звуковыми, световыми, электрическими. Информация сосредоточена в изменениях параметров физического процесса. Если параметры процесса не меняются, то он не является сигналом. Так, например, неизменный по тональности и громкости звук, световой поток или синусоидальное электрическое колебание с постоянной амплитудой или частотой никакого сообщения не содержат. Наоборот, в изменениях громкости и тона звука, яркости и цвета светового излучения, амплитуды, частоты или фазы электрического колебания запечатлена информация. Информативным является также появление или окончание, например, электрического колебания, т. е. его изменения.

Подобные сигналы называют *аналоговыми*. Между минимальным и максимальным значениями аналоговый сигнал может иметь любое значение. Обычно аналоговые сигналы являются непрерывными. Устройства, в которых производится обработка таких сигналов, называются аналоговыми. В отличие от аналогового сигнала *импульсный* имеет дискретную структуру.

При передаче сигнала через открытое пространство производят модуляцию высокочастотного колебания информационным сигналом, за счёт чего обеспечиваются эффективное излучение и приём сигнала.

*Импульсная техника* является составной частью радиоэлектроники ЗАК (ЗРК) и служит основой радиолокации, телевидения, радионавигации, многоканальной связи, компьютерной техники и др. Импульсная техника занимается изучением методов и средств получения и преобразования импульсов, а также управления ими. Задачи, стоящие перед импульсной техникой, выдвигаются потребностями практики в связи с множеством различных применений импульсных методов. К областям науки и техники, где эффективно используются импульсные методы, относятся также телеуправление, измерение электрических и неэлектрических величин, кодированная радиосвязь, промышленная автоматика.

Импульсная техника решает следующие задачи:

1. *Формирование импульсов* с помощью линейных и нелинейных электрических цепей. При этом из синусоидальных колебаний и различных импульсов формируются импульсы необходимой формы, длительности и полярности.
2. *Генерирование импульсов* релаксационными генераторами с самовозбуждением и с посторонним запуском. Параметры генерируемых импульсов определяются типом генератора и параметрами его схемы.
3. *Управление импульсами*, что включает синхронизацию генераторов импульсов и временную задержку импульсов, т. е. вопросы, связанные с управлением временным положением импульсов, а также вопросы счёта импульсов.

### **§ 5.1. Импульсы и их основные характеристики**

Под электрическим импульсом подразумевают кратковременное изменение тока (напряжения) относительно некоторого исходного уровня (не обязательно равного нулю). В любой электрической цепи наблюдаются переходные процессы. Под переходным процессом понимается всякое резкое изменение установившегося режима в электрической цепи за счёт действия внешних сигналов или переключений внутри самой цепи.

В импульсной технике применяются два вида импульсов – видеоимпульсы и радиоимпульсы (рис. 5б).

*Видеоимпульсы* – это импульсы постоянного тока (напряжения). Они могут быть, как положительными, так и отрицательными и имеют некоторую постоянную составляющую.

Радиоимпульсы – это импульсы высокочастотных колебаний напряжения или тока обычно синусоидальной формы, амплитуда и продолжительность которых зависят от параметров модулирующих колебаний. Параметры радиоимпульсов соответствуют параметрам видеоимпульсов. Огибающая радиоимпульса представляет собой видеоимпульс.

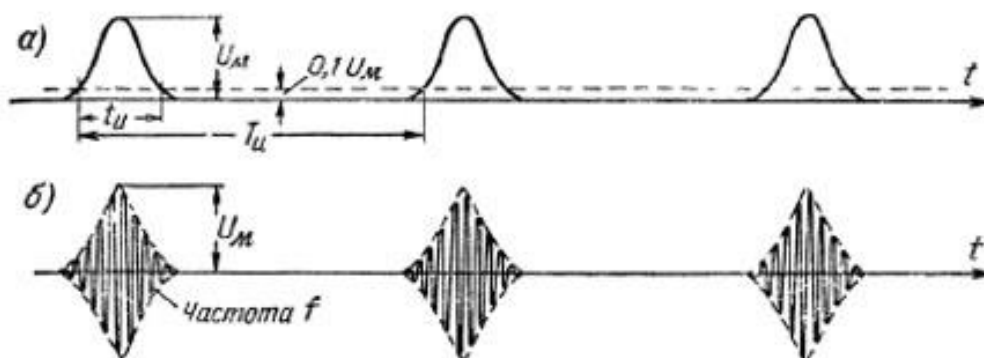


Рис. 56. Импульсы:  
а) видеоимпульсы, б) радиоимпульсы

Параметры импульсов (рис. 57):

- $U_m$  – амплитуда, наибольшая величина импульса;
- $\tau_{и}$  – длительность импульса, измеряется на уровне  $0,1 U_m$ ;
- $\tau_{ф}$  – длительность фронта, время нарастания амплитуды импульса определяется от  $0,1 U_m$  до  $0,9 U_m$ ;
- $\tau_{ср}$  – длительность среза, определяется как спад от  $0,1 U_m$  до  $0,9 U_m$ .

Уровни отсчета  $\tau_{ср}$ ,  $\tau_{и}$ ,  $\tau_{ф}$  должны оговариваться.

Дополнительным параметром радиоимпульсов является несущая частота  $f_{нес}$ .

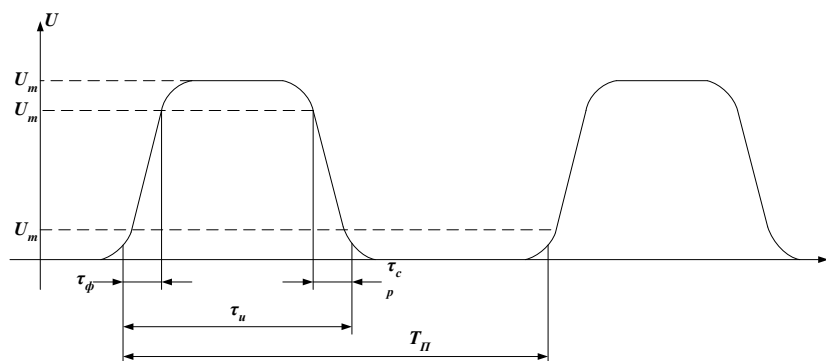


Рис. 57. Параметры импульсов

Периодическая последовательность импульсов характеризуется следующими параметрами:

- $T_n$  – период повторения (следования) – промежуток времени между началом двух соседних однополярных импульсов. Он выражается в секундах (с) или долях единицы секунды (мс; мкс; нс).
- $F_n = 1/T_n$  – частота повторения – величина, обратная периоду повторения. Она определяет количество импульсов, в течение одной секунды и выражается в герцах (Гц), килогерцах (кГц).

- $Q$  – скважность,  $Q = \frac{T_n}{\tau_{и}} = \frac{1}{F_n \tau_{и}}$ . Скважность – это безразмерная величина, которая может изменяться в очень широких пределах, так как длительность импульсов может быть в

сотни и даже тысячи раз меньше периода импульсов или, наоборот, занимать большую часть периода.

- $K_3$  – коэффициент заполнения,  $K_3 = \frac{1}{Q} = \frac{\tau_{и}}{T_{п}} = F_{п} \tau_{и}$ . Величина, обратная скважности, называется коэффициентом заполнения. Эта величина безразмерная, меньшая единицы.

В радиолокационной технике наиболее часто используются видеоимпульсы, различные по их форме: а) прямоугольные, б) остроконечные, в) пилообразные, г) трапецеидальные (рис. 58).

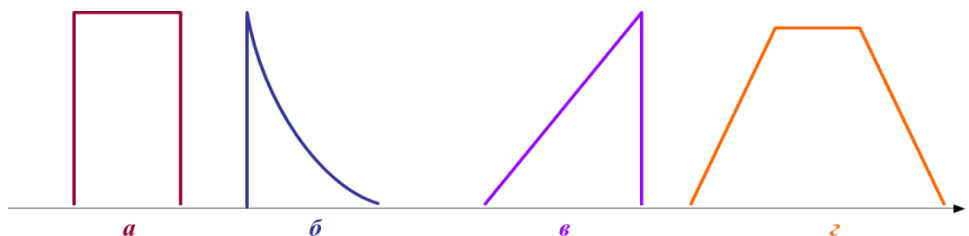


Рис. 58. Формы видеоимпульсов

Несмотря на кажущуюся простоту импульсных колебаний, они имеют сложный характер и состоят из бесчисленного множества синусоидальных (гармонических) составляющих, имеющих разную частоту, амплитуду и фазу.

Радиоимпульсы формируются в результате модуляции высокочастотного колебания информационным низкочастотным сигналом.

**Модуляция** (лат. *modulatio* – размеренность, ритмичность) – это процесс изменения одного или нескольких параметров модулируемого несущего сигнала при помощи модулирующего сигнала. Модуляция осуществляется в специальных устройствах – модуляторах. На один вход подается – управляющий сигнал  $U_{упр}(t)$ ; на второй вход – гармоническое несущее колебание  $U_{нес}(t)$ . На выходе появляется – модулированное колебание  $U_{мод}(t)$  (рис. 59). Обратный процесс – выделение модулирующего сигнала из модулированного колебания – называется **демодуляцией**.

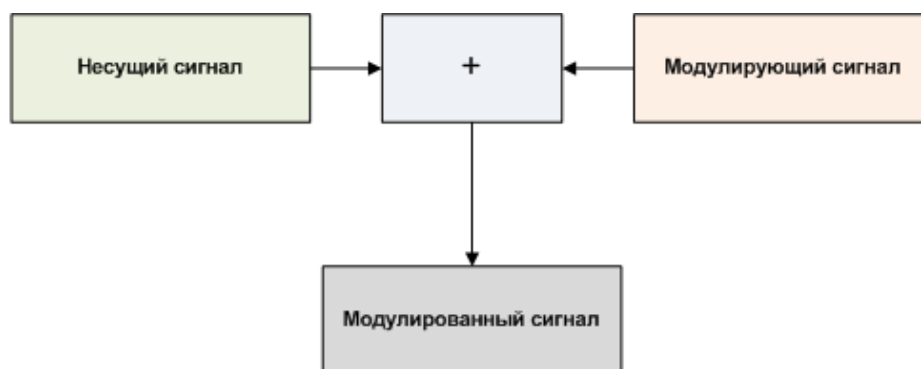


Рис. 59. Модуляция

В результате модуляции могут формироваться непрерывные и импульсные сигналы. Различают следующие виды непрерывной модуляции (рис. 60):

- амплитудная (АМ);
- частотная (ЧМ);
- фазовая (ФМ).

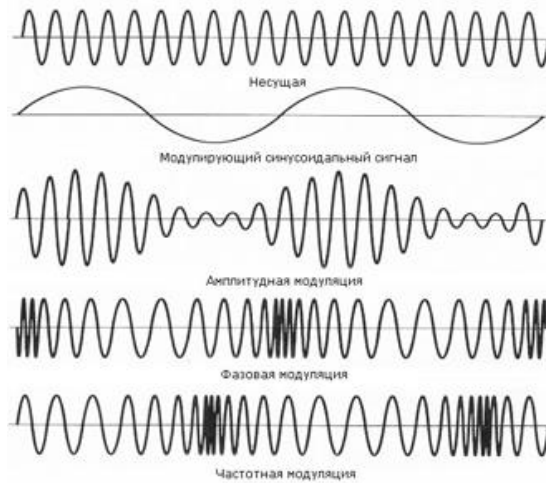


Рис. 60. Виды непрерывной модуляции. Эпюры

Гармоническое колебание, выбранное в качестве несущего, записывается в следующем виде:  $S(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ . Это колебание характеризуется тремя параметрами: амплитудой  $A$ , частотой  $\omega$  и начальной фазой  $\varphi$ . Модуляцию можно осуществить изменением любого из трех параметров по закону передаваемого сигнала.

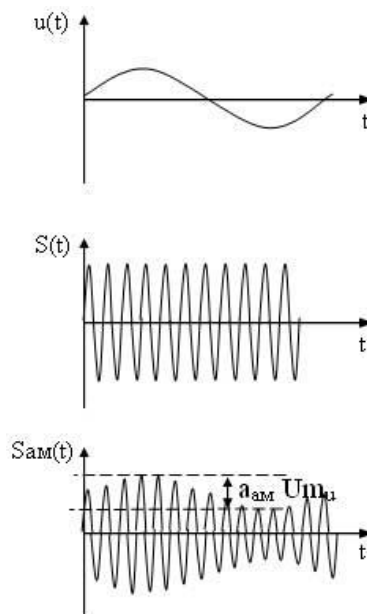


Рис. 61. Амплитудная модуляция

Например, изменение во времени амплитуды несущего колебания пропорционально первичному сигналу  $S(t)$ , т. е.  $U(t) = U + k_{AM}S(t)$ , где  $k_{AM}$  – коэффициент пропорциональности, называется **амплитудной** модуляцией (рис. 61).

Способ модуляции, при котором параметры несущего колебания меняются дискретно, называется **манипуляцией**. В зависимости от того, какие именно параметры изменяются, различают амплитудную, фазовую, частотную. Кроме того, при передаче цифровой информации используется несущее колебание, отличное по форме от гармонического. Так, при использовании в качестве несущего колебания последовательности прямоугольных импульсов возможны амплитудно-импульсная (АИМ), широтно-импульсная (ШИМ), частотно-импульсная (ЧИМ), фазоимпульсная модуляция (ФИМ). При использовании термина манипуляция, выражение «импульсная» можно не применять.

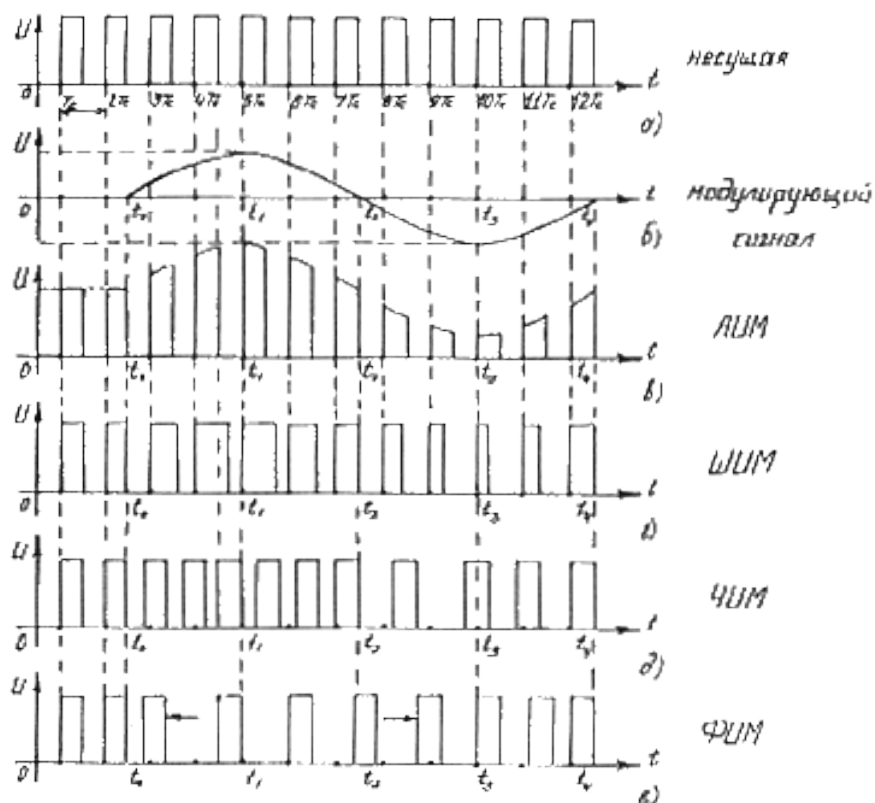


Рис. 62. Виды модуляции импульсного сигнала

АИМ – амплитудно-импульсная модуляция заключается в том, что амплитуда импульсной несущей изменяется по закону изменения мгновенных значений первичного сигнала (рис. 62).

ШИМ – широтно-импульсная модуляция. Заключается в том, что по закону изменения мгновенных значений модулирующего сигнала меняется длительность импульсов несущей при постоянстве их амплитуды и частоты следования.

ЧИМ – частотно-импульсная модуляция. По закону изменения мгновенных значений первичного сигнала изменяется частота следования импульсов несущей. Этот вид манипуляции не сложен в реализации и является более помехоустойчивым, чем амплитудная манипуляция.

ФИМ – фазоимпульсная модуляция, при которой сдвиг фазы импульса несущей частоты изменяется не относительно синхронизирующего импульса, а относительно некоторой условной фазы. Данные виды преобразования импульсов широко применяются в РЛС.

### § 5.2. Цепи формирования импульсов

В импульсной технике широко применяются цепи и устройства, формирующие напряжения одной формы из напряжения другой. Такие задачи решаются с помощью линейных и нелинейных элементов.

Элемент, параметры которого (сопротивление, индуктивность, ёмкость) не зависят от величины и направления токов и приложенных напряжений, называется линейным. Цепи, содержащие линейные элементы, называются *линейными*.

Свойства линейных цепей:

1. Вольтамперная характеристика (ВАХ) линейной цепи представляет собой прямую линию, т. е. величины токов и напряжений будут связаны между собой линейными уравнениями с постоянными коэффициентами. Пример ВАХ такого вида – закон Ома:  $U = IR$ .



2. Для расчёта (анализа) и синтеза линейных цепей применим принцип суперпозиций (наложения). Смысл принципа суперпозиций заключается в следующем: если к входу линейной цепи приложено синусоидальное напряжение, то напряжение на любом её элементе будет иметь такую же форму. Если же входное напряжение является сложным сигналом (т. е. является суммой гармоник), то на любом элементе линейной цепи сохраняются все гармонические составляющие этого сигнала: иначе говоря, сохраняется форма приложенного к входу напряжения. При этом на выходе линейной цепи изменится только соотношение амплитуд гармоник.

3. Линейная цепь не преобразует спектр электрического сигнала. Она может изменить составляющие спектра только по амплитуде и фазе. Это является причиной возникновения **линейных искажений**.

4. Всякая реальная линейная цепь искажает форму сигнала за счёт переходных процессов и конечной ширины полосы пропускания.

Строго говоря, все элементы электрических цепей проявляют нелинейность. Однако в определённом интервале изменения переменных величин нелинейность элементов проявляется настолько мало, что практически можно пренебречь ею. Примером может служить усилитель радиочастоты (УРЧ) радиоприёмника, на вход которого подаётся очень малый по амплитуде сигнал от антенны. Нелинейность входной характеристики транзистора, стоящего в первом каскаде УРЧ, в пределах нескольких микровольт настолько мала, что её просто не учитывают.

Обычно область нелинейного поведения элемента ограничена, а переход к нелинейности может происходить либо постепенно, либо скачкообразно.

Если на вход линейной цепи подать сложный сигнал, который является суммой гармоник разных частот, а линейная цепь содержит частотно-зависимый элемент ( $L$  или  $C$ ), то форма напряжений на её элементах не будет повторять форму входного напряжения. Это объясняется тем, что гармоники входного напряжения по-разному пропускаются такой цепью. В результате прохождения входного сигнала через ёмкости и индуктивности цепи соотношения между гармоническими составляющими на элементах цепи изменяются по амплитуде и фазе по отношению к входному сигналу. В результате соотношения между амплитудами и фазами гармоник на входе цепи и на её выходе не одинаковы. Это свойство положено в основу формирования импульсов с помощью линейных цепей.

Элемент, параметры которого зависят от величины и полярности приложенных напряжений или протекающих токов, называется **нелинейным**, а цепь, содержащую такие элементы, называют **нелинейной**.

К нелинейным элементам относятся электровакуумные приборы (ЭВП), полупроводниковые приборы (ППП), работающие на нелинейном участке ВАХ, диоды (вакуумные и полупроводниковые), а также трансформаторы с ферромагнетиками.

Свойства нелинейных цепей:

1. Ток, протекающий через нелинейный элемент, не пропорционален приложенному к нему напряжению, т. е. зависимость между напряжением и током (ВАХ) носит нелинейный характер. Примером такой ВАХ служат входные и выходные характеристики ЭВП и ППП.

2. Процессы, протекающие в нелинейных цепях, описываются нелинейными уравнениями различного вида, коэффициенты которых зависят от самой функции напряжения (тока) или от её производных, а ВАХ нелинейной цепи имеет вид кривой или ломаной линии. Примером могут служить характеристики диодов, триодов, тиристоров, стабилитронов и др.

3. Для нелинейных цепей принцип суперпозиций неприменим. При воздействии внешнего сигнала на нелинейные цепи в них всегда возникают токи, содержащие в своём составе новые частотные составляющие, которых не было во входном сигнале. Это является причиной возникновения **нелинейных искажений**, в результате чего сигнал на выходе нелинейной цепи всегда отличается по форме от входного сигнала.

## Дифференцирующие цепи

Для того чтобы получить импульс желаемой формы из заданной формы напряжения с помощью пассивной электрической цепи, необходимо знать формирующие свойства этой цепи. Формирующие свойства характеризуют способность линейной цепи определённым образом изменять форму передаваемого (обрабатываемого) сигнала и полностью определяются видом её частотных и временных характеристик.

В импульсной технике для формирования сигналов широко применяются дифференцирующие и интегрирующие цепи, которые являются линейными математическими операциями.

**Дифференцирующими** называются такие цепи, у которых электрическая величина (напряжение) на выходе пропорциональна производной по времени от входной величины. Математически это выражается следующей формулой:

$$S_{\text{вых}}(t) = \tau_0 \frac{d_s(t)}{dt},$$

где  $\tau_0 = RC$  – постоянная времени цепи.

Дифференцирующие цепи в радиолокационной технике используются:

- для укорочения длительности импульсов;
- формирования остроконечных импульсов, служащих для запуска и синхронизации радиотехнических устройств (системы РЛС, счетно-решающий прибор, системы автосопряжения и авторегулирования).

Наиболее широкое распространение получили цепи, напряжение на выходе которых пропорционально производной по времени от входного напряжения. Для данных видов преобразований сигнала применяют: линейную ёмкостную RC-цепь или индуктивную RL-цепь, которые обладают требуемыми соотношениями между входными и выходными величинами (рис. 63).

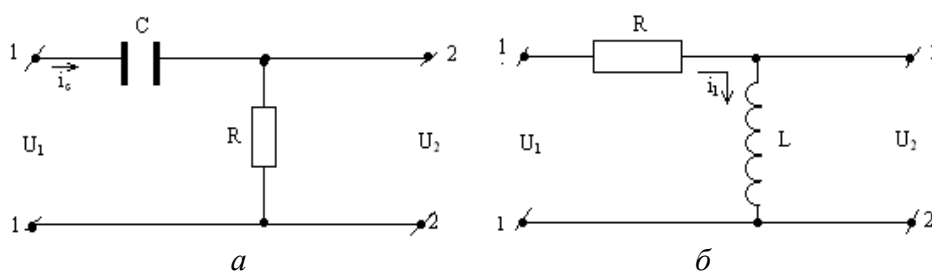


Рис. 63. Дифференцирующие цепи:  
а – ёмкостная; б – индуктивная

Индуктивная дифференцирующая цепь применяется гораздо реже, чем ёмкостная по чисто практическим соображениям. Дело в том, что для выполнения условия дифференцирования требуется катушка с большой индуктивностью. Такие катушки получаются очень громоздкими и имеют большую паразитную (межвитковую) ёмкость, искажающую результат дифференцирования и возникновение нелинейных искажений выходного сигнала.

Рассмотрим принцип действия ёмкостной дифференцирующей RC-цепи (рис. 63, а, 64) в случае идеальной прямоугольной формы входного сигнала, без учёта внутреннего сопротивления источника и паразитных параметров цепи.

1. При подаче напряжения  $U(t)$  на вход в цепи течет ток  $i(t)$  и, согласно второму закону Кирхгофа (в замкнутом контуре сумма падений напряжения на участках равна суммарной ЭДС контура) имеем:  $U_{\text{вх}}(t) = U_C(t) + U_R(t)$ , кроме того, согласно закону Ома:

$$U_R(t) = Ri(t); \quad U_C(t) = \frac{q(t)}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$$

и определению емкости. Емкость – отношение электрического заряда к разнице потенциалов между электродами:

$$C = \frac{q}{u}.$$

Пусть величины  $R$  и  $C$  выбраны так, что

$$U_R(t) \leq U_C(t),$$

тогда

$$U_{\text{ВХ}}(t) \approx U_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt,$$

отсюда  $i(t) = C \frac{du_{\text{ВХ}}(t)}{dt}$ , т. к. выходной сигнал снимается с сопротивления, то подставив значение тока имеем:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_R(t) = RC \frac{du_{\text{ВХ}}(t)}{dt} \Rightarrow U_{\text{ВЫХ}}(t) = \tau_0 \frac{du_{\text{ВХ}}(t)}{dt}.$$

Если  $U_{\text{ВХ}}(t)$  представляет собой прямоугольный импульс, то на выходе цепи по окончании прохождения его переднего и заднего фронта формируются два остроконечных импульса.

Условием практического дифференцирования, с целью ускорения длительности импульсов, является соотношение  $\tau_{U_{\text{ВХ}}} > (3...5) \tau_0$ , т. е. за время  $\tau = (3...5) \tau_0$  – конденсатор полностью зарядится  $\tau_U \geq \tau_0$ .

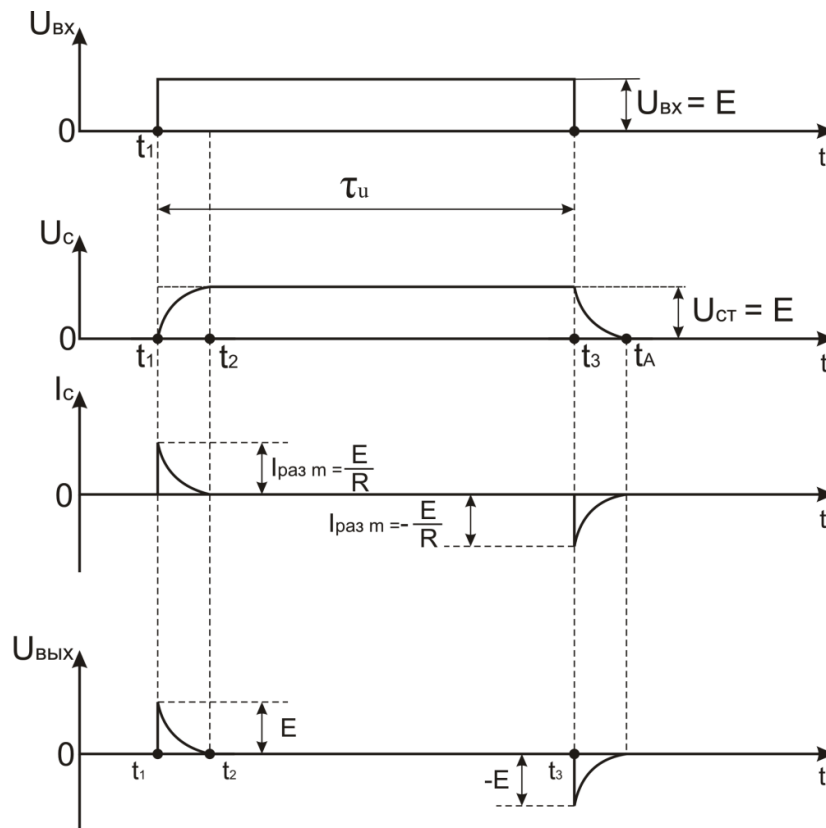


Рис. 64. Этюры напряжений и токов дифференцирующей цепи

2. В исходном состоянии ( $t < t_1$ ) до воздействия входного импульса ( $u_1 = 0$ ) в цепи нет запасов электрической энергии, следовательно, напряжения на элементах равны нулю:

$$U_c = U_{c0} = 0; i_c = 0; U_2 = 0.$$

В момент  $t = t_1$  (рис. 64) на вход цепи скачком включается напряжение  $U_1 = E$ . Так как напряжение на конденсаторе не может измениться скачком, а  $U_{c0} = 0$ , то напряжения  $E$  в этот момент времени окажется приложенным к сопротивлению  $R$ , и начальный ток заряда конденсатора будет

$$i_c = I_{Cm} = E/R.$$

Далее происходит заряд конденсатора  $C$  убывающим током в течение времени  $t_1 < t < t_3$ :

$$i_c(t) = I_{Cm} e^{-t/\tau_{зар}} = E e^{-t/RC}/R,$$

где  $\tau_{зар} = RC$  – постоянная времени цепи заряда ёмкости, характеризующая скорость происходящего переходного процесса.

По мере заряда ёмкости, напряжение  $u_c$  изменяется от нулевого значения по экспоненциальному закону

$$U_c(t) = E(1 - e^{-t/RC}),$$

а напряжение на выходе  $U_2(t) = i_c R = E e^{-t/\tau_{зар}}$  по форме соответствует закону изменения тока заряда ёмкости. При этом в любой момент времени выполняется равенство

$$U_{вх} = E = U_c + U_2 = U_1.$$

Практически заряд ёмкости закончится через время  $t \geq (3 \dots 5)RC$ . Ток заряда, а значит, и напряжение на выходе  $U_2 = i_c R$  достигает нулевого значения в момент  $t_2$ . При этом ( $t = t_2$ ):

$$U_2 = 0; U_1 = E; U_c = E; i_c = 0.$$

В момент  $t_3$  напряжение на входе скачком уменьшится до нуля, конденсатор  $C$ , заряженный до напряжения на выходе  $U_c(t_3) = E$ , становится источником напряжения. Так как внутреннее сопротивление источника  $R_0$  по условию равно нулю, то в момент  $t_3$  напряжение на выходе

$$U_2(t_3) = -E = -U_{2m}.$$

В этот же момент  $t_3$  ток разряда скачком достигает величины

$$i_c = -I_{Cm} = -U_c/R = -E/R$$

и по мере разряда ёмкости  $C$  убывает по экспоненциальному закону до нуля

$$i_c(t) = -I_{Cm} e^{-t/RC} \rightarrow 0,$$

имея направление, противоположное первоначальному.

В такой идеальной цепи амплитуда напряжения  $U_{2m}$  не зависит от значений параметров цепи  $R$  и  $C$ , а длительность импульсов на выходе определяется величиной постоянной времени цепи  $\tau = RC$ . Чем меньше значение  $R$  и  $C$ , тем быстрее заканчиваются переходные процессы заряда и разряда ёмкости, тем короче импульс на выходе цепи.

### Интегрирующие цепи

**Интегрирующими** называются цепи, у которых электрическая величина на выходе  $f(t)$  пропорциональна интегралу по времени от входной величины  $f_1(t)$ , т. е.

$$f_2(t) = K \int_0^t f_1(t) dt.$$

На практике чаще всего применяют интегрирующие цепи, напряжение на выходе которых пропорционально интегралу по времени от входного напряжения.

Интегрирующая цепь в радиолокационной технике используется:

- для увеличения длительности импульсов;
- формирования импульсов пилообразного напряжения;
- для фильтрации переменной составляющей напряжения.

Такие цепи находят применение в вычислительных системах, устройствах автосопровождения, авторегулирования и схемах синхронизации. В качестве примера рассмотрим ёмкостную интегрирующую  $RC$ -цепь (рис. 65).

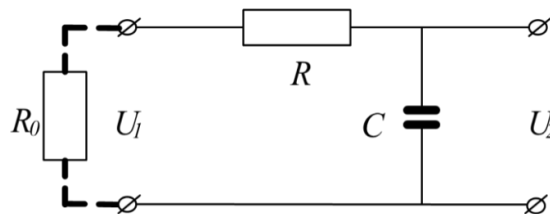


Рис. 65. Интегрирующая цепь

Пусть на вход схемы воздействует напряжение прямоугольной формы  $U_{вх} = U_1(t)$ . При исследовании цепи не будем учитывать паразитные параметры. Внутреннее сопротивление  $R_0$  источника входного напряжения в схеме добавляется к достаточно большому сопротивлению цепи  $R$  и отдельно не учитывается.

В момент  $t_1$  (рис. 66, а) на вход цепи подаётся скачком напряжение  $U_1(t)$  с амплитудой  $U_m = E$ . Так как напряжение на ёмкости  $C$  не может измениться скачком  $U_{c0} = 0$ , то в момент  $t = t_1$  всё напряжения  $E$  окажется приложенным к сопротивлению  $R$ , и начальный ток в цепи будет:

$$i_{c0} = U_{1m}/R = E/R.$$

Далее происходит заряд ёмкости  $C$  по закону

$$U_c(t) = U_{1m}(1 - e^{-t/RC})$$

с экспоненциально убывающим током:

$$i_c(t) = U_{1m}e^{-t/RC}/R.$$

При достаточно большой величине постоянной времени цепи за время действия импульса  $\tau_{н1} = t_2 - t_1 \ll RC$  ёмкость  $C$  не успеет зарядиться до величины  $U_{1m} = E$  и процесс заряда прекратится в момент  $t_2$  по окончании действия входного напряжения.

В момент  $t_1 = t_2$  напряжение на входе уменьшается скачком до нуля и ёмкость  $C$ , заряженная до величины  $U_{cm}$ , начинает разряжаться по экспоненциальному закону:

$$u_c(t) = U_{cm}e^{-t/RC} = U_{1m}(e^{-(t_2-t_1)/RC})e^{-t/RC}.$$

Если постоянная времени цепи мала по сравнению с длительностью входного импульса ( $\tau \ll \tau_{н1}$ ), то ёмкость успеет зарядиться полностью за время  $\tau_{н1}$ . При этом форма импульса  $U_1(t)$  искажается незначительно, цепь теряет интегрирующие свойства, ставится укорачивающей, а напряжения  $U_R$  и  $U_c$  становятся аналогичными  $U_c$  и  $U_R$  дифференцирующей цепи (рис. 66, з, д).

Таким образом, интегрирующая  $RC$ -цепь даёт на выходе экспоненциально изменяющиеся напряжения фронта и среза импульсов  $u_2(t)$  с амплитудой  $U_{2m} \ll U_{1m}$  при  $RC = \tau \gg \tau_{н1}$ . Чем сильнее неравенство  $\tau/\tau_{н1} \gg 1$ , тем точнее интегрирование и тем ближе к линейному закон изменения напряжения  $U_2(t) = U_c(t)$ .

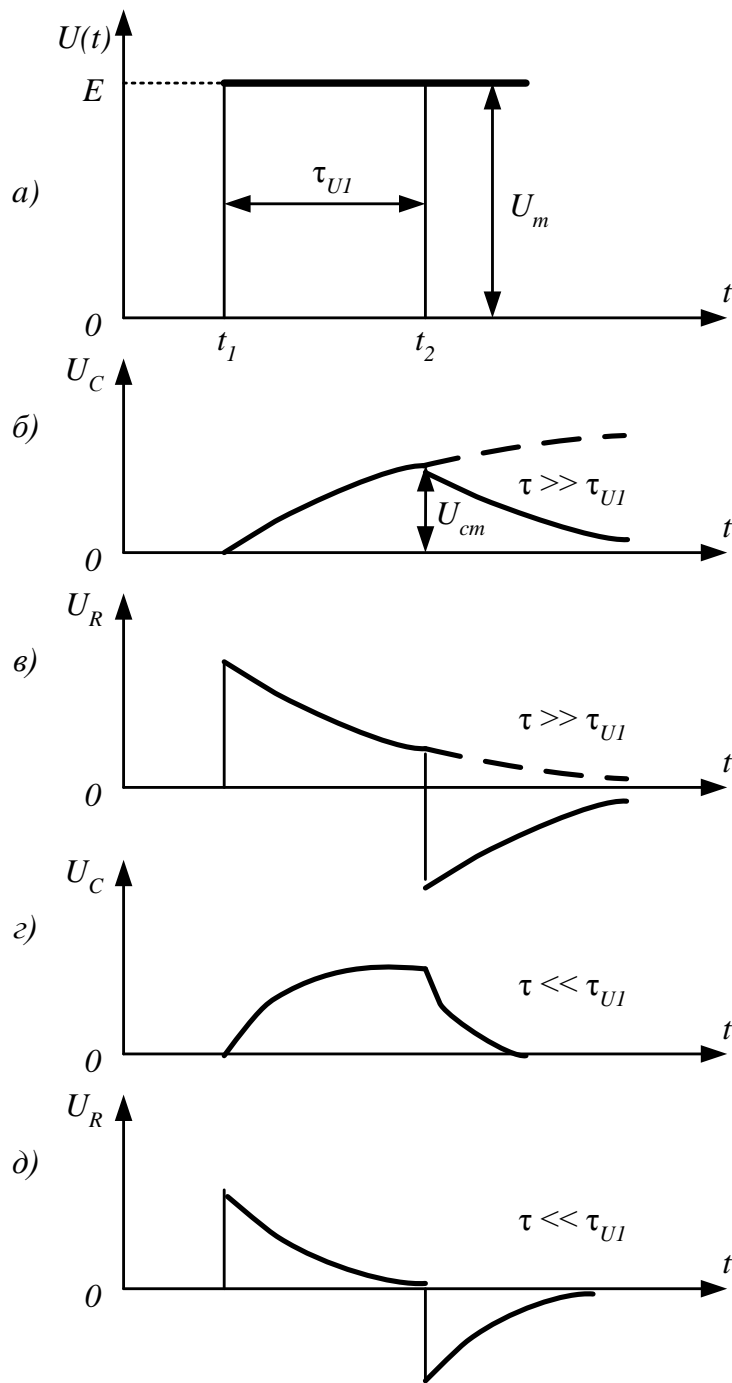


Рис. 66. Изменения формы напряжений в интегрирующей цепи в зависимости от величины постоянной времени

Закон изменения  $U_2(t)$  на входе цепи имеет некоторую ошибку интегрирования, зависящую от величины параметров цепи  $R$  и  $C$ . Чем больше величина  $\tau = RC$ , тем меньше отклонение от линейного закона, тем точнее интегрирование входного напряжения, но меньше напряжение на выходе по амплитуде.

В радиолокационной технике интегрирующие  $RC$ -цепи особенно широко применяются для формирования пилообразных напряжений, используемых в схемах генераторов напряжений развёртки, сравнивающих устройствах и схемах временной задержки импульсов.

## Раздел 6. Электровакуумные приборы

### Введение

Электровакуумным прибором называется такой прибор, в котором рабочее пространство, изолированно газонепроницаемой оболочкой, имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной средой (парами или газами) и действие, которого основано на использовании электрических явлений.

Электронной лампой называют электронный электровакуумный прибор (ЭВП), предназначенный для различного рода преобразований электрических величин (рис. 67). Электронные лампы образуют наиболее многочисленную по числу типов группу электровакуумных приборов. Электронные лампы различают прежде всего по числу электродов: диоды – двухэлектродные лампы; триоды – трёхэлектродные лампы; тетроды, пентоды, гексоды, гептоды, октоды – многоэлектродные лампы с четырьмя, пятью, шестью, семью и восемью электродами соответственно. Подразделяют электронные лампы так же по их основному назначению (генераторные, усилительные, выпрямительные, частотообразовательные и др.), диапазону рабочих частот (низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные), конструктивным особенностям (материал баллона, вид цоколя, тип катода и др.) и по ряду других признаков.

В основе работы ЭВП лежит электронная эмиссия. Электронная эмиссия – это способность различных веществ испускать электроны.

Существует несколько видов электронных эмиссий:

- фотоэлектронная – когда на поверхность определённых металлов или их соединений падает пучок света, вырывающий с поверхности электроны;
- вторичная электронная – принцип состоит в том, что поток электронов или ионов, падая на поверхность проводника, выбивает из неё вторичные электроны;
- автоэлектронная, заключается в вырывании электронов с поверхности металлов сильным внешним электрическим полем.

Термоэлектронная эмиссия возникает при нагреве вещества. За счёт тепловой энергии электроны приобретают такую энергию, что вырываются с его поверхности. Это явление широко используется в электронных лампах.

Рассмотрим устройство ламп с различным количеством электродов. Основными частями лампы являются электроды: анод, катод и сетки, помещенные в баллон (стеклянный, металлический, керамический) с цоколем.

1. **Катод** – это электрод, предназначенный для излучения электронов. Катоды изготавливаются из чистого или активированного металла. Основным материалом катодов из чистого металла является вольфрам, обладающий высокой температурой плавления и постоянством эмиссии. Вольфрамовые катоды применяются в основном в мощных генераторных лампах. На поверхность активированного катода наносят слой активных металлов или сплавов, обладающих способностью испускать электроны при сравнительно не высоких температурах нагрева. Наиболее широко распространены карбидинированные и оксидные катоды.

По способу подогрева различают катоды прямого накала и подогревные (косвенного накала). Катод прямого накала представляет собой вольфрамовую проволоку, покрытую активным слоем. Разогрев катодов прямого накала осуществляется током, проходящий через тот же катод.

Подогревные катоды состоят из никелевой или фарфоровой трубочки, покрытой активным слоем. Внутри трубок помещается подогреватель (нить накала), по которому пропуска-

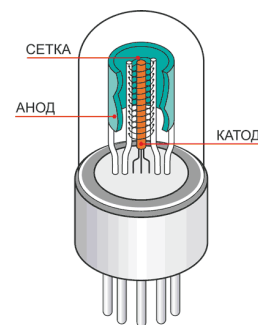


Рис. 67. Электронная лампа

ют электрический ток. Нить накала изолируется от внутренних стенок трубки специальной теплоустойчивой изоляцией – алкидом.

Достоинством их является значительно большая поверхность и поэтому большой эмиссионный ток. Нить накала может питаться как переменным, так и постоянным током. Все активные катоды боятся перегрева, в результате которого разрушается активный слой и теряется их эмиссионная способность.

2. **Анод** служит для притягивания электронов, излучаемых катодом, в результате чего внутри лампы образуется электронный поток. Анод изготавливается из тугоплавких металлов. Для улучшения теплоотдачи аноды делают ребристыми и чернятся. Аноды мощных радиоламп охлаждаются воздушным или жидкостным потоком.

3. **Сетки** служат для управления потоком электронов между катодом и анодом. В зависимости от конструкции радиолампы между анодом и катодом помещают ряд сеток. Ближайшая к катоду сетка называется управляющей. Все сетки изготавливаются из тонкой тугоплавкой проволоки, намотанной в виде спирали. Укрепляются они на металлических стойках. Конструктивно все электроды расположены следующим образом. В центре находится катод. Вокруг него намотана управляющая сетка, которую охватывает экранирующая сетка, вокруг последней намотана защитная сетка. Все электроды лампы тщательно изолированы друг от друга. Исключение составляет защитная сетка, которая может быть внутри лампы соединена с катодом.

4. **Баллон** представляет собой стеклянную, металлическую или керамическую колбу, внутри которой в высоком вакууме смонтированы электроды. Баллоны имеют самую разнообразную форму в зависимости от назначения и условий работы радиолампы. Наиболее распространены радиолампы со стеклянными баллонами.

5. **Цоколь** служит для включения радиолампы в схему с помощью имеющихся на нем контактных штырьков. Количество штырьков на цоколе определяется конструкцией лампы и количеством электродов в ней. У пальчиковых ламп цоколь отсутствует, а контактные штырьки впаяны в дно стеклянного баллона.

### § 6.1. Двухэлектродная лампа

Диодом называется электронная лампа с двумя электродами: анодом и катодом (рис. 68).

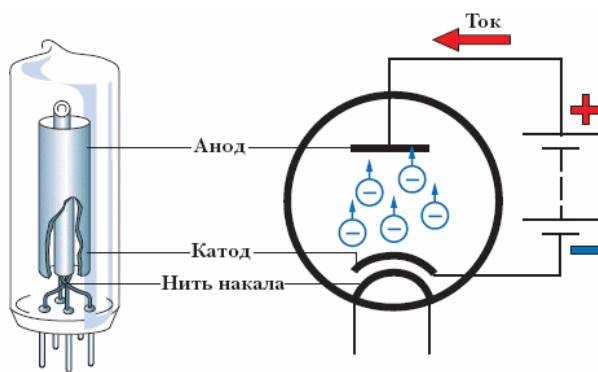


Рис. 68. Двухэлектродная лампа – диод

При его подключении различают две цепи питания: накальную и анодную (рис. 69, б). При нагреве катода вокруг него образуется электронное облако, имеющее отрицательный заряд. Если в анодную цепь включить источник питания положительным полюсом к аноду и отрицательным к катоду, то электроны будут притягиваться к аноду. В анодной цепи лампы потечет ток от плюса источника к аноду лампы через участок анод – катод и минусу источника. Направление анодного тока принято считать противоположным направлению потока электронов.



Если увеличить напряжение на аноде лампы, то анодный ток будет увеличиваться до определенного предела и при дальнейшем увеличении напряжения увеличиваться не будет. Максимальный анодный ток, при котором все электроны, вылетающие с катода, попадают на анод, называется током насыщения.

График, показывающий зависимость анодного тока диода от изменения напряжения на аноде при неизменном напряжении накала, называется *анодной (вольтамперной) характеристикой диода* (рис. 69, а).

Если изменить полярность напряжения на аноде, т. е. к аноду подключить отрицательный полюс, а к катоду – положительный, то электроны к аноду притягиваться не будут и в анодной цепи ток прекратится. Следовательно, диод обладает односторонней проводимостью. Это свойство диода используется в выпрямительных устройствах для выпрямления переменного тока в постоянный.

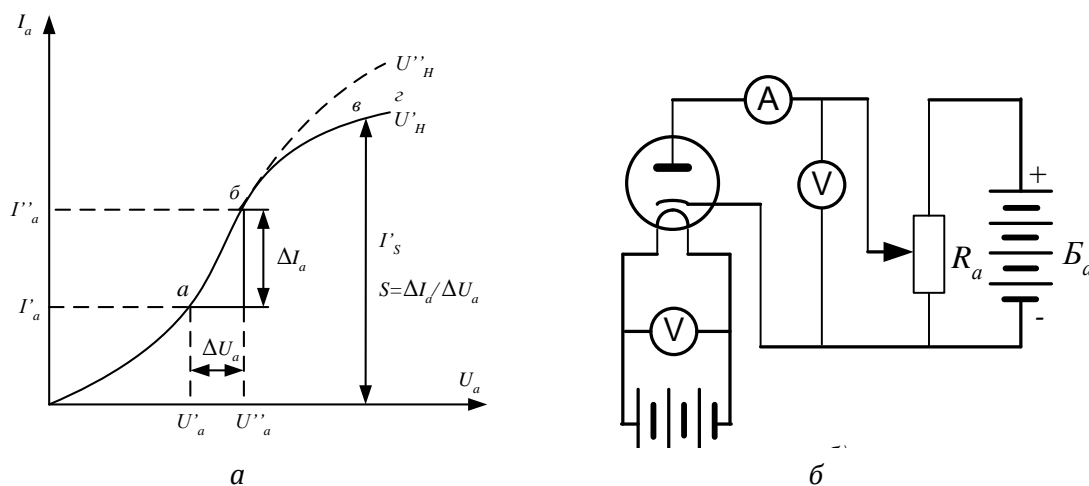


Рис. 69. Схема включения и анодная характеристика диода

Основные параметры диодов – крутизна характеристики, внутреннее сопротивление, величина выпрямленного тока, обратное напряжение, мощность, рассеиваемая анодом. Из анодной характеристики диода можно определить два основных его параметра: крутизну характеристики  $S$  и внутреннее сопротивление  $R_i$ .

Крутизной характеристики называется величина, показывающая, на сколько миллиамперметр изменится анодный ток  $\Delta I_a$ , если анодное напряжение  $\Delta U_a$  изменить на 1 в (при неизменном напряжении накала)

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}, \text{ мА/в.}$$

Эта величина у различных типов диодов колеблется в пределах 0,25...7,0 мА/в.

Внутреннее сопротивление  $R_i$  к переменному току – это величина, обратная крутизне характеристики:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}, \text{ Ом; } R_i = \frac{1}{S}.$$

Чем меньше внутреннее сопротивление, тем лучше диод работает в качестве выпрямителя. Основные параметры диодов указываются в паспорте лампы и справочных таблицах. В радиолокационной аппаратуре диоды используются как выпрямители (5Ц3С, 5Ц4С) и в качестве детекторов и ограничителей (6Х66С, 6Х2П).

## § 6.2. Трехэлектродная лампа, многоэлектродные лампы

Многоэлектродные лампы различаются по количеству и назначению электродов. Рассмотрим основные лампы, применяемые в радиоэлектронике РЛС: триод, тетрод, пентод и тираatron.

### Триод

**Триодом** называется электронная лампа с тремя электродами: катодом, управляющей сеткой и анодом (рис. 70, а).

Триод имеет накальную, анодную и сеточную цепи (рис. 70, б). Причем анодная и накальная цепи по своему назначению не отличаются от соответствующих цепей диода.

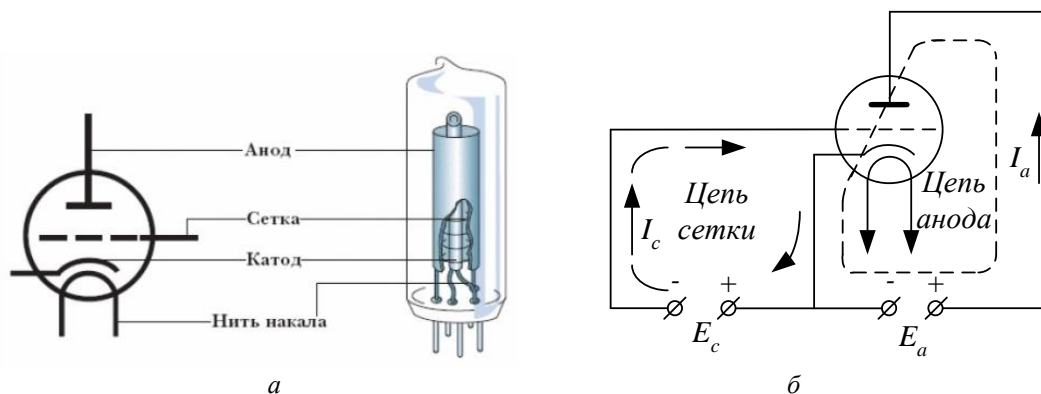


Рис. 70. Условное обозначение триода и схема его включения

Управляющая сетка предназначена для управления анодным током лампы за счет изменения напряжения в сеточной цепи. Расстояния между управляющей сеткой и катодом во много раз меньше, чем расстояния между анодом и катодом. В связи с этим небольшие изменения напряжения на управляющей сетке вызывают значительное изменение анодного тока.

Если на сетку подать положительное напряжение относительно катода, то на электроны, излучаемые катодом, будут действовать два электрических поля – анода и сетки. В результате анодный ток будет возрастать. Если на сетку подать отрицательное напряжение, то поле сетки будет тормозящим и будет отталкивать часть электронов обратно к катоду и анодный ток уменьшится. Если подать такое отрицательное напряжение на сетку, что оно будет отталкивать все электроны к катоду, то в этом случае анодный ток в цепи прекратится, хотя к аноду приложено довольно высокое напряжение.

Минимальное отрицательное напряжение на управляющей сетке, при котором анодный ток равен нулю, называется *напряжением отсечки* (напряжение запираения лампы). Если на сетку подать переменное напряжение небольшой величины, анодный ток также будет изменяться по закону приложенного сеточного напряжения.

Для определения основных параметров триода строят его анодно-сеточные и анодные характеристики.

*Анодно-сеточной характеристикой* триода называется график, показывающий зависимость анодного тока  $I_a$  от изменения напряжения на сетке  $U_c$  при постоянном анодном напряжении.

Анодно-сеточные характеристики нагляднее показывают управляющее действие сетки, и их иногда называют *управляющими*. На рис. 71 изображены характеристики для токов анода, сетки и катода в зависимости от напряжения сетки при постоянном анодном напряжении, соответствующие явно выраженному режиму насыщения лампы. При  $u_g < 0$  характеристики для анодного и катодного тока совпадают. Начальная точка характеристики (А) обычно соответствует напряжению запираения.

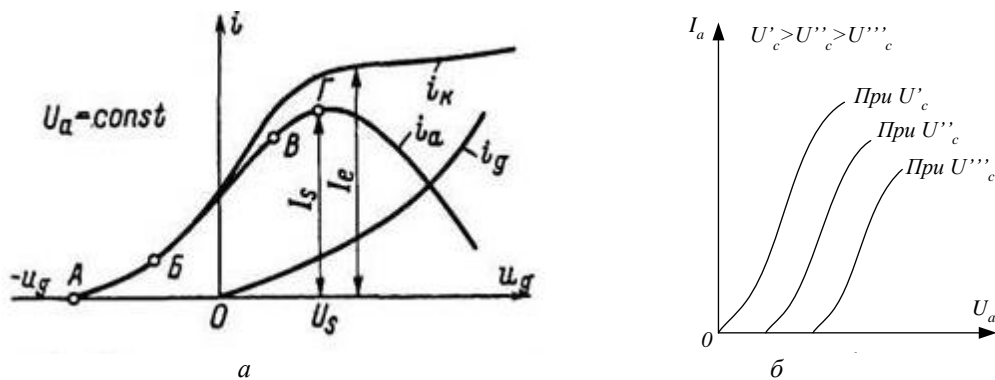


Рис. 71. Характеристики триода:

а) для токов анода, сетки и катода; б) семейство анодных характеристик триода

Если уменьшать по абсолютному значению отрицательное напряжение сетки, то лампа отпирается, потенциальный барьер у катода понижается и анодный ток возрастает. Число электронов, преодолевающих барьер, растет по нелинейному закону, и поэтому характеристика имеет нижний нелинейный участок *АВ*, который постепенно переходит в средний, приблизительно линейный участок *ВВ*. При положительном сеточном напряжении характеристика для катодного тока расположена выше характеристики для анодного вследствие появления сеточного тока. Характеристика для сеточного тока идет из начала координат подобно характеристике диода.

Увеличение положительного напряжения сетки вызывает сначала рост всех токов. Постепенному переходу в режим насыщения соответствует верхний участок характеристики для анодного тока (*ВГ*). В режиме насыщения при увеличении сеточного напряжения катодный ток растет незначительно, но сеточный ток возрастает и за счет этого уменьшается анодный ток. При большом положительном сеточном напряжении анодный ток становится меньше сеточного.

*Анодной характеристикой* триода называется график, показывающий зависимость анодного тока от изменения напряжения на аноде при неизменном напряжении на сетке. Несколько анодных характеристик, снятых при различных напряжениях на управляющей сетке, называются *семейством анодных характеристик*.

Основными параметрами триода являются:

1. *Крутизна характеристики S*. Она показывает, на сколько миллиампер изменится анодный ток при изменении напряжения на сетке на 1 в при постоянном напряжении на аноде.

2. *Коэффициент усиления  $\mu$*  показывает, во сколько раз изменение сеточного напряжения воздействует на анодный ток сильнее, чем изменение напряжения на аноде, приводящее к такому же изменению анодного тока  $\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}$ .

3. *Внутреннее сопротивление триода  $R_i$*  – это отношение изменения анодного напряжения к вызываемому им изменению тока.

Основные параметры триода связаны соотношением  $SR_i = \mu$ . Основными недостатками триода являются: низкий коэффициент усиления и большие междуэлектродные емкости.

## Тетрод

**Тетродом** называется электронная лампа с четырьмя электродами: катодом, анодом и двумя сетками – управляющей и экранирующей (рис. 72).

Экранирующая сетка размещается между управляющей сеткой и анодом. Ее основное назначение – уменьшить проходную емкость  $C_{ac}$ . Вместе с этим увеличивается коэффициент усиления лампы.

Экранирующая сетка выполняется из тонкой тугоплавкой проволоки. Шаг витков у нее меньше, чем в управляющей сетке. По высокой частоте она заземляется через конденсатор большой емкости, а к источнику питания подключается через сопротивление.

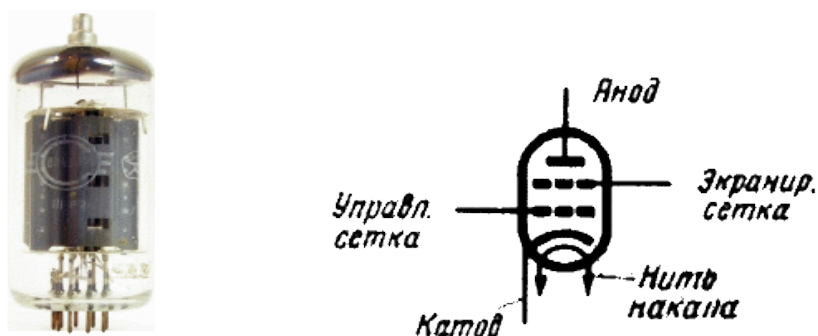


Рис. 72. Тетрод. Внешний вид и условное обозначение

В тетроде между анодом и катодом расположены две сетки, поэтому напряжение на аноде еще слабее влияет на электроны, излучаемые катодом.

В связи с этим эффективность действия управляющей сетки возрастает и коэффициент усиления тетрода увеличивается, достигая 200...500. Однако в обычном тетроде возникает динаatronный эффект, который заключается в том, что под действием положительных напряжений анода и экранирующей сетки электроны, летящие с катода к аноду, развивают большую скорость и, ударяясь об анод, выбивают из него вторичные электроны.

### Пентод

**Пентодом** называется электронная лампа с пятью электродами: катодом, анодом и тремя сетками – управляющей, экранирующей и защитной (рис. 73).



Рис. 73. Условное обозначение пентода и схема его включения

Основное назначение защитной сетки – устранить динаatronный эффект, явление выбивание вторичных электронов из анода. Это достигается тем, что защитная сетка снижает скорость пролетающих к аноду электронов и возвращает к аноду вторичные электроны. Защитная (антидинаatronная) сетка изготавливается из тонкой проволоки, имеет большой шаг намотки и располагается между анодом и экранирующей сеткой. Защитная сетка соединяется с катодом и поэтому имеет отрицательный заряд по отношению к аноду. Наличие густой экранирующей, а также защитной сетки позволяет уменьшить проходную емкость  $C_{ac}$  до тысячных долей пикофарада. Внутреннее сопротивление пентода достигает одного мегома, а коэффициент усиления – 1000...3000.

Пентод является универсальной лампой. Его можно использовать во всех схемах: усилительных каскадах, генераторах, детекторах и т. д.

Очень малая проходная емкость, высокий коэффициент усиления позволяют использовать пентоды для усиления очень слабых сигналов высоких и сверхвысоких частот. Недостатком пентодов является наличие значительных собственных шумов.

### Тиратрон

**Тиратрон** – это особый тип триода, который внутри наполнен инертным газом либо их смесью. Стеклообразная колба имеет внутри два электрода (положительный и отрицательный) и сетку из металла. При подаче напряжения на катод происходит его нагрев, анод подключается к положительному источнику питания. Сетка же имеет отрицательный заряд, что удерживает электроны между катодом и сеткой.

При подаче на сетку электрического сигнала, происходит разряд (зажигание) между анодом и катодом. При снятии управляющего сигнала ток между анодом и катодом остается до тех пор, пока напряжение на аноде не снизится до величины меньше напряжения поддержания разряда.

Тиратрон применяется в модуляторе передатчика РЛС 1РЛ33М в качестве электронного ключа для образования цепи разряда формирующей линии на магнетрон при генерации СВЧ импульса электромагнитной энергии (рис. 74).

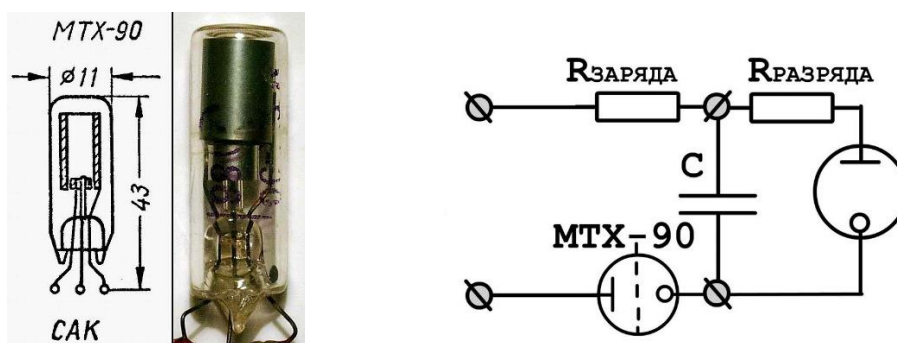


Рис. 74. Тиратрон MTX-90 и схема подключения

Кроме рассмотренных ламп применяются и более сложные лампы – гептоды и комбинированные лампы (двойные диоды, двойные триоды, двойные диод-пентоды и др.). Работа этих ламп в принципе не отличается от ранее рассмотренных электровакуумных приборов.

Условное графическое обозначение электровакуумных приборов установлено государственным стандартом Союза ССР ГОСТ 2.731–81. Различные типы электронных ламп имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий их по определенным признакам.

*Первый элемент* – цифра округленно указывает напряжение накала подогревателя или катода прямого накала (6 – напряжение накала 6,3 В, 5...5 В, 1...1,4 В, 3...3,15 В).

*Второй элемент* – буква характеризует назначение и тип лампы (Д – диод; Ц – диод, предназначенный для выпрямления переменного тока (кенотроны); С – триоды; Э – тетроды; П – низкочастотные выходные пентоды и лучевые тетроды; Ж – пентоды с короткой анодно-сеточной характеристикой; К – пентоды с удлиненной анодно-сеточной характеристикой; Г – комбинированные лампы диод-триоды; Б – комбинированные лампы диод-пентоды; Ф – комбинированные лампы триод-пентоды; Н – комбинированные лампы двойной триод; Х – двойной диод; Р – двойной лучевой тетрод.

*Третий элемент* – цифра или двухзначное число обозначает порядковый номер разработки лампы данного типа, позволяет различать однотипные (прибора) лампы.

*Четвертый элемент* – буква характеризует конструктивное исполнение лампы и вид материала баллона, конструкцию выводов и габариты (П – пальчиковая миниатюрная, т. е.

цельностеклянная со штырьками, выходящими непосредственно из стеклянного баллона диаметром  $D = 19-22$ ; С – стеклянная с восьмиштырьковым цоколем и диаметром баллона более 24 мм; Р, А, Б, Г – сверхминиатюрные лампы с диаметром стеклянного баллона Р – 5 мм, А – 18 мм, Б – до 10 мм, Г – свыше 10 мм. Отсутствие в системе обозначения типов электронных ламп четвертого элемента указывает на то, что эта лампа имеет металлический баллон.

Графическое обозначение некоторых типов электронных ламп изображено на рис. 75.

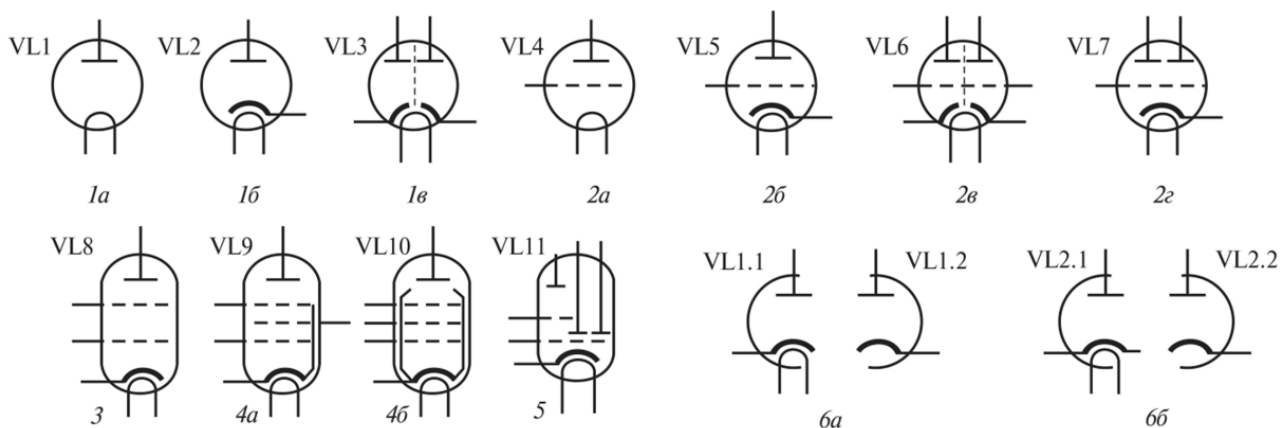


Рис. 75. Графическое обозначение электронных ламп:

- 1 – диоды (а – одинарный диод с катодом прямого накала; б – одинарный диод с катодом косвенного накала; в – двойной диод); 2 – триоды (а – одинарный триод с катодом прямого накала; б – одинарный триод с катодом косвенного накала; в – двойной триод; г – двуханодный триод); 3 – тетрод; 4 – пентод (а – с экранирующим катодом; б – с экранирующими катодом и сеткой); 5 – двойной диод-триод; 6 – двойной диод с расположением каждого диода в разных частях схемы (а – с общим подогревателем и раздельными катодами; б – двойной диод)

Пример обозначения: 6Н1П: 6 – напряжение накала 6,3 В; Н – комбинированная лампа двойной триод; 1 – номер разработки; П – пальчиковая; 6П45С: 6 – напряжение накала 6,3 В; П – низкочастотный выходной пентод; 45 – номер разработки, С – стеклянная с восьмиштырьковым цоколем и диаметром баллона более 24 мм в стеклянном баллоне нормальных габаритных размеров; 6Ж8: 6 – напряжение накала 6,3 В, Ж – пентод с короткой анодно-сеточной характеристикой, 8 – номер разработки, отсутствие четвертого элемента в обозначении указывает на то, что эта лампа имеет металлический (стальной) баллон.

### § 6.3. Электронные лучевые трубки

Электронные лучевые трубки (ЭЛТ) так же являются электровакуумными приборами и используются в индикаторных устройствах РЛС. ЭЛТ разделяются на трубки с электростатическим управлением и трубки с электромагнитным управлением.

Рассмотрим устройство ЭЛТ с электростатическим управлением (рис. 76). В состав простейшей электронной пушки входят: катод, управляющий электрод, первый и второй аноды.

Катод предназначен для создания потока электронов. Обычно в ЭЛТ применяется оксидный подогревный катод, изготовленный в виде небольшого никелевого цилиндра, внутри которого находится подогреватель.

Управляющий электрод, или модулятор, предназначен для регулировки яркости светящегося пятна на экране. Выполнен управляющий электрод в виде никелевого цилиндра. Цилиндр выполнен в виде диска с отверстием (диафрагма), сквозь которое проходят электроны, излучаемые катодом.

Первый анод представляет собой цилиндр с двумя или тремя диафрагмами.

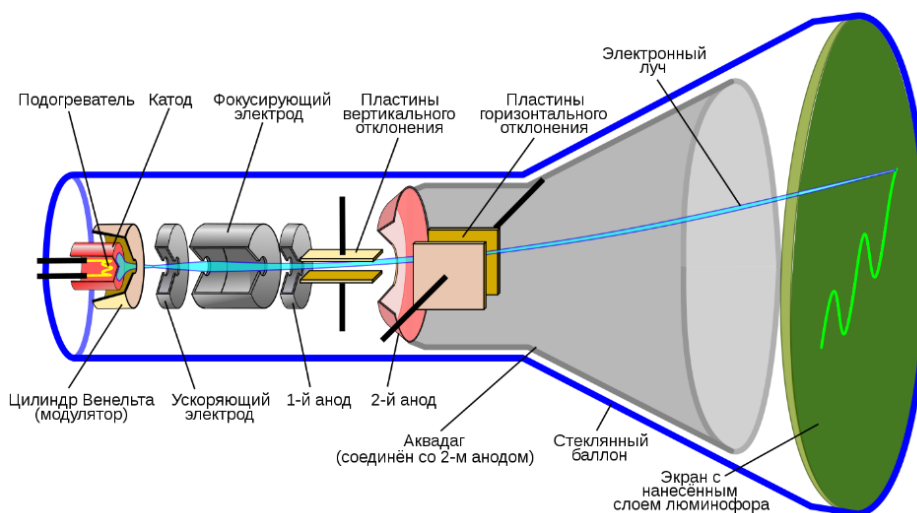


Рис. 76. ЭЛТ с электростатическим управлением

Влияние управляющего электрода и первого анода на ток луча лампы аналогично влиянию управляющей сетки и анода на анодный ток в электронных лампах. На управляющий электрод подается небольшое отрицательное напряжение относительно катода. Изменяя это напряжение, можно регулировать величину тока луча и, следовательно, изменять яркость светящегося пятна на экране трубки.

Второй анод выполнен также в виде цилиндра, но несколько большего диаметра, чем первый. Этот анод обычно имеет одну диафрагму.

К первому аноду подводится напряжение порядка 300...1000 В (относительно катода). На второй анод подается более высокое напряжение (1000...1600 В).

Рассмотрим принцип работы трубки. Накаленный катод излучает электроны. Под действием электрического поля, имеющегося между первым анодом и катодом, электроны получают ускорение и пролетают через диафрагмы в первом аноде. Из первого анода электроны выходят в виде узкого расходящегося луча.

Электрическое поле между первым и вторым анодами называется фокусирующим. Оно изменяет траекторию электронов так, что при выходе из второго анода электроны двигаются, приближаясь к оси трубки. В пространстве между вторым анодом и экраном электроны движутся по инерции за счет приобретенной в ускоряющих полях электронной пушки.

Изменением потенциала первого анода можно регулировать напряжение фокусирующего поля таким образом, чтобы траектории всех электронов пересекались на экране. При падении электронов на экран их кинетическая энергия частично превращается в световую, за счет чего на экране получается светящаяся точка (пятно).

Падающие на экран электроны выбивают из материала экрана электроны, которые улавливаются проводящим графитовым слоем (аквадагом), нанесенным на внутреннюю поверхность баллона. Кроме того, аквадаг играет роль электростатического экрана и предохраняет электронный поток трубки от воздействия внешних электрических полей, так как он соединен со вторым анодом трубки и вместе с ним заземлен.

Диафрагмы внутри анодов способствуют сужению луча электронов, так как они перехватывают электроны, сильно отклонившиеся от оси трубки.

Две пары отклоняющих пластин при подаче на них управляющих (моделирующих) напряжений обеспечивают возникновение между соответствующими пластинами X-X и Y-Y разности потенциалов, управляющих перемещением сфокусированного электронного луча в нужную точку экрана для получения требуемого изображения. При воздействии на этот поток двух модулирующих напряжений одновременно можно добиться отклонения электронного луча в любую точку рабочей поверхности экрана.

Достоинством ЭЛТ с электростатическим управлением является то, что в них затраты мощности на управление лучом невелики, схема управления отклонением электронного луча значительно проще, чем в ЭЛТ с магнитным управлением. Величина отклонения луча в трубках данного типа практически не зависит от частоты отклоняющего напряжения.

### Устройство ЭЛТ с магнитным управлением.

Рассмотрим устройство ЭЛТ с магнитным управлением (рис. 77). В трубках этого типа функции катода, управляющего электрода и экрана те же, что и в трубках с электростатическим управлением.

В баллоне 9 создан глубокий вакуум. Для формирования электронного луча 2, применяется электронная пушка. Катод 8, нагреваемый нитью накала 5, испускает электроны. Изменением напряжения на управляющем электроде (модуляторе) 12 можно изменять интенсивность электронного луча и, соответственно, яркость изображения. Кроме управляющего электрода, пушка ЭЛТ содержит фокусирующий электрод. Он состоит из фокусирующей катушки 3 с сердечником 11 для фокусировки пятна на экране кинескопа в точку. Покинув пушку, электроны ускоряются анодом 14, представляющем собой металлизированное покрытие внутренней поверхности конуса кинескопа, соединённое с одноимённым электродом пушки.

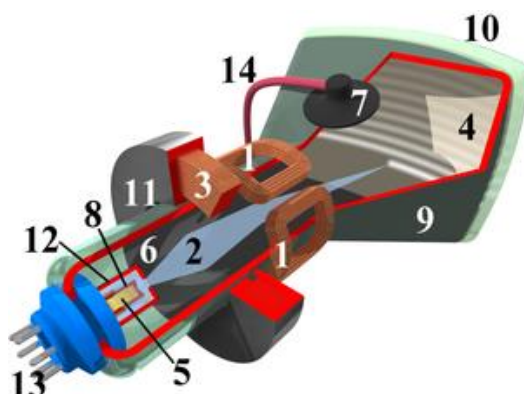


Рис. 77. ЭЛТ с магнитным управлением:

1 – отклоняющая система; 2 – электронный луч; 3 – фокусирующая катушка; 4 – люминофор;  
5 – нить накала; 6 – аквадаг; 7 – высоковольтное гнездо; 8 – катод; 9 – баллон; 10 – экран;  
11 – сердечник; 12 – управляющий электрод; 13 – выводы; 14 – анод

Далее луч проходит через отклоняющую систему 1, которая может менять направление луча. Отклоняющая система трубки с магнитным управлением состоит из одной вращающейся, либо из двух взаимно перпендикулярных пар неподвижных катушек, расположенных снаружи трубки на ее горловине. Отклонение электронного луча осуществляется однородным магнитным полем, создаваемым током, протекающим по этим катушкам, при этом обеспечиваются большие углы отклонения.

Электронный луч попадает в экран 10, покрытый люминофором 4. От бомбардировки электронами люминофор светится и быстро перемещающееся пятно переменной яркости создаёт на экране изображение.

Люминофор от электронов приобретает отрицательный заряд, и начинается вторичная эмиссия – люминофор сам начинает испускать электроны. В результате вся трубка приобретает отрицательный заряд. Для устранения этого эффекта по всей поверхности трубки наносится соединённый с анодом слой аквадага – проводящей смеси на основе графита 6. ЭЛТ подключается через выводы 13 и высоковольтное гнездо 7.

ЭЛТ с магнитным управлением находят применение в радиолокационной технике в тех случаях, когда требуется получить сложное изображение на экране, охватывающим значительную его площадь с яркостью, обеспечивающей длительное послесвечение экрана.



## Устройство потенциалоскопа

Потенциалоскопами называются специальные электронно-лучевые трубки, применяемые для записи, хранения и воспроизведения электрических сигналов, записанных на диэлектрической мишени. Применяется в качестве компенсирующего устройства в системе череспериодной компенсации.

Потенциалоскоп состоит из стеклянного баллона из которого откачан воздух. Внутри баллона расположен блок мишени, коллектор, отклоняющие пластины, электронная пушка в составе катода, управляющего электрода, первого и второго анода (рис. 78).

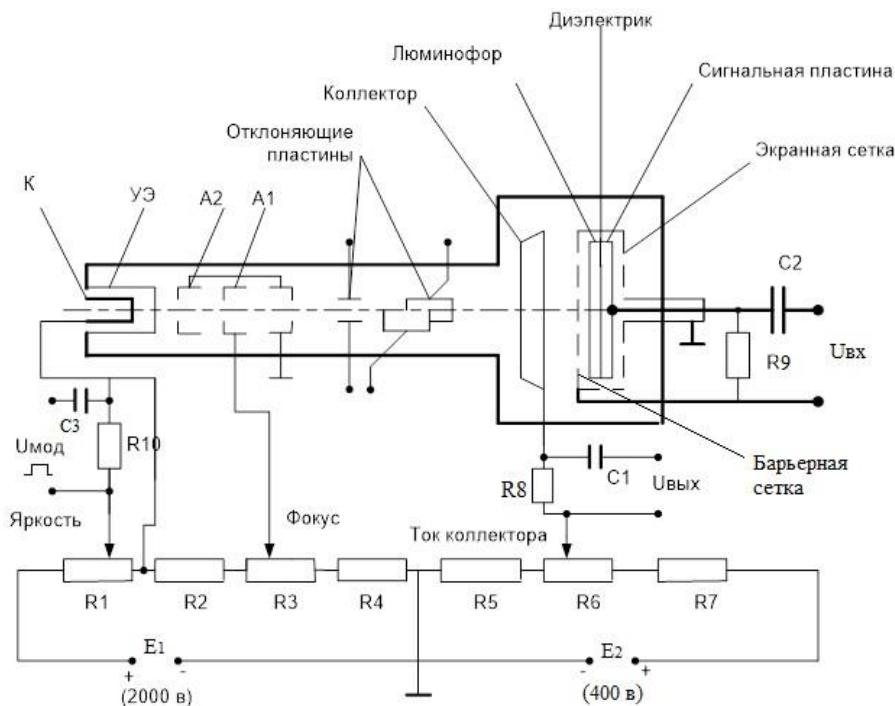


Рис. 78. Устройство потенциалоскопа

Блок мишени представляет собой тонкий слой диэлектрика, нанесенный на тонкую металлическую подложку, называемую сигнальной пластиной. В потенциалоскопах с видимым изображением развертки на поверхность диэлектрика наносится слой люминесцирующего вещества. Для устранения влияния внешних полей мишень окружена экраном в виде сетки. С внутренней стороны, на расстоянии 0,1...0,2 мм от диэлектрика расположена барьерная сетка с большим коэффициентом прозрачности.

Входные сигналы (видеоимпульсы) подводятся к сигнальной пластине мишени через переходную цепь  $C_2R_9$ .

Выходные сигналы снимаются с сопротивления нагрузки  $R_8$  включенного в цепь тока коллектора.

Работа потенциалоскопа заключается в следующем. Допустим, что питание трубки включено, а входных импульсов нет. Электроны луча будут с большой скоростью бомбардировать внутреннюю поверхность мишени. При наличии напряжений развертки луч поочередно обегает все точки мишени. Развертка представляет собой спираль (рис. 79). При бомбардировке какого-либо участка мишени из него выбиваются вторичные электроны. Материал диэлектрика имеет коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma > 1$ , т. е. число выбитых вторичных электронов превышает число электронов луча.

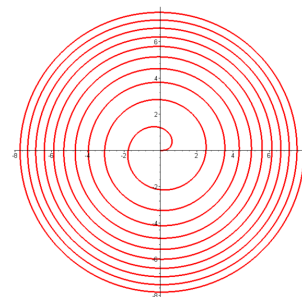


Рис. 79. Развертка потенциалоскопа

Потенциал мишени в исходном состоянии равен нулю. Вторичные электроны, под воздействием ускоряющего поля между коллектором и мишенью, устремляются к коллектору. Потенциал точки мишени, куда падает луч, будет повышаться, т. е. число вылетающих электронов больше, чем падающих. При этом разность потенциалов между коллектором и мишенью будет уменьшаться. Между барьерной сеткой и мишенью создается слабое тормозящее поле. Теперь более медленные вторичные электроны отбрасываются на мишень. С повышением потенциала мишени непрерывно уменьшается количество вторичных электронов способных преодолеть тормозящее поле барьерной сетки и достичь коллектора. При некотором значении потенциала коллектора устанавливается динамическое равновесие, т. е. количество вторичных электронов, достигающих коллектор, становится равным числу первичных электронов, падающих на мишень. Соответствующий потенциал мишени  $U_0$  носит название равновесного. Параметры мишени и ее размеры таковы, что в точках мишени, через которые проходит луч, успевает установиться равновесный потенциал (рис. 80). Ток коллектора при этом остается неизменный.

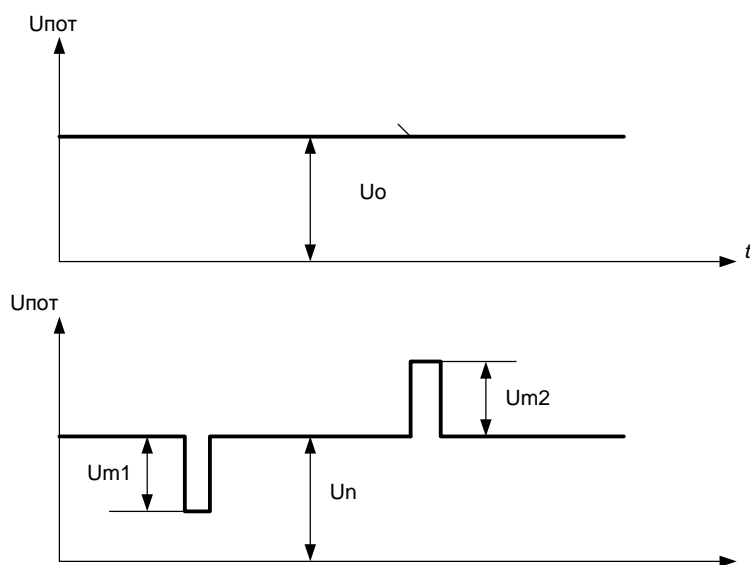


Рис. 80. Равновесный потенциал

Предположим, что на вход потенциалографа поступают два видеопульса (рис. 81, а): в момент прохождения лучом точки А импульс положительной полярности и в момент прохождения точки В отрицательной полярности. При попадании луча в точку А характер процесса меняется. В момент ( $t_1$ ) приложения ко входу положительного импульса скачком повышается потенциал всех точек сигнальной пластины. Этот положительный перепад передается через диэлектрик к его внутренней поверхности. Повышение потенциала внутренней поверхности диэлектрика увеличивает тормозящее поле барьерной сетки и уменьшает ускоряющее поле коллектора. В результате чего уменьшается количество электронов, достигающих коллектора. Потенциал точки А будет снижаться, пока вновь не достигнет равновесного уровня  $U_0$ .

После окончания импульса потенциалы всех точек мишени падают на величину  $U_{m1}$  и потенциал точки А оказывается ниже уровня  $U_0$  на эту величину. К моменту окончания импульса луч перемещается в соседнюю точку развертки поэтому потенциальный рельеф будет иметь лишь небольшой участок с более низким потенциалом. В отклонении потенциала мишени в точке А от равновесного и заключается запись первого входного импульса. Если на вход потенциалографа подать отрицательный импульс, то запишется в точке воздействия импульса положительный выше равновесного участок рельефа развертки.

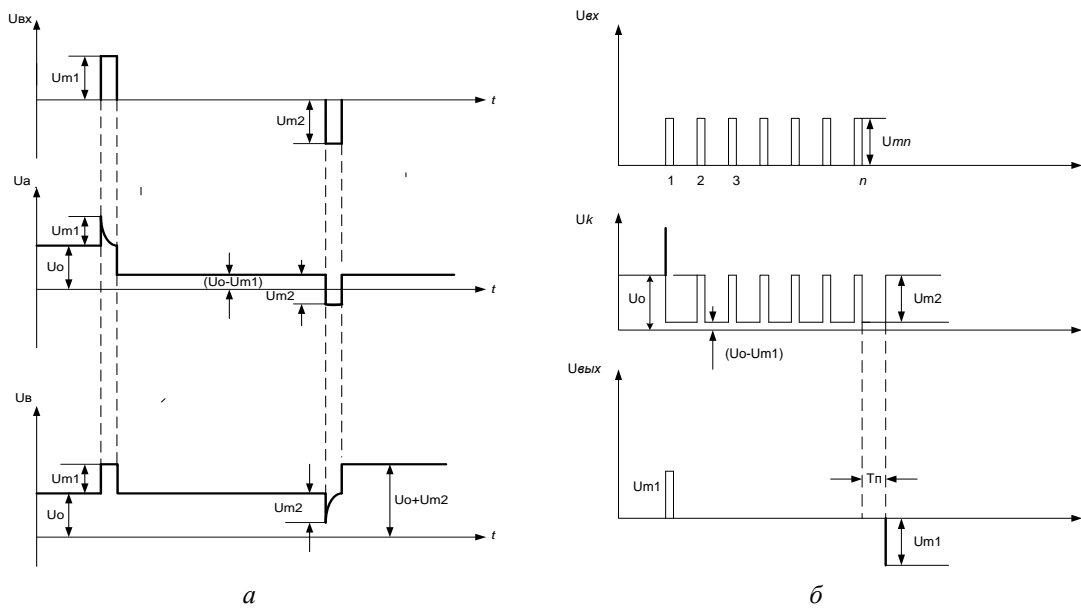


Рис. 81. Этюры напряжений потенциалоскопа:

*а* – поступают два видеоимпульса; *б* – последовательность однополярных импульсов с периодом  $T$

При подаче на вход потенциалоскопа последовательности однополярных импульсов с периодом  $T$  (рис. 81, б) происходит следующее. Во время первого хода луча записывается первый положительный импульс. Во время второго хода луча происходит считывание записанного импульса. Если в этот момент приходит второй положительный импульс, то он повышает потенциал точки, где записан первый импульс на величину амплитуды предыдущего импульса. Поэтому при прохождении лучом этой точки ток коллектора не меняется и напряжение на выходе потенциалоскопа остается равным нулю. Потенциал же точки записи первого импульса остается по-прежнему ниже равновесного на величину  $U_m$ . Так происходит череспериодная компенсация последовательности видеоимпульсов.

## Раздел 7. Генераторы импульсов

### Общие сведения о генераторах

**Электронный генератор** (рис. 82) – устройство, вырабатывающее электрические колебания определенной частоты и формы, используя энергию источника постоянного напряжения (тока). Различают генераторы:

- с самовозбуждением (автогенераторы);
- с внешним возбуждением.

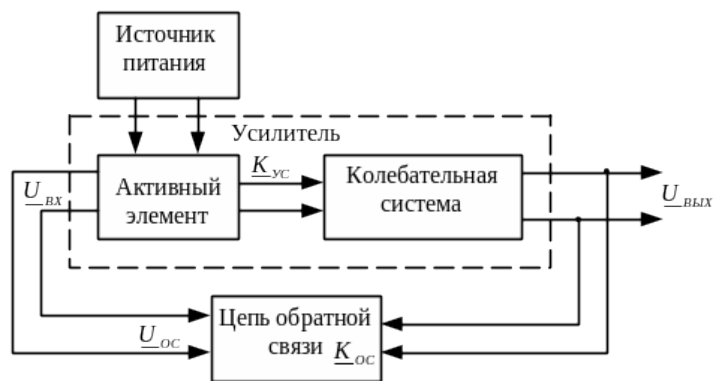


Рис. 82. Электронный генератор

Любой автогенератор содержит:

- колебательную систему (колебательный контур, КК), в которой возбуждаются незатухающие колебания;
- источник электрической энергии (источник питания), благодаря чему в контуре поддерживаются незатухающие колебания;
- усилительный активный элемент (лампа, транзистор), с помощью которого регулируется подача энергии от источника в контур;
- элемента обратной связи (ЭОС), который осуществляет подачу возбуждающего переменного напряжения из выходной цепи во входную.

Принцип работы генератора заключается в следующем. При включении источника питания в электронной лампе (триоде) протекает анодный ток, который заряжает конденсатор колебательного контура. После заряда конденсатор разряжается на катушку. В результате в контуре возникают свободные колебания, индуктирующие в катушке связи переменное напряжение той же частоты, с которой происходят колебания в КК. Это напряжение вызывает пульсацию анодного тока. Переменная составляющая тока восполняет энергию в контуре, создавая на нем усиленное лампой переменное напряжение.

Основными характеристиками генератора являются: форма, частота и мощность колебаний. По форме генераторы различают:

- непрерывных, синусоидальных (гармонических) колебаний;
- импульсных (релаксационных) колебаний.

По частоте генераторы различают:

- инфранизкой (от долей до 10 Гц),
- низкой (от 10 Гц до 100 кГц),
- высокой (от 100 кГц до 10 МГц),
- сверхвысокой (свыше 10 МГц) частот.

Импульсные генераторы могут работать в следующих режимах: автоколебательный, ждущий, режим синхронизации, режим деления частоты. В автоколебательном режиме работы генератор непрерывно генерирует импульсы. В ждущем (или заторможенном) режиме работы генератор находится в состоянии покоя и не вырабатывает импульсы. Если на его вход подать запускающий импульс, то генератор выработает свой импульс, параметры которого определяются параметрами схемы генератора. Режим синхронизации так же, как и автогенераторный характеризуется непрерывным генерированием импульсных сигналов, но на вход генератора поступают внешние (синхронизирующие) импульсы. В результате частота следования импульсов генератора равна частоте синхронизирующих импульсов. Режим деления частоты подобен режиму синхронизации, но частота импульсов на выходе генератора меньше частоты синхронизирующих импульсов в целое число раз.

### **§ 7.1. Назначение, состав и работа мультивибратора**

**Релаксационный генератор** – генератор колебаний, пассивные и активные нелинейные элементы которого не обладают резонансными свойствами. На практике работает в ключевом (релейном) режиме – включён/выключен.

**Мультивибратор** – релаксационный генератор электрических, практически прямоугольных, колебаний с короткими фронтами. Мультивибратор является одним из самых распространённых генераторов импульсов прямоугольной формы, используемый в электронике и радиотехнике. Представляет собой: – 2-каскадный резистивный усилитель с положительной обратной связью. Виды мультивибраторов: *симметричный* – если параметры лампы,  $C$  и  $R$  в обоих каскадах одинаковы; *несимметричный* – если есть различие хотя бы в одном из элементов. На рис. 83, *a* приведена схема симметричного мультивибратора с анодно-емкостной связью (выход одного каскада соединен со входом второго).

Если лампы, емкость конденсаторов и сопротивление резисторов в обоих каскадах одинаковы, мультивибратор называется симметричным; если есть различие хотя бы в одном из элементов – несимметричным.

Мультивибратор может работать в автоколебательном и ждущем режимах. Рассмотрим работу симметричного мультивибратора с самовозбуждением в автоколебательном режиме (рис. 83, б).

### Мультивибратор в автоколебательном режиме

При включении источника питания можно предположить, что схема окажется в состоянии равновесия, т. е. анодные токи и напряжения в соответствующих точках обеих лампы будут равны: конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  зарядятся до величины напряжения на анодах и дальнейших изменений токов и напряжений в схеме не будет. В действительности величина анодного тока любой лампы, даже при постоянстве напряжения на всех электродах, подвержена некоторым колебаниям и, следовательно, в момент включения через лампы могут пойти разные токи.

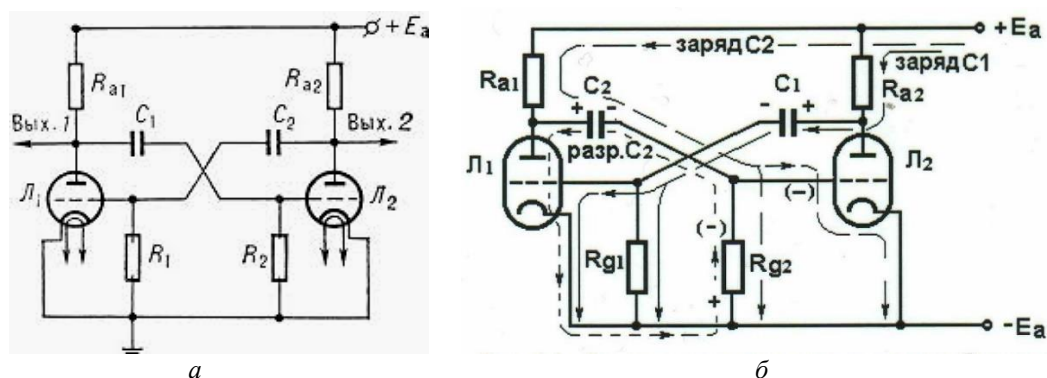


Рис. 83. Схема симметричного мультивибратора с самовозбуждением

Пусть, например, немного возрос анодный ток  $I_{a2}$  лампы  $L_2$ . Увеличение тока  $I_{a2}$  приводит к увеличению падения напряжения на резисторе  $R_{a2}$ . Вследствие этого напряжение на аноде лампы  $L_2$  несколько понизится и конденсатор  $C_2$  начнет разряжаться через лампу  $L_2$ . Создаваемое этим током падение напряжения на резисторе  $R_{c1}$  уменьшит анодный ток  $I_{a1}$ , что вызовет падение напряжения на резисторе  $R_{a1}$ , а следовательно и повышение потенциала анода лампы  $L_1$ . Это вызовет заряд конденсатора  $C_1$ . Ток заряда конденсатора  $C_1$  создаст на участке сетка – катод лампы  $L_2$  падение напряжения, приложенное плюсом к сетке лампы  $L_2$ , в результате чего ток  $I_{a2}$  станет еще больше. Дальнейшее увеличение этого тока вызовет еще большее понижение потенциала на аноде лампы  $L_2$  и, следовательно, дальнейший разряд конденсатора  $C_1$ . Это приведет к еще большему повышению напряжения на аноде лампы  $L_1$  и уменьшению тока  $I_{a1}$ . (рис. 84) Таким образом, случайное начальное незначительное увеличение анодного тока  $I_{a2}$  приводит к дальнейшему его увеличению и к уменьшению тока  $I_{a1}$ .

Процесс изменения токов и напряжений будет продолжаться до тех пор, пока величина  $I_{a2}$  не достигнет своего максимального значения или величина  $I_{a1}$  не упадет до нуля. Следовательно, важнейшей особенностью мультивибратора является то, что обе его лампы не могут одновременно проводить ток: когда ток проводит одна лампа, другая заперта, и наоборот. Переход из одного состояния в другое происходит лавинообразно в течение долей микросекунды.

Состояние схемы, в котором она окажется после скачка, также не будет устойчивым. Допустим, что в результате скачка ток  $I_{a2}$  достигнет максимальной величины, а лампа  $L_1$  оказалась запертой. Отрицательное напряжение, запирающее лампу  $L_1$ , создаваемое за счет разряда конденсатора  $C_2$ , будет уменьшаться по мере разряда  $C_2$ . Как только уменьшающееся напряжение достигнет напряжения открывания лампы –  $E_{co}$ , через лампу  $L_1$  начинает прохо-

дуть анодный ток  $I_{a1}$ . Появление тока  $I_{a1}$  приводит к понижению напряжения на аноде лампы  $L_1$ , и конденсатор  $C_1$  будет разряжаться, а конденсатор  $C_2$  – заряжаться. Очевидно, и это состояние системы не будет устойчивым. Оно сохранится до тех пор, пока отрицательное напряжение на стенке лампы  $L_2$ , создаваемое током разряда конденсатора  $C_1$ , не уменьшится до величины  $E_{co}$ , в результате чего наступит периодический процесс открывания и закрывания лампы.

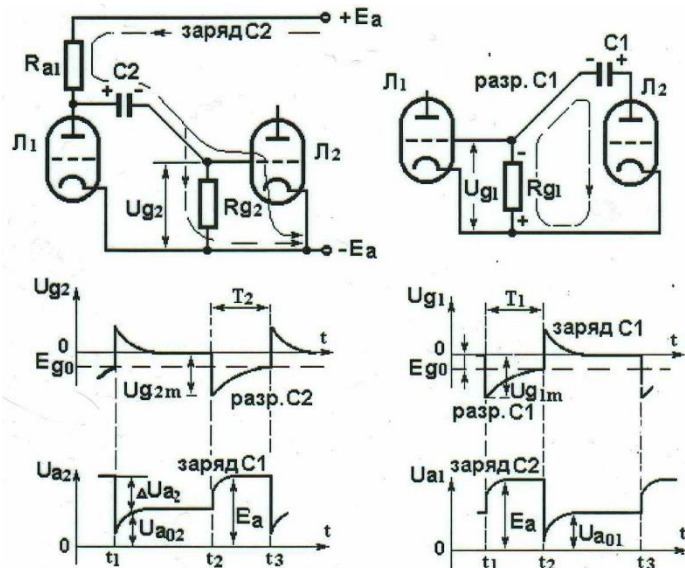


Рис. 84. Эпюры переходных процессов в мультивибраторе с самовозбуждением

### Мультивибратор в ждущем режиме

Под ждущими мультивибраторами понимают мультивибраторы, обладающие одним устойчивым состоянием равновесия и вырабатывающие одиночный импульс под воздействием внешнего сигнала.

Ждущие мультивибраторы используются в качестве расширителей (удлинителя) импульса, генераторов строб-импульсов, устройств временной задержки, а также для создания импульсов прямоугольной формы переменной длительности.

Постоянная времени, в течение которого лампы открываются и закрываются, рассчитывается по формуле:  $\tau = C_1 R_1$ ;  $\tau = C_2 R_2$ .

Ждущий мультивибратор в отличие от мультивибратора, рассмотренного ранее, вырабатывает импульсы только под воздействием пусковых импульсов. Его можно получить из симметричного мультивибратора, если на сетку одной из его ламп подать отрицательное напряжение такой величины, что бы эта лампа находилась в запертом состоянии.

Особенности ждущих мультивибраторов:

1. Форма и длительность вырабатываемых ими импульсов не зависят от пускового импульса. Пусковые импульсы определяют лишь моменты запуска мультивибратора и частоту повторения вырабатываемых ими импульсов.

2. Длительность импульсов мультивибратора зависит от времени разряда конденсаторов через сопротивления.

3. Если на сетку лампы поступают как «+», так и «-» импульсы, то мультивибратор будет запускаться лишь отрицательным импульсом, т. к. положительные не могут опрокинуть схему (лампа  $L_1$  в состоянии покоя открыта). Положительные импульсы будут запускать мультивибратор только в том случае, если их подавать на сетку лампы  $L_2$ .

Рассмотрим мультивибратор с емкостными связями (рис. 85). Как было сказано, ждущий мультивибратор отличается от самовозбуждающегося мультивибратора тем, что на сетку од-

ной из ламп подается отрицательное напряжение от источника тока  $E$ . Благодаря этому, после окончания разряда конденсатора  $C_1$  лампа  $L_2$  остается запертой. Схема имеет устойчивое состояние покоя, в котором она может находиться сколько угодно. В этом состоянии лампа  $L_2$  заперта, а лампа  $L_1$  открыта, конденсатор  $C_2$  заряжен до напряжения анодного источника, а конденсатор  $C_1$  разряжен.

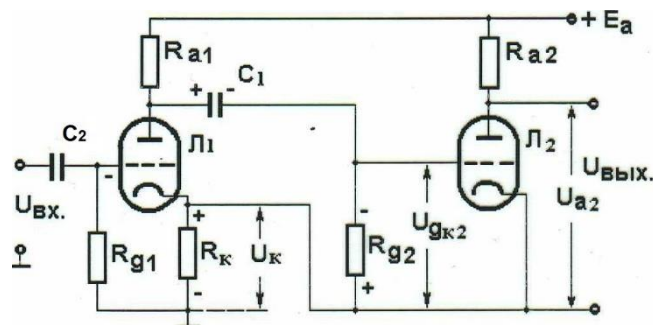


Рис. 85. Схема ждущего мультивибратора

Если на сетку  $L_1$  подать кратковременный отрицательный импульс, то анодный ток лампы  $L_1$  уменьшится, что немедленно приведет к опрокидыванию схемы, так же как в мультивибраторе с самовозбуждением. Лампа  $L_1$  заперется, а  $L_2$  откроется. В таком состоянии схема будет находиться и после окончания пускового импульса до тех пор, пока разрядный ток конденсатора  $C_2$ , протекая по сопротивлению  $R_2$ , создает на нем отрицательное напряжение, достаточное для запирающей лампы  $L_1$ . Конденсатор  $C_1$  при этом заряжается. Так как на сетку лампы  $L_2$  подано отрицательное напряжение от источника  $E$  напряжение на сетке при зарядке конденсатора  $C_1$  не бывает положительным и в сеточной цепи лампы ток не протекает.

Конденсатор  $C_1$  заряжается только через сопротивление  $R_3$ .

Постоянная времени первого конденсатора обычно берется больше постоянной времени второго конденсатора, определяющей длительность разряда второго конденсатора. Поэтому заряд конденсатора  $C_1$  продолжается все время, пока разряжается конденсатор  $C_2$ . Зарядный ток создает на сопротивлении  $R_3$  падение напряжения, которое поддерживает  $L_2$  в открытом состоянии. Когда разряд конденсатора  $C_2$  будет подходить к концу и напряжение на сетке лампы  $L_1$  станет равным напряжению отпирающей, через лампу потечет ток. Напряжение на аноде  $L_1$  уменьшится, конденсатор  $C_1$  перестанет заряжаться, и начнется его разряд через сопротивление  $R_3$ . При этом на сетке лампы  $L_2$  появится отрицательное напряжение и ток лампы уменьшится. Напряжение на аноде лампы  $L_2$  повысится и конденсатор  $C_2$  начнет заряжаться. Ток заряда создает положительное напряжение на сетке лампы  $L_1$ , в результате чего ее анодный ток еще более увеличится. Схема опрокинется, вернется в состояние покоя и будет ожидать следующего пускового импульса.

Выходное напряжение снимается с анода той или другой лампы в зависимости от требуемой полярности сигнала. Изменением сопротивлений  $R_{c1}$  и  $R_{c1}$  (или емкостей  $C_1$  и  $C_2$ ) можно менять длительность формируемых импульсов.

### § 7.2. Назначение, состав и работа блокинг-генератора

Блокинг-генератор представляет собой однокаскадный генератор кратковременных импульсов с сильной индуктивной положительной обратной связью (рис. 86).

Длительность импульсов, вырабатываемых блокинг-генератором, может быть в пределах от долей микросекунды до нескольких сот микросекунд. Они используются в индикаторах и синхронизирующих устройствах РЛС, в счетчиках импульсов, в делителях частоты импульсов и других устройствах. Как и мультивибраторы, блокинг-генераторы могут работать в режимах: автоколебательном и синхронизации (ждущем режиме).

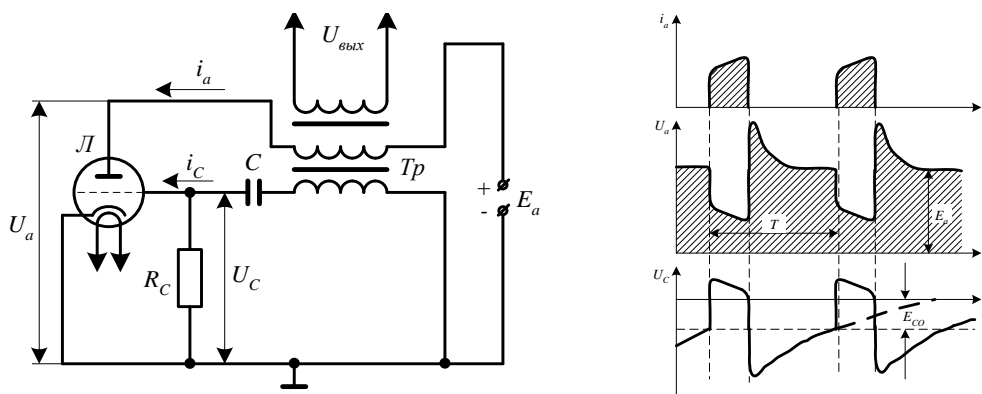


Рис. 86. Схема блокинг-генератора с графиком напряжений и тока

Основными элементами схемы блокинг-генератора являются: электронная лампа  $L$ , импульсный трансформатор  $Tr$  со стальным или ферритовым сердечником, конденсатор  $C$ , резистор.

Принцип работы блокинг-генератора рассмотрим на рис. 79. В промежутках между генерацией импульсов лампа заперта отрицательным напряжением на сетке, создаваемым на сопротивлении  $RC$  током разряда конденсатора  $C$ . По мере разряда конденсатора напряжение на сетке постепенно повышается и в момент, когда оно достигает напряжения отсечки, лампа откроется и через анодную обмотку импульсного трансформатора начнет протекать анодный ток.

При этом в сеточной обмотке трансформатора индуцируется напряжение, полярность которого повышает потенциал на сетке, это приводит к дальнейшему повышению напряжения на сетке. В результате происходит лавинообразный процесс увеличения анодного тока  $I_a$  и напряжения на сетке  $U_C$ .

Наращение тока продолжится до величины тока насыщения лампы, после чего он остаётся постоянным

С прекращением нарастания анодного тока исчезнет ЭДС самоиндукции во вторичной обмотке и конденсатор  $C_2$  начнет разряжаться через вторичную обмотку и сопротивление  $R_C$ . При этом дальнейшее уменьшение напряжения на сетке будет приводить к уменьшению анодного тока и возникнет обратный лавинообразный процесс, приводящий к быстрому запираению лампы.

Напряжение на сетке продолжает убывать, и после запираения лампы, так как при резком спадании анодного тока в обмотках трансформатора индуцируются большие напряжения.

В это время конденсатор  $C$  медленно разряжается через резистор  $R_C$ , а напряжение на сетке лампы медленно повышается. Разряд продолжается до тех пор, пока напряжение на сетке не достигнет потенциала отпираания лампы ( $E_{CO}$ ). В этот момент лампа отпирается и начинается повторный цикл работы схемы.

Напряжение с блокинг-генератора можно снимать различными способами. Обычно это делают с помощью специальной третьей (выходной) обмотки трансформатора или с анода (катода) лампы.

Длительность импульса определяется параметрами схемы: лампы, конденсатора, трансформатора. Ее можно менять, изменяя емкость конденсатора  $C$ .

### Ждущий блокинг-генератор

В ждущем режиме блокинг-генератор генерирует импульсы лишь под воздействием внешнего запускающего импульса  $U_3$  (рис. 87).

Во время паузы между запускающими импульсами лампа блокинг-генератора остается запертой. Это обеспечивается подачей на управляющую сетку лампы от отдельного источника отрицательного напряжения  $E_g$  большего, чем напряжение запираения.



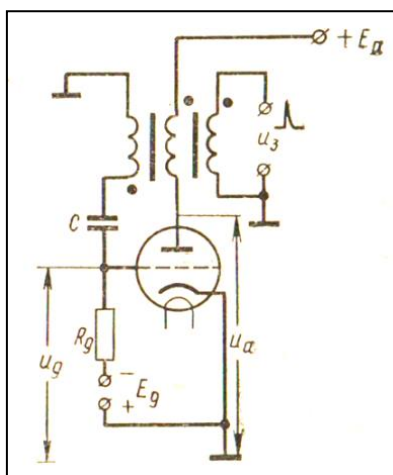


Рис. 87. Ждущий блокинг-генератор

При воздействии запускающего импульса лампа отпирается и происходит процесс формирования импульса, протекающий так же, как и в автоколебательном режиме. После окончания импульса конденсатор разряжается через резистор до исходного напряжения  $E_g$ , после чего схема возвращается в первоначальное состояние устойчивого равновесия.

## Раздел 8. Радиопередающие устройства

### § 8.1. Структурная схема радиопередающего устройства

Основным назначением передатчика является создание кратковременных импульсов высокочастотной энергии, т. е. преобразование подводимой к нему электрической энергии в энергию кратковременных импульсов токов СВЧ большой мощности, что достигается за счет накопления энергии в накопительных устройствах.

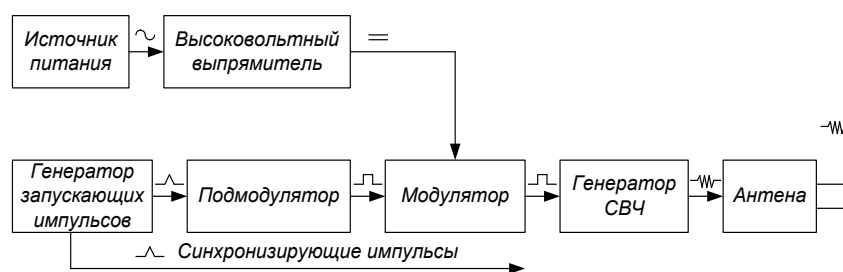


Рис. 88. Функциональная схема передатчика РЛС

Типовая функциональная схема передатчика показана на рисунке 88. Как следует из схемы, в состав передатчика входят: подмодулятор, модулятор, генератор СВЧ, источник питания и другие элементы.

Рассмотрим основные технические характеристики передающего устройства. К ним относятся: рабочая длина волны (несущая частота), мощность в импульсе, частота повторения импульсов, длительность и форма высокочастотных импульсов.

**Рабочая длина волны  $\lambda$**  зависит от требуемой дальности обнаружения и других факторов.

**Мощность в импульсе.** Форма генерируемых передатчиком высокочастотных импульсов показана на рис. 89. Мощностью в импульсе называется мощность, которая развивается на выходе передатчика в период генерирования импульса. От мощности в импульсе зависит дальность действия станции.

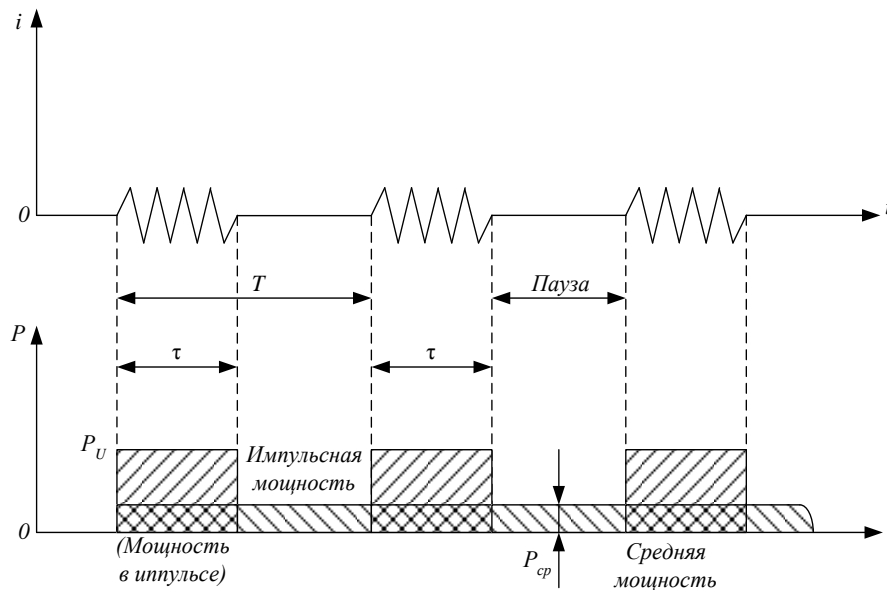


Рис. 89. Мощность импульса передатчика

После кратковременного излучения генератор выключается на сравнительно продолжительное время, в течение которого его мощность равна нулю. Поэтому в течение полного периода повторения  $T$  (за время импульса и паузы) передатчик через антенну излучает некоторую среднюю мощность, которая во много раз меньше импульсной, т. е.

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{и}} \frac{\tau}{T} = P_{\text{и}} \tau F,$$

где  $P_{\text{ср}}$  – средняя мощность передатчика;  $P_{\text{и}}$  – импульсная мощность;  $\tau$  – длительность импульса;  $T$  – период повторения;  $F$  – частота повторения.

Например, если мощность в импульсе равна 200 кВт, длительность импульса 8 мкс, а частота повторения импульсов  $F = 400$  Гц, то средняя мощность

$$P_{\text{ср}} = \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 400}{10^6} = 640 \text{ Вт.}$$

**Частота повторения импульсов** – это количество высокочастотных импульсов, излучаемых РЛС за одну секунду. С периодом повторения  $T$  ее связывает соотношение  $F = \frac{1}{T}$ .

Частота следования импульсов определяет максимальную дальность действия станции. Пауза между высокочастотными импульсами должна обеспечивать возвращение импульсов, отраженных от целей, расположенных в пределах дальности действия станции, в противном случае отраженные импульсы от целей, находящихся за пределами ее дальности действия, вернуться после излучения следующего импульса, а на экране станции они могут возникнуть где-то в начале развертки. Иначе говоря, в этом случае не решается однозначно связь между истинным местоположением целей и их отображением на индикаторах. Такие ситуации могут возникнуть при явлении сверхрефракции, когда дальность действия радиолокационной станции резко возрастает по сравнению с расчетной.

**Длительность и форма импульса.** Эти параметры оказывают существенное влияние на работу радиолокационной станции. Обычно длительность импульса лежит в пределах 0,1...10 мкс. Его форму стремятся создать близкой к прямоугольной с максимальной крутизной переднего фронта, что обеспечивает наибольшую точность отсчета дальности.

## § 8.2. Генераторы СВЧ

### Магнетронный генератор

Магнетронный генератор предназначен для создания мощных импульсов высокочастотных колебаний. Он состоит из генераторной лампы-магнетрона, установленного между полюсами постоянного магнита.

Состав и устройство магнетрона (рис. 90):

1. Катод.
2. Нить накала с изоляторами.
3. Анодный блок.
4. Резонансные контура.
5. Петля связи.
6. Вывод высокочастотной энергии.

Анодный блок магнетрона представляет собой металлический цилиндр, в котором высверлены восемь полостей, соединенной с центральной полостью щелями. Каждая из полостей вместе со щелью является резонансным контуром, который связан центральной полостью с другими контурами.

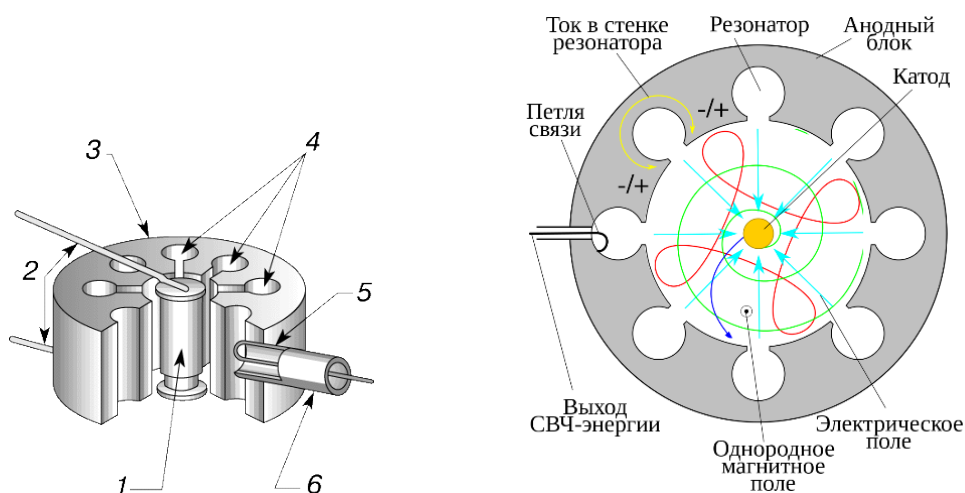


Рис. 90. Устройство магнетрона

В один из контуров анода введена петля связи, при помощи которой энергия колебаний передается из магнетрона в антенно-волноводную систему. В центральной полости помещен мощный оксидный катод, являющийся источником электронов.

Катод подогревается нитью накала, выводы которой изолированы от анодного блока стеклянными изоляторами. Ребристый кожух предназначен для лучшего охлаждения анодного блока.

Работа магнетронного генератора заключается в следующем. При подаче напряжения на нить накала подогревается катод, который начинает излучать электроны. Так как электрон помещен между полюсами сильного магнита, а на анод подается высокое напряжение, то на электрон, движущийся в пространстве между катодом и анодом, воздействуют три поля:

- постоянное магнитное поле  $H$ , направленное вдоль оси катода;
- постоянное радиальное электрическое поле  $E$ , направленное от анода к катоду;
- высокочастотное электрическое поле, возникающее между сегментами анодного блока.

Электроны, испускаемые катодом, под действием электрического поля  $E$  летят от катода к аноду. Пути движения электронов прямолинейны (рис. 91, а).

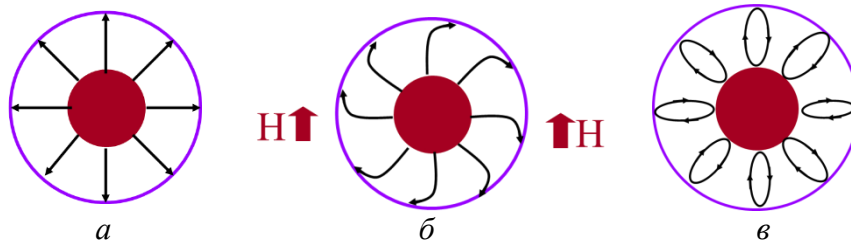


Рис. 91. Пути движения электронов под действием полей

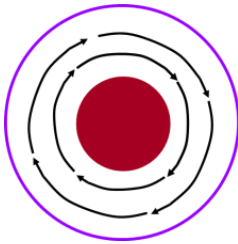


Рис. 92. Образование электронного кольца

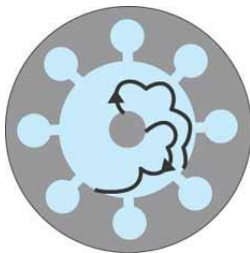


Рис. 93. Преобразование энергии постоянного тока в энергию переменного тока

Под действием магнитного поля пути движения электронов искривляются, так как они движутся в направлении, перпендикулярном силовым линиям (рис. 91, б). Таким образом, на электроны внутри магнетрона действуют две силы, обусловленные электрическим и магнитным полями. Под действием электрического поля электроны движутся от катода к аноду, под влиянием магнитного поля они стремятся повернуться в направлении, перпендикулярном начальному движению. При критической напряженности электроны, не достигая анода, будут двигаться по окружности (рис. 91, в). Вблизи анода образуется электронное кольцо (пояс) (рис. 92). Это кольцо вращается с большой скоростью  $V = \frac{E}{B}$ ;

$E$  – напряженность поля,  $B$  – магнитная индукция.

При этом в щелях и пространстве около них возникает переменное электрическое поле. Это приведет к тому, что вращающийся электронный поток станет неравномерным. Электронный поток начнет отдавать свою энергию объемным контурам магнетрона, т. е. энергия постоянного тока будет преобразовываться в энергию переменного тока. Принцип преобразования заключается в следующем (рис. 93): под действием положительного напряжения на аноде скорость электронов по мере их приближения к аноду возрастает (электроны отбирают энергию от источника постоянного тока). Под действием магнитного поля линия движения электронов искривляется, и часть электронного потока начинает двигаться параллельно аноду.

Когда электрон пролетает над щелью второго резонатора, он тормозится электрическим полем этой щели, поскольку движется от участка анода с более высоким положительным напряжением к участку с менее высоким напряжением. При этом часть энергии электрона передается переменному электрическому полю резонатора.

Когда электрон пролетает над щелью третьего резонатора (рис. 94), он отбирает энергию от его переменного поля, потому что движется от участка анода с менее высоким положительным напряжением к участку с более высоким напряжением.

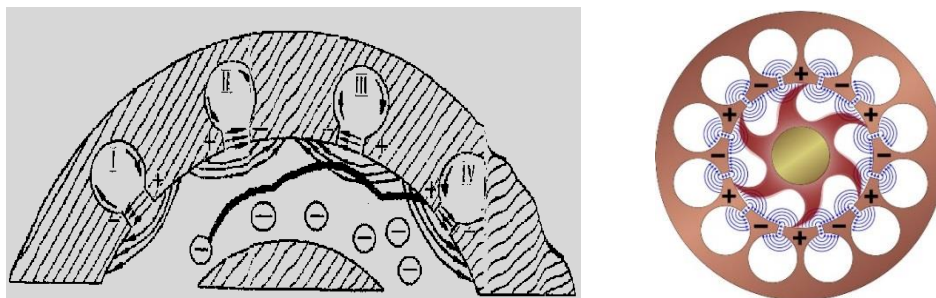


Рис. 94. Взаимодействие электронов с переменным полем резонаторов

Из рис. 94 видно, что плотность электронного потока неравномерна. Неравномерное распределение происходит за счет взаимодействия движущихся электронов с переменными электрическими полями резонаторов.

Таким образом, за время движения от катода к аноду электроны отбирают энергию у постоянного электрического поля, а при движении под щелями отдают эту энергию переменному полю резонаторов, т. е. происходит преобразование энергии из постоянной в переменную. Электроны несколько раз отдают свою энергию полю резонаторов, пока не упадут на анод. В результате возникают колебания сверхвысокой частоты внутри магнетрона. Энергия колебаний выводится из магнетрона через виток связи и подается в антенно-волноводный тракт.

### Клистронный генератор

Клистрон – это электровакуумный прибор СВЧ, в котором преобразование постоянного потока электронов в переменный происходит путём модуляции скоростей электронов электрическим полем СВЧ (при пролёте их сквозь зазор объёмного резонатора) и последующей группировки электронов в сгустки (из-за разности их скоростей) в пространстве дрейфа, свободном от поля СВЧ (рис. 95). *Группирование электронов* – это периодическое уплотнение потока электронов в пучке.

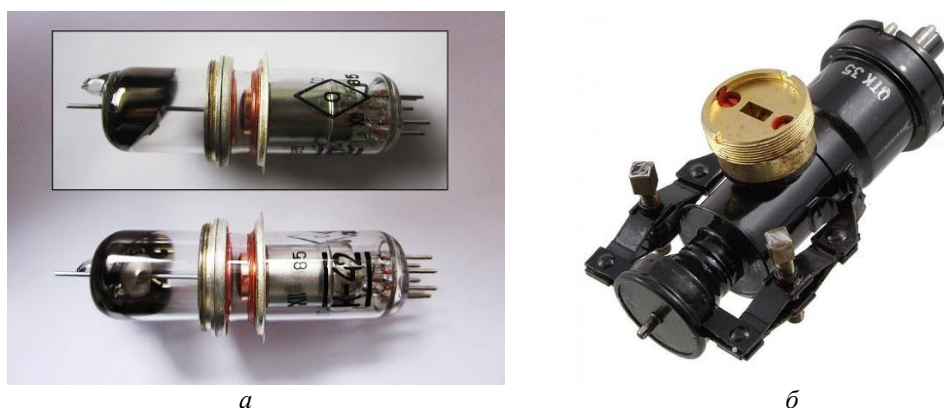


Рис. 95. Клистрон:  
а) пролетный; б) отражательный

В результате взаимодействия кинетическая энергия электронов, полученная от источника постоянного напряжения, преобразуется в энергию высокочастотных колебаний.

Клистроны подразделяются на 2 класса: пролётные и отражательные.

В *пролётном* клистроне электроны, испускаемые катодом, последовательно пролетают сквозь зазоры двух объёмных резонаторов – входного и выходного. В отражательном клистроне объёмный резонатор один. *Резонатор* – это объем, ограниченный металлическими стенками, в котором происходят электрические колебания. При этом внутренняя поверхность стенок резонатора сама служит и токоведущей поверхностью.

Основное назначение отражательных клистронов – генерирование СВЧ колебаний малой мощности. Клистрон такого типа применяется в приемнике РЛС 1РЛ33 ЗСУ-23-4М «Шилка».

Принцип действия клистронного генератора основан на взаимодействии электронного потока с переменным полем в резонаторе (рис. 96).

Отражательный клистрон имеет один полый резонатор, дважды пронизываемый электронным потоком. Возвращение электронов в зазор  $d$  резонатора обеспечивается с помощью отражателя, находящегося под отрицательным постоянным потенциалом по отношению к катоду. Резонатор отражательного клистрона играет роль группирователя при первом прохождении электронов через зазор  $d$  и роль выходного контура при втором прохождении.

Промежуток  $S$  между зазором резонатора и отражателем играет роль пространства группировки (*пространство дрейфа*), где происходит преобразование модуляции электронного потока по скорости в модуляцию по плотности. Электронные сгустки образуются относительно электронов, прошедших в первый раз зазор в момент перехода поля через нуль от ускоряющего к тормозящему.

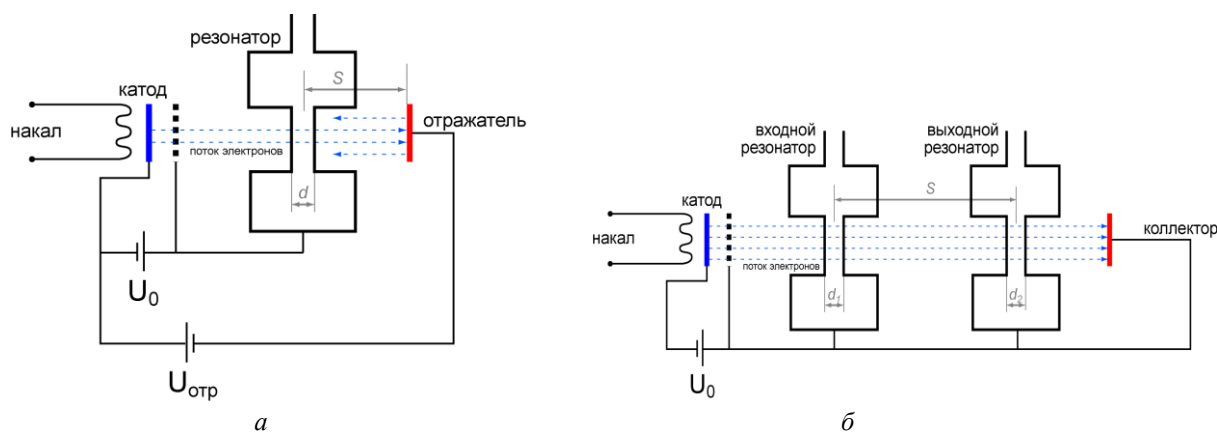


Рис. 96. Схема работы клистрона:  
а) отражательного; б) пролётного

*Пространством дрейфа* называют пространство, в котором электроны движутся с постоянной скоростью или с постоянным ускорением. В зависимости от конструкции лампы в этом пространстве либо нет никакого электромагнитного поля, либо имеется постоянное электрическое поле. Характерной особенностью пространства дрейфа является отсутствие в нем поля высокой частоты.

*Модуляцией скорости* называется периодическое изменение скорости электронов в ту и другую сторону от ее среднего значения, аналогичное изменениям амплитуды тока высокой частоты при амплитудной модуляции.

Для того, чтобы клистрон мог генерировать незатухающие СВЧ колебания, сгустки должны проходить через зазор при обратном движении в момент, когда в нем имеется тормозящее высокочастотное электрическое поле, создаваемое высокочастотным напряжением, подаваемым на вход клистрона (фокусирующие катушки).

Для получения электрического тока на резонатор подается постоянное напряжение, положительное относительно катода.

Отражатель ставится для того, чтобы электроны, которые пролетели сквозь резонатор, повернули обратно и пролетели электронный зазор резонатора второй раз. Электроны, вылетающие из катода, ускоряются положительным напряжением, приложенным к резонатору, и энергия источника постоянного напряжения превращается в кинетическую энергию электронов, летящих в вакууме.

В течение одного полупериода это поле ускоряет электроны, и энергия высокочастотных колебаний расходуется на увеличение кинетической энергии летящих электронов; в течение следующего полупериода высокочастотное электрическое поле тормозит электрон, и кинетическая энергия электронов превращается в энергию высокочастотных колебаний.

Отражательные клистроны применяются в различной аппаратуре в качестве маломощных генераторов в качестве гетеродинов СВЧ приемников, в измерительной аппаратуре и в маломощных передатчиках.

Их основные преимущества заключаются в конструктивной простоте и наличии электронной перестройки частоты.

## Раздел 9. Приемные устройства РЛС

### § 9.1. Структурные схемы приемных устройств РЛС

Радиоприемное устройство, как элемент системы связи, предназначено для преобразования проходящих в пункт приема радиосигналов в сообщение с допустимой потерей информации. Задача выполняется путем улавливания, преобразования и усиления радиосигналов и извлечения из них информации. По особенностям схемы различают приемники прямого усиления и супергетеродинные приемники.

В состав приемника прямого усиления (рис. 97) входят: входные устройства, усилитель высокой частоты, детектор, усилитель низкой частоты.

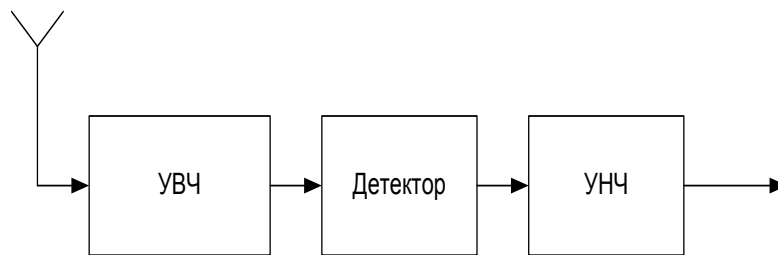


Рис. 97. Структурная схема приемника прямого усиления

Входные устройства предназначены для осуществления избирательности приемника и настроены на частоту принимаемого сигнала. Представляют собой антенны, отрезки волноводов в диапазоне СВЧ. Усилители высокой частоты усиливают несущую частоту сигнала до величины, необходимой для работы детектора. В качестве УВЧ применяются резонансные усилители, настроенные на частоту высокочастотного несущего сигнала, лампы бегущей волны в диапазоне СВЧ. Детектор необходим для преобразования ВЧ сигнала в низкочастотный несущий полезную информацию и по закону которого меняется амплитуда ВЧ сигнала. Усилитель низкой частоты необходим для усиления низкочастотного полезного сигнала до величины необходимой для работы оконечных устройств.

Приемники РЛС, как правило, построены по супергетеродинной схеме. Так как эти приемники позволяют достигать одновременно высокой избирательности и малой степени частотных искажений, а также большой степени усиления. Именно эти качества необходимы для приемников РЛС.

В состав приемника (рис. 98) входят: усилитель высокой частоты (УВЧ), преобразователь частоты, усилитель промежуточной частоты (УПЧ), детектор, видеоусилитель и источники питания.

Усилитель высокой частоты предназначен для выделения полезного сигнала из всех сигналов и помех, поступающих из антенны, и для начального усиления сигнала. В качестве УВЧ применяются резонансные усилители, т. е. усилители с колебательными контурами, так как они обладают способностью выделять и усиливать полезные сигналы, на частоту которых настроены их контуры, и подавлять помехи, имеющие другие частоты. В УВЧ применяются лампы, специально приспособленные для работы на СВЧ, причем триоды предпочитают пентодам, так как первые создают меньшие шумы.

В радиолокационных приемниках редко применяется более двух каскадов УВЧ. На частотах выше 3000 МГц (сантиметровые волны) применение УВЧ, работающего на лампах обычных типов, не приводит к повышению чувствительности приемника, поэтому УВЧ на этом диапазоне обычно не применяются. Для усиления колебаний на сантиметровых волнах применяется лампа бегущей волны (ЛБВ).

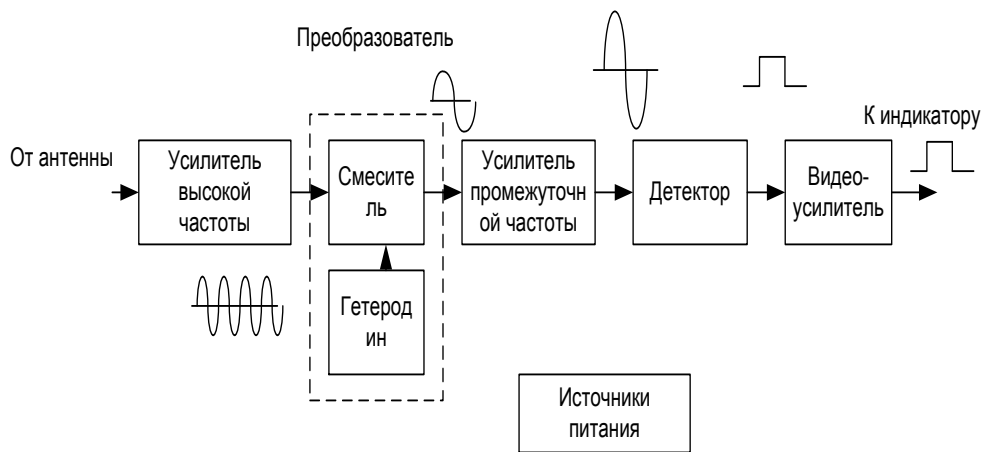


Рис. 98. Структурная схема супергетеродинного приемника

Преобразователь частоты преобразует напряжение частоты принимаемого сигнала в напряжение промежуточной частоты. Он состоит из смесителя и маломощного генератора высокой частоты (гетеродина). Для преобразования частоты на вход смесителя подаются два переменных напряжения: напряжение с частотой сигнала и напряжение с частотой гетеродина, несколько отличающейся от частоты сигнала. Преобразование частоты основано на явлении биений при сложении колебаний разных частот.

Гетеродин непрерывно вырабатывает колебания высокой частоты с напряжением  $U_r$  и частотой  $f_r$ . Приходящий сигнал имеет напряжение  $U_c$  и частоту  $f_c$  (рис. 99).

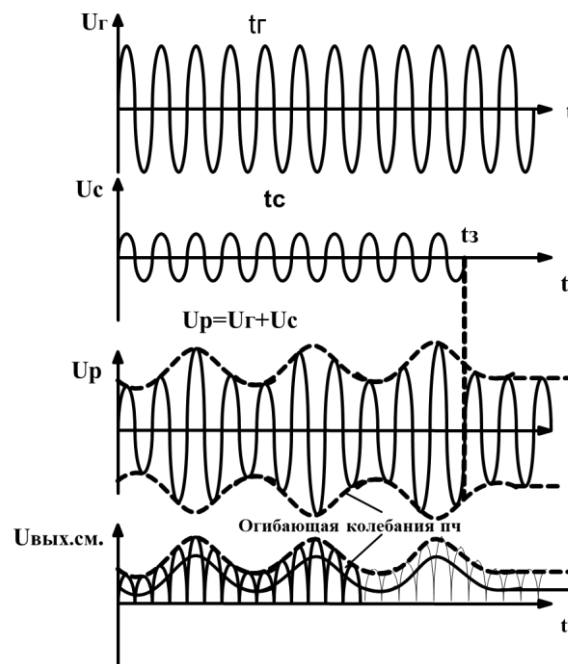


Рис. 99. Эюры напряжений при обработке сигнала в преобразователе

В смесителе происходит сложение этих колебаний, в результате чего получается результирующее напряжение  $U_p = U_r + U_c$ . График результирующего напряжения получается путем графического сложения напряжений  $U_r$  и  $U_c$ .

Амплитуда результирующего напряжения периодически изменяется. Изменения амплитуд результирующего напряжения и называются биениями. Частота биений, или промежуточная частота  $f_{пч}$  значительно ниже частоты сигнала и равна разности между частотами гетеродина и сигнала.



Несмотря на то, что огибающая результирующего напряжения изменяется с промежуточной частотой, колебаний промежуточной частоты в результирующем напряжении не содержится. Для получения промежуточной частоты из результирующего напряжения необходимо срезать его положительные или отрицательные полупериоды, т. е. продетектировать (рис. 99). Для этой цели в качестве смесителя применяется какой-либо нелинейный элемент (цепь, не подчиняющаяся закону Ома). На сантиметровых волнах применяют кристаллический детектор, а на дециметровых и метровых волнах – диод, триод или пентод.

Продетектированное напряжение содержит как промежуточную частоту, так и колебания более высоких частот. Чтобы выделить колебания промежуточной частоты, на выходе смесителя включают колебательный контур, настроенный на промежуточную частоту. В контуре возбуждаются колебания промежуточной частоты, а колебания других частот контуром подавляются.

При изменении частоты передатчика и принимаемых сигналов изменяют частоту гетеродина таким образом, чтобы промежуточная частота не изменялась. Такая работа супергетеродинного приемника облегчает задачу настройки и изготовления контуров УПЧ.

Усилитель промежуточной частоты служит для усиления напряжения промежуточной частоты до величины, необходимой для нормальной работы детектора, и в то же время обеспечивает основную избирательность приемника. Подобно УВЧ, в УПЧ применяются резонансные усилители. Контур УПЧ настраивается на заводе на промежуточную частоту.

Промежуточная частота значительно ниже частоты принимаемых сигналов, поэтому от каждого каскада УПЧ можно получить большее усиление, чем от каскада УВЧ. В УПЧ используются обычно пентоды.

В приемниках различных радиолокационных станций бывает от 3 до 9 каскадов УПЧ, которые усиливают сигналы от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч раз.

Детектор преобразует импульсы промежуточной частоты в видеоимпульсы (импульсы постоянного тока), которые имеют форму огибающей высокочастотных импульсов. Он представляет собой выпрямитель и состоит из лампы (диода, триода или пентода) и сглаживающего фильтра. Лампа выпрямляет переменное напряжение, а фильтр сглаживает пульсации выходного напряжения.

Видеоусилитель предназначен для усиления видеоимпульсов, создаваемых детектором, до величины, достаточной для воспроизведения их на экране индикаторов, и для обеспечения нормальной работы других устройств, подключенных к выходу приемника. Для этого достаточно от одного до трех каскадов усиления видеочастоты.

Источники питания являются неотъемлемой частью всякого приемника. Они питают радиолампы необходимыми для их работы анодным и экранным напряжениями и напряжением накала.

В состав приемника часто входят ряд вспомогательных цепей, повышающих надежность и качество работы приемника: автоматическая регулировка усиления, автоматическая подстройка частоты гетеродина, устройство для уменьшения влияния помех.

## **§ 9.2. Технические характеристики приемной системы**

К основным характеристикам приемного устройства импульсной РЛС относятся: чувствительность, избирательность, полоса пропускания, частотный диапазон, динамический диапазон, коэффициент шума приемника.

1. *Чувствительность приемника*  $P_{пр. \min}$  – это минимальная мощность сигнала на входе приемника, при которой на его выходе получается преобразованный сигнал мощностью, достаточной для отображения на индикаторных устройствах. Количественно чувствительность приемника характеризуется наименьшим напряжением полезного сигнала, при котором его можно обнаружить на фоне внутренних шумов приемника.

Причиной внутренних шумов приемника являются тепловые движения электронов в проводниках, бомбардировка электронами элементов электронных ламп, непостоянство напря-

жения питания и другие явления. Внутренние шумы приемника ограничивают его чувствительность, так как с увеличением коэффициента усиления приемника усиливается не только полезный сигнал, но и шумы. Следовательно, существенное влияние на чувствительность оказывают шумы входных цепей и УВЧ приемника, так как они усиливаются последующими каскадами. Поэтому входные цепи и каскады УВЧ должны быть малозумящими.

В дециметровом и сантиметровом диапазонах чувствительность приемника измеряется в ваттах и децибелах, а в метровом диапазоне – в вольтах. Чаще всего в приемниках измеряют не чувствительность, а коэффициент шума.

2. *Коэффициент шума приемника* – это отношение мощности сигнал/шум на входе приемника к мощности сигнал/шум на его выходе:

$$N = \frac{(P_c / P_{ш})_{вх}}{(P_c / P_{ш})_{вых}}$$

Чем выше коэффициент шума приемника, тем хуже его чувствительность.

3. *Избирательность* – это способность приемника выделять полезный сигнал из всех совокупностей сигналов и помех. Основана на различии несущих частот и спектров сигналов. Избирательность приемника обуславливается резонансными свойствами входных цепей фильтров в усилительных каскадах.

4. *Полоса пропускания,  $2\Delta f$*  – область частот, на границах которой коэффициент усиления  $K$  уменьшается до 0,707. Чем шире полоса пропускания, тем меньше искажений получает принимаемый сигнал. Однако при этом увеличивается влияние внешних помех и ухудшается избирательность приемника, поэтому выбирается оптимальная полоса  $2\Delta f_{опт}$  которая определяется соотношением

$$2\Delta f_{опт} = \frac{0,8...1,37}{\tau_i},$$

где  $\tau_i$  – длительность импульса.

5. *Частотный диапазон* характеризует способность приемника работать в определенном диапазоне частот и определяет, в основном, помехозащищенность при воздействии активных помех. Количественно характеризуется коэффициентом перестройки по частоте  $K_f$ , равным отношению максимальной и минимальной частот, на которые может быть настроен данный приемник. Чем больше  $K_f$ , тем лучше защищен приемник от активных помех.

6. *Динамический диапазон* определяет способность приемника работать без перегрузки при воздействии сильных и слабых сигналов. Количественно определяют динамические диапазоны по входному  $D_{вх}$  и выходному  $D_{вых}$  сигналам.

Динамический диапазон по входному сигналу  $D_{вх}$  называют отношением максимального напряжения  $U_{вх. max}$ , при котором отсутствует перегрузка приемника, к минимальному входному напряжению  $U_{вх. min}$ , соответствующему предельной чувствительности приемника:

$$D_{вх} = \frac{U_{вх. max}}{U_{вх. min}}$$

Аналогично определяется динамический диапазон по выходному сигналу:

$$D_{вых} = \frac{U_{вых. max}}{U_{вых. min}}$$

Измеряются  $D_{вх}$  и  $D_{вых}$  в относительных единицах или децибелах. В современных приемниках должно быть  $D_{вх} \geq 70...80$  дБ. На практике для расширения динамического диапазона применяют различные схемы регулировки усиления:

- РРУ – ручная регулировка усиления;
- ВАРУ – временная автоматическая регулировка усиления;
- ШАРУ – шумовая автоматическая регулировка усиления.

### § 9.3. Преобразователи частоты

В задачу преобразователя частоты радиолокационного приемника входит понижение частоты радиоимпульсов без изменения их формы и длительности. Для радиолокационных приемников сантиметрового диапазона характерно применение диодных преобразователей частоты. Простейшая схема диодного преобразователя частоты изображена на рис. 100.

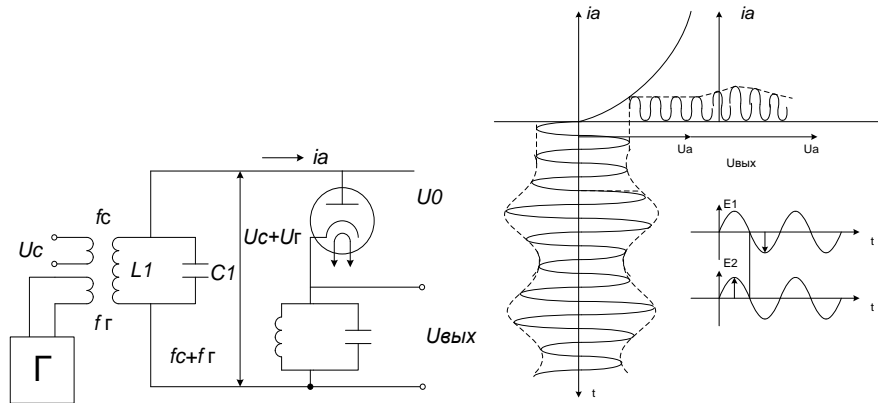


Рис. 100. Диодный преобразователь частоты

В этой схеме на входном контуре  $L_1C_1$  настроенном на частоту сигнала, создается результирующее напряжение  $U_c + U_r$ . Его амплитуда меняется с частотой биений, равной разности частот колебаний сигнала и гетеродина. Результирующее напряжение на контуре детектируется диодным детектором. Контур  $L_2C_2$  настроен на частоту биений равной разности частот сигнала и гетеродина.

В диодных преобразователях частоты приемников сантиметрового диапазона в качестве детектора применяются высокочастотные полупроводниковые диоды.

В некоторых приемниках РЛС сантиметрового диапазона получить значительное усиление сигнала на частоте принимаемых колебаний затруднено. Поэтому в этих приемниках усилители напряжения высокой частоты отсутствуют (Приемник РЛС 1РЛ33). В этом случае первым каскадом приемника является преобразователь частоты.

Для повышения чувствительности такого приемника необходимо, чтобы преобразователь частоты обладал малым уровнем внутренних шумов. Напряжение шумов на входе преобразователя частоты создается антенной, входной цепью, полупроводниковым диодом и гетеродином. В качестве гетеродина обычно используют отражательный клистрон, шумы которого в общем уровне шумов преобладают. Для борьбы с шумом гетеродина в сантиметровом диапазоне применяется двухтактный преобразователь частоты (рис. 101).

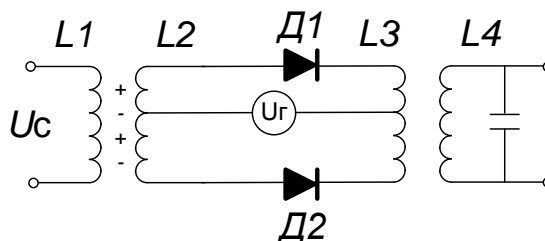


Рис. 101. Двухтактный преобразователь частоты

В данной схеме имеются два полупроводниковых диода. Они включены так, что напряжение  $U_r$  воздействует на оба диода в одинаковой фазе, а напряжение сигнала приложено к ним в противофазе. Верхняя и нижняя половины схемы строго симметричны.

При работающем гетеродине и отсутствии сигнала происходит детектирование  $U_r$ . А поскольку токи обоих диодов в катушке  $L_3$  протекают навстречу друг другу, то на выходе схемы напряжения нет. Таким образом происходит компенсация любой гармоник гетеродина, а следовательно и всех его шумовых составляющих.

Если действует на входе схемы только один сигнал  $U_c$ , то диоды работают поочередно и происходит двухполупериодное выпрямление сигнала и токи в катушке  $L_3$  протекают в одном направлении. В выходном контуре при этом сигнала нет, так как он настроен на  $f_{пр}$ . Если в схеме действуют оба напряжения, то в результате сложения напряжения гетеродина с напряжением сигнала на входе диодов возникают биения сигнала гетеродина с частотой  $f_{пр}$ , которые затем детектируются. Так как напряжение сигнала подводится к диодам в противофазе, то переменная составляющая промежуточной частоты так же проходит через диоды в противофазе. Это означает, что в катушке  $L_3$  переменные составляющие промежуточной частоты обоих диодов протекают в одном направлении и складываются, наводя в катушке  $L_4$  ЭДС, а переменные составляющие синфазного напряжения гетеродина компенсируются. Контур  $LC$  настроен на промежуточную частоту, поэтому на выходе схемы действует напряжение промежуточной частоты, которое в дальнейшем передается на усилители промежуточной частоты.

Поскольку для длин волн сантиметрового диапазона входные индуктивные цепи представляют большое сопротивление и входные сигналы, поэтому сильно затухают, то для устранения этого недостатка используют волноводно-кольцевые мосты, обладающие малым волновым сопротивлением. Кольцевой балансный смеситель (рис. 102) построен с использованием такого моста.

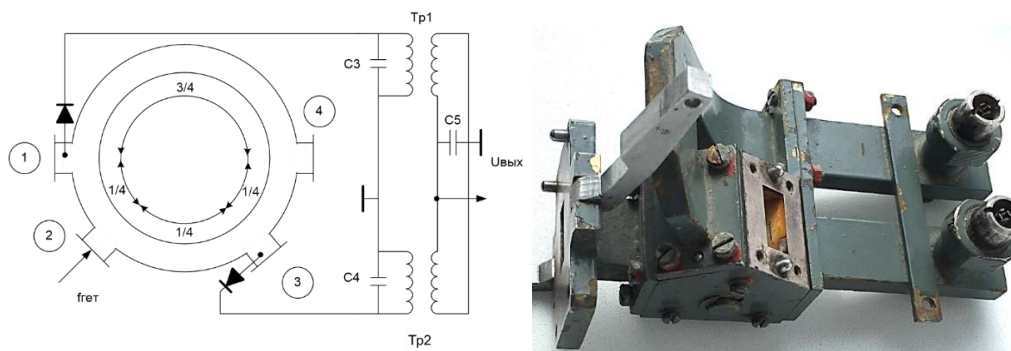


Рис. 102. Кольцевой балансный смеситель

**Кольцевой балансный смеситель** представляет собой прямоугольный волновод длиной в  $6/4\lambda$ , свернутый в плоскости вектора  $E$  электромагнитного поля в кольцо, от которого отходят четыре плеча и расположены на полуокружности кольца на расстоянии  $\lambda/4$  друг от друга.

В плече 1 и плече 3 установлены высокочастотные диоды, которые нагружены на два высокочастотных трансформатора  $Tr_1$  и  $Tr_2$ . Первичные обмотки трансформаторов настроены на промежуточную частоту конденсаторами  $C_3C_4$  и имеют разное направление намотки. Вторичные обмотки с одинаковым направлением витков соединены параллельно и настроены на промежуточную частоту конденсатором  $C_5$ .

Если подать в плечо 2 напряжение  $U_r$ , то при этом в плече 1 и плече 3 возбуждятся синфазные волны (рис. 103, а), так как расстояние до этих плеч от плеча 2 одинаковы и равны  $\lambda/4$ . Затем напряжения  $U_r$  детектируются и поступают на первичные обмотки  $Tr_1$  и  $Tr_2$ . Поскольку эти напряжения синфазны, а первичные обмотки намотаны встречно, то и токи в них будут иметь встречное направление и компенсируются, тем самым устраняя шумовые составляющие гетеродина.

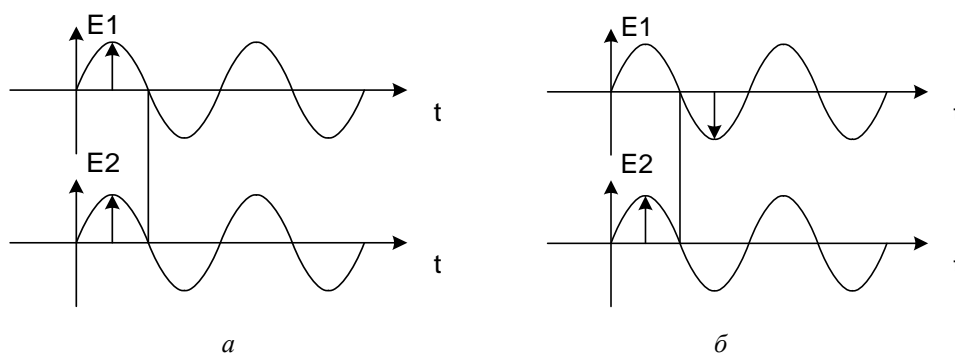


Рис. 103. Эюры напряжений балансного смесителя:  
*а – синфазные волны; б – противофазные волны*

Если возбудить плечо 4 напряжением  $U_c$ , то плечо 1 и 3 будут возбуждаться противофазными волнами (рис. 103, б). После детектирования эти напряжения попадают в первичные катушки  $Tr_1$  и  $Tr_2$ , имеющие встречные намотки и наводят в них токи имеющие одинаковые направления.

Если возбудить плечо 2 напряжением гетеродина, а плечо 4 напряжением сигнала одновременно, то на входе плеча 1 и 3 появятся напряжения гетеродина с частотой биений  $f_T$  и противофазны, так как противофазны напряжения сигнала. После детектирования противофазные сигналы промежуточной частоты складываются, а синфазные сигналы (шумы) гетеродина компенсируются, подобно схеме двухтактного преобразователя частоты.

## Раздел 10. Устройство элементов приемной системы

### § 10.1. Усилители

Усилитель представляет собой устройство, в котором под действием слабого входного сигнала за счет энергии источника питания вырабатывается выходной более сильный сигнал по форме такой же, как и входной.

Электронные усилители – это активные четырехполюсники использующие свойства ламп (полупроводников и др.) и энергию источника постоянного тока для увеличения мощности электрических сигналов.

Усилители можно классифицировать по различным признакам:

- 1) по типу усилительного элемента:
  - ламповые;
  - полупроводниковые и др.;
- 2) по диапазону усиливаемых частот:
  - усилители низкой (звуковой частоты), УНЧ;
  - усилители высокой (промежуточной) частоты, УВЧ-УПЧ;
  - усилители сверхвысокой частоты, СВЧ;
- 3) по количеству каскадов усиления:
  - однокаскадные;
  - двухкаскадные;
  - многокаскадные;
- 4) по виду усиливаемого сигнала и назначению:
  - видеоусилители;
  - импульсные усилители;
  - и т. д.

## Усилитель низкой частоты

Усилитель низкой (звуковой) частоты предназначен для усиления напряжения входного сигнала в диапазоне от 20 до 20000 Гц.

Рассмотрим однокаскадный усилитель низкой частоты на ламповом триоде (рис. 104). Каскадом называется устройство с одним усилительным элементом и обеспечивающими его работу цепями.

Усилитель низкой частоты состоит из следующих элементов:

- усилительный элемент (ламповый триод,  $L_1$ );
- цепочка автосмещения  $R_k, C_k$ ;
- сеточное сопротивление утечки  $R_c$ ;
- разделительный конденсатор  $C_p$ ;
- анодное сопротивление  $R_a$ .

В качестве усилительного элемента используется электровакуумный триод  $L_1$ . Анодной нагрузкой триода является активное сопротивление  $R_a$ , поэтому такой усилитель называется *резистивным* (*резисторным*). Анодное сопротивление,  $R_a$  служит для регулировки величины анодного тока.

Для установления линейного режима работы усилителя используется схема с цепочкой автоматического смещения. Точка  $A$  на анодно-сеточной характеристике (АСХ), определяющая величину анодного тока, соответствующего напряжению смещения, называется *рабочей точкой* (рис. 105, а). Рабочая точка определяет режим покоя усилителя, т. е. режим при отсутствии на входе переменного напряжения. Для выбора рабочей точки на линейном участке АСХ лампы  $L_1$  и создания режима автосмещения устанавливаются резисторы:

- между катодом и землей – катодное автосмещение,  $R_k$ ;
- между сеткой и землей – сопротивление утечки,  $R_c$ .

Цепь автоматического смещения  $C_k R_k$ , называемая «Гридлик» (от англ. *grid leak* – утечка сетки) состоит из параллельно соединенного конденсатора  $C_k$  и резистора  $R_k$ , включенных между катодом и сеткой. Цепочка работает следующим образом:

Импульсы сеточного тока заряжают конденсатор, на нем устанавливается некоторое отрицательное напряжение, которое запирает лампу. При этом конденсатор тут же начинает разряжаться через резистор – устанавливается равновесие между током заряда конденсатора (импульсами сеточного тока) и током разряда через резистор.

За счет протекания катодного тока, потенциал катода становится положительным, а сетка просто соединяется с землей через резистор (препятствующий закорачиванию на землю источника сигнала). Теперь на сетке нулевой потенциал, поэтому больше нет необходимости во входном разделительном конденсаторе.

Резистор  $R_c$  обеспечивает передачу напряжения смещения на сетку лампы  $L_1$ . Кроме того, он составляет цепь, по которой с сетки на катод отводятся электроны, преодолевшие потенциальный барьер и осевшие на витках сетки. Поэтому  $R_c$  называется резистором утечки.

На выходе каскада УНЧ для разделения постоянной и переменной составляющей анодного тока установлен разделительный конденсатор  $C_p$ .

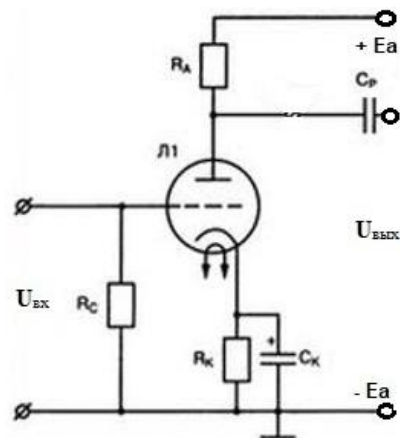


Рис. 104. Однокаскадный усилитель низкой частоты на ламповом триоде

### Принцип работы усилителя низкой частоты

При отсутствии переменного напряжения на входе каскада ( $U_{вх} = 0$ ) и подключении источника анодного напряжения  $E_a$  на управляющей сетке лампы  $L_1$  появляется напряжение смещения, а в анодной цепи протекает ток покоя,  $I_0$  по цепочке:  $+E_a, R_a$ , анод, катод,  $R_k, -E_a$

(рис. 105, з). Ток покоя  $I_0$  создает на резисторе  $R_k$  напряжение  $U_{Rk}$ . Это напряжение прикладывается к сетке через низкоомное сопротивление утечки  $R_c$  и тем самым обеспечивает необходимый режим работы лампы.

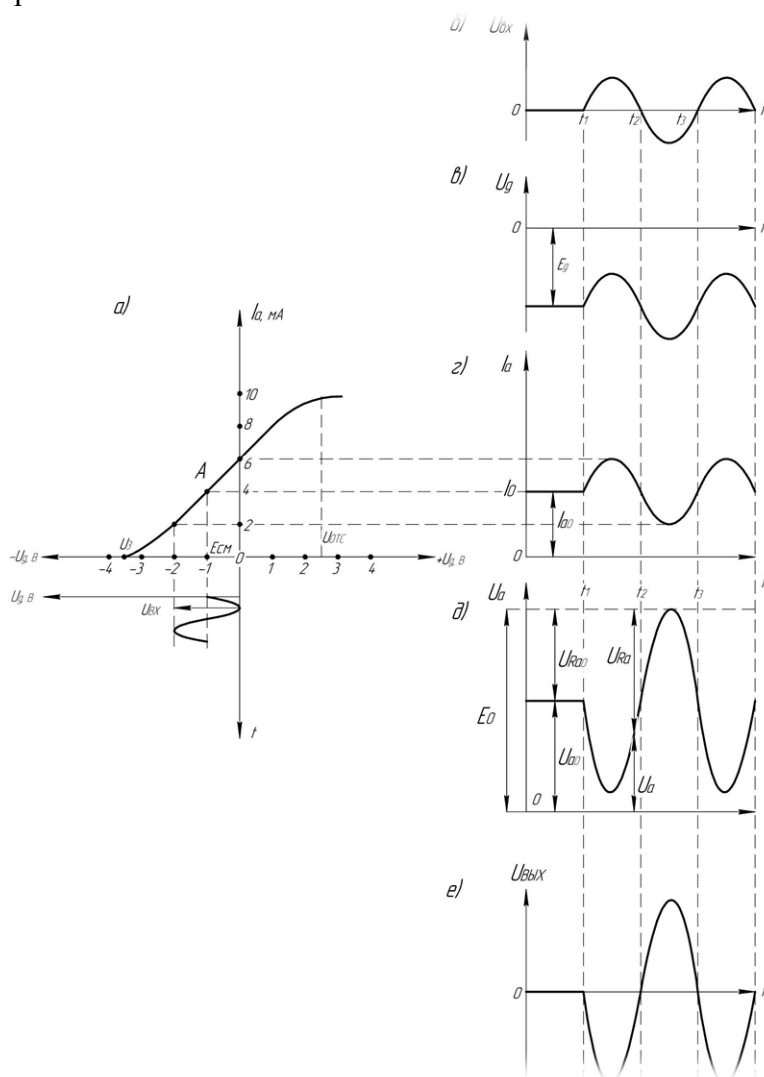


Рис. 105. Эюры напряжений и токов УНЧ

При поступлении гармонического сигнала на вход усилителя анодный ток начинает пульсировать по закону изменения входного напряжения.

В положительный полупериод ток анода увеличивается (рис. 105, з), возрастает напряжение на анодном сопротивлении, а анодное напряжение соответственно падает (рис. 105, д). Эти зависимости обусловлены 2-м законом Кирхгофа. В замкнутой цепи ЭДС источника напряжения  $E_a$  равно сумме падений напряжений анодного  $U_a$  и на анодном сопротивлении  $U_{Ra}$  ( $E_a = U_a + U_{Ra}$ ).

В отрицательный полупериод ток анода и напряжение на анодном сопротивлении уменьшается, а анодное напряжение возрастает.

Разделительный конденсатор  $C_p$  компенсирует постоянную составляющую выходного напряжения  $U_{вых}$  (рис. 105, е), при этом фаза выходного напряжения меняется (инвертируется) на  $180^\circ$ .

Таким образом за счет расхода энергии анодного источника  $E_a$  происходит усиление амплитуды входного напряжения. Кроме того, однокаскадный усилитель обладает инверторным свойством и для сохранения фазы входного сигнала необходимо применять четное количество каскадов усиления.

## Усилители высокой (промежуточной) частоты

Усилитель высокой частоты предназначен для усиления на частоте принимаемого сигнала, обеспечения минимального значения коэффициента шума приемника, подавления помех по дополнительным каналам приема.

В супергетеродинных приемниках РЛС происходит преобразование эхосигнала СВЧ в более низкую промежуточную частоту,  $f_{пр}$ . При этом усилители высокой частоты (УВЧ) называют усилителями промежуточной частоты (УПЧ). Применение постоянной промежуточной частоты, которая значительно ниже частоты принимаемого сигнала, позволяет получить большое неискаженное усиление сигнала необходимой полосы частот при устойчивой работе усилителя.

Усилители промежуточной частоты осуществляют основное усиление сигнала. Число каскадов, входящих в усилитель, часто называемой линейкой усилителя промежуточной частоты, может быть от 5 до 10. УПЧ характеризуются следующими параметрами:

- номинальной промежуточной частотой, обычно  $f_{пр} = 10 \dots 100$  МГц;
- полосой пропускания,  $\Delta f \sim 8$  МГц;
- коэффициентом усиления,  $K$ .

На практике при усилении радиоимпульсов длительностью  $\tau_{и} = 2 \dots 8$  мкс наибольшее применение находят УПЧ на одиночных настроенных контурах, поскольку они наиболее просты в изготовлении и настройке, наименее критичны к разбросу элементов схем, особенно емкостей ламп.

По устройству УПЧ аналогичны УНЧ. Отличием является наличие колебательного контура в анодной нагрузке (рис. 106, а).

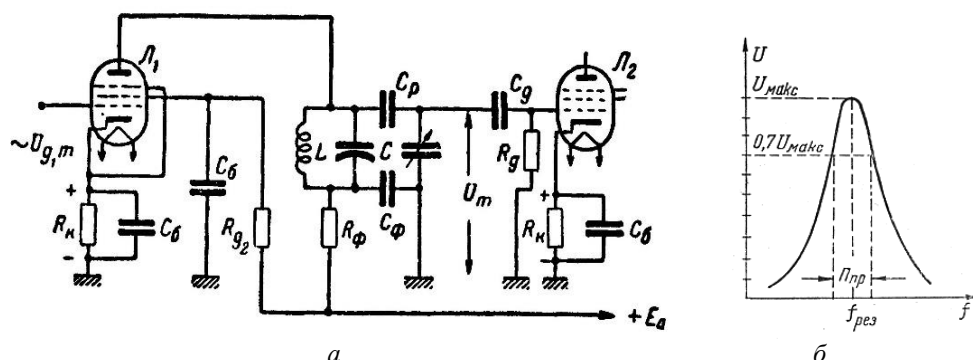


Рис. 106. Схема резонансного каскада УВЧ (УПЧ), полоса пропускания контура

Усиление входного сигнала происходит на резонансной частоте контура, которая определяется по формуле Томпсона:  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ . Такие усилители называются *резонансными*. Резонансным усилителем называется усилитель, предназначенный для избирательного усиления сигналов радиочастоты (в узком диапазоне частот  $f_0 \pm \Delta f$ ).

В схеме резонансного усилителя вместо сопротивления анодной нагрузки  $R_a$  используется  $LC$  параллельный колебательный контур. Его активное сопротивление на резонансной частоте  $f_0$  максимально, а для других частот резко уменьшается. Так как величина  $R_a$  влияет на коэффициент усиления усилителя  $K$ , то появляется полосовая зависимость  $K$  от  $f_0$  и, соответственно, избирательность. Считается, что усиливаемая полоса частот составляет  $2\Delta f$  (полоса пропускания). *Полоса пропускания*,  $2\Delta f$  – область частот, на границах которой коэффициент усиления  $K$  уменьшается до  $0.707U_{max}$  (рис. 106, б).

Для получения высокой добротности колебательного контура с узкой полосой пропускания в качестве усилительной лампы применяют *пентод*.



Составными элементами УПЧ на пентоде являются:

- усилительная лампа (пентод)  $L_1$ ;
- катодное смещение  $R_k$ ;
- сглаживающий фильтр  $C_k$ ;
- разделительный конденсатор  $C_p$ ;
- индуктивность  $L_1$  (служит для обеспечения стабильности работы усилителя за счет нейтрализации проходной емкости лампы  $L_1$ , настраивается на промежуточную частоту с этой емкостью).

Принцип действия усилителя сводится к следующему: до момента подачи на сетку сигнала  $U_{вх}$  через лампу  $L_1$  протекает анодный ток. В положительный полупериод переменного напряжения  $U_{вх}$  анодный ток возрастает, а анодное напряжение  $U_a$  уменьшается. В отрицательный полупериод  $U_{вх}$  анодный ток уменьшается, что приводит к возрастанию  $U_a$ , и далее процессы повторяются.

Таким образом, при подаче на сетку лампы переменного входного напряжения анодный ток начинает пульсировать, в результате чего начинает пульсировать напряжение на аноде. Пульсирующий анодный ток состоит из постоянной составляющей  $I_{a0}$  и переменной  $I_a$ .

Пульсирующее напряжение на аноде лампы также состоит из постоянной и переменной составляющей. Благодаря наличию разделительного конденсатора  $C_p$  из пульсирующего анодного напряжения выделяется только переменная составляющая, которая и является выходным напряжением усилителя  $U_{вых}$ . Таким образом за счет расхода энергии анодного источника  $E_a$  происходит усиление амплитуды входного напряжения. При чем за счет наличия колебательного контура в нагрузке усиление происходит в полосе пропускания усилителя и приемника в целом.

## § 10.2. Детекторы

**Детектор**, демодулятор (от лат. *detector* – открыватель, обнаружитель) – элемент электрической цепи, в котором происходит обнаружение электромагнитных колебаний с целью их индикации.

Детектирование – процесс преобразования модулированного сигнала с целью выявления передаваемого сообщения. Это процесс, обратный модуляции. В зависимости от вида модулированного сигнала различают амплитудное, частотное и фазовое детектирование.

### Амплитудный детектор

Амплитудный детектор – это демодулятор амплитудно-модулированного ВЧ-колебания. Амплитудное детектирование складывается из двух основных процессов:

- выделение огибающей амплитудно-модулированного колебания (радиоимпульса), т. е. создание низкочастотного сигнала;
- отделение (отфильтровывание) полезного низкочастотного сигнала от высокочастотных колебаний.

Простейший амплитудный детектор представляет собой – однополупериодный выпрямитель на одном диоде с выходным  $R, C$ -фильтром. На рис. 107 приведена схема амплитудного детектора на диоде. Первую часть процесса амплитудного детектирования выполняют диод и сопротивление  $R$ , вторую – конденсатор  $C$ .

Рассмотрим работу детектора. Модулированное ВЧ-напряжение с амплитудой  $u = U \cos \omega t$ , снимаемое с входного контура, подается на диод, который пропускает только положительную волну сигнала. Амплитуда среднего значения тока ( $I_{нч}$ ), проходящего через диод, будет изменяться как промодулированный НЧ сигнал. Этот ток создаст на резисторе  $R$  пульсирующее НЧ-напряжение.

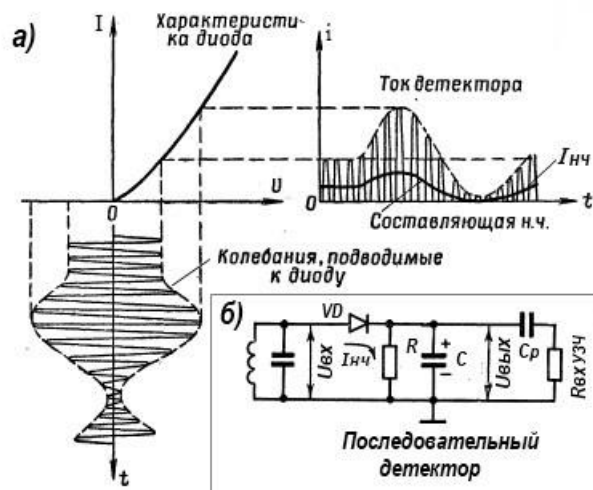


Рис. 107. Схема и эпюры диодного детектора

Чтобы напряжение на резисторе  $R$  изменялось по закону, близкому к закону модуляции, его шунтируют конденсатором  $C$ . Положительные полупериоды будут заряжать конденсатор и напряжение на нем будет близким к амплитуде детектированного сигнала. В отрицательные полупериоды небольшой обратный ток диода будет перезаряжать конденсатор и несколько уменьшать на нем напряжение, возникшее во время положительной полуволны сигнала. В результате этого напряжение на конденсаторе, а значит, на нагрузке детектора во время отрицательной полуволны сохранится почти постоянным, т. е. близким к амплитуде детектированного сигнала.

Этот протектированный сигнал через разделительный конденсатор  $C_p$ , емкостью в несколько тысяч пикофард, чтобы легко пропускал НЧ-сигнал, подается далее на вход усилителя низкой частоты приемника.

### Фазовый детектор

**Фазовый детектор** применяется для детектирования фазомодулированных, а также частотно-модулированных сигналов и для стабилизации частоты.

Принцип его действия заключается в следующем: при совместном действии двух переменных напряжений, одного исходного и другого сравниваемого с ним по фазе, на выходе фазового детектора выделяется напряжение, величина которого определяется сдвигом фаз обоих напряжений.

Пример схемы фазового детектора изображён на рис. 108. К управляющим сеткам  $g_3$  и  $g_i$  геттода подводятся соответственно исходное и сравниваемое напряжения. Но за исходное здесь взято то же самое напряжение сигнала, которое берется и в качестве сравниваемого по фазе. В цепь сетки  $g_i$  включен контур  $LC$ , напряжение на котором наводится за счет емкости между пространственным зарядом вокруг сетки  $g_3$  и сеткой  $g_i$ . Следовательно, анодный ток управляется двумя переменными напряжениями одинаковой частоты.

Если частота имеет среднее (несущее) значение  $f_0$ , то благодаря связи через внутреннюю емкость лампы напряжение на сетке  $g_i$  отстает от напряжения на сетке  $g_3$  на  $90^\circ$ . При изменениях частоты изменяется и фазовый сдвиг управляющих напряжений, так как сопротивление контура  $LC$  в зависимости от знака расстройки приобретает емкостную или индуктивную слагающую.

Режим лампы выбирается так, что анодный ток проходит лишь при положительных напряжениях на обеих сетках. При отрицательном напряжении хотя бы на одной из них анодный ток равен нулю. Таким образом анодный ток имеет форму импульсов, длительность которых зависит от сдвига фаз управляющих напряжений (рис. 108, а–в).

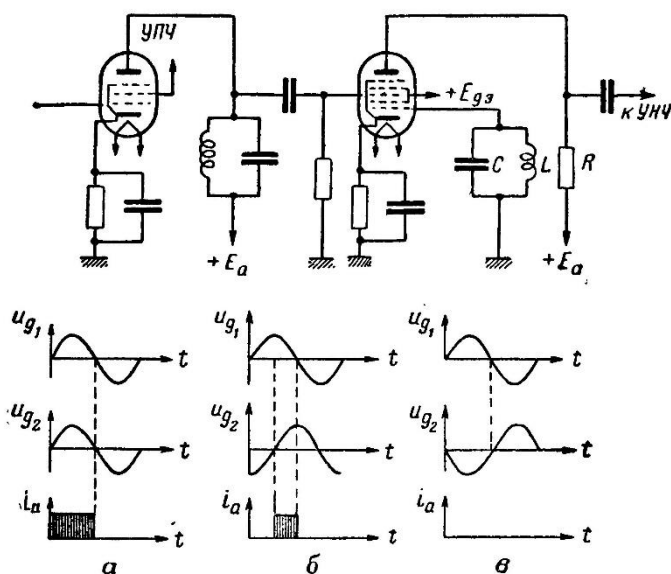


Рис. 108. Схема и процессы работы фазового детектора

Средней частоте  $f_0$  соответствует сдвиг в  $90^\circ$  (рис. 108, б) и средняя длительность импульса; пониженной частоте – сдвиг, приближающийся к  $0$  (рис. 108, а) и наибольшая длительность импульса; повышенной частоте – сдвиг, близкий к  $180^\circ$ , и прекращение анодного тока. Но с изменением длительности импульсов изменяется и средний ток анода, и напряжение на нагрузочном сопротивлении  $R$ . Значит, расхождение фаз изменяет величину постоянного выходного напряжения. Если сигнал модулирован по частоте напряжением от микрофона (НЧ), то модулирующее напряжение воспроизводится на выходе детектора.

Характеристика фазового детектора, т. е. зависимость среднего анодного тока от сдвига фаз двух переменных дана на рис. 109. Ее крутизна зависит от добротности контура  $LC$ .

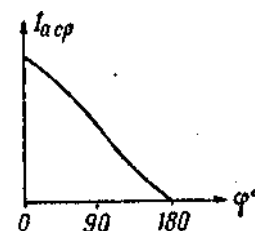


Рис. 109. Характеристика фазового детектора

### § 10.3. Видеоусилители

Видеоусилитель приемной системы РЛС предназначен для усиления протектированного сигнала (видеоимпульса) до уровня, достаточного для нормальной работы индикаторных устройств. Кроме того, видеоусилитель согласует выход приемника со входом индикаторного устройства. В качестве видеоусилителя используется резистивный усилитель низкой частоты. Резистивный усилитель – это усилитель, у которого в качестве внутренней и внешней нагрузок используются резисторы.

Усиление видеоимпульсов имеет свои особенности. Каскады усиления импульсов, включенные после детектора – это каскады на сопротивлениях. Первая особенность их работы состоит в том, что напряжение импульсов на выходе (по отношению к катоду) оказывается обратным по знаку в сравнении с напряжением импульсов на входе. Вспомним, что с повышением напряжения на сетке возрастает ток анода и падает напряжение на аноде. Следовательно, для получения на выходе импульсов прежнего знака необходимо иметь в усилителе четное число каскадов. На рис. 110 дана схема одного каскада усиления видеоимпульсов.

Вторая особенность усилителей импульсов относится к их частотным характеристикам: чем меньше длительность импульса  $\tau$ , тем шире должна быть полоса равномерно усиливаемых частот.

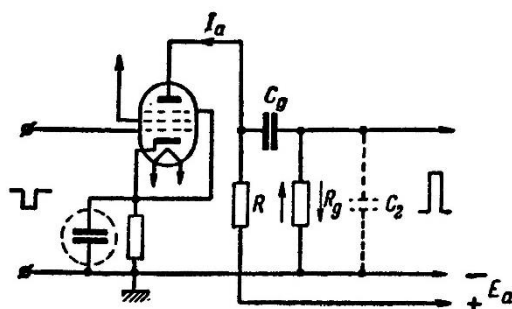


Рис. 110. Принципиальная схема 1-го каскада видеосуилителя

Для неискаженного усиления видеоимпульсов видеосуилитель должен иметь достаточно широкую полосу пропускания. Полоса пропускания видеосуилителя определяется как разность его верхней  $f_{\max}$  и нижней  $f_{\min}$  граничных частот.

Для получения достаточно широкой полосы пропускания необходимо добиться минимального значения постоянной времени цепочки, образованной сопротивлением анодной нагрузки  $R_a$ , выходной емкостью лампы  $C_1$ , входной емкостью следующего каскада  $C$ . Этим ограничивается возможность увеличения анодной нагрузки  $R_a$ , что приводит к снижению коэффициента усиления каскада и «завалу» АЧХ усилителя на высоких частотах. На низких частотах коэффициент усиления также снижается из-за увеличения сопротивлений конденсаторов переменному току.

Для того чтобы устранить искажение усиливаемого сигнала применяют частотную коррекцию. На высоких частотах в анодную цепь лампы включают катушку индуктивности. С ростом частоты индуктивное сопротивление увеличивается, следовательно, возрастает амплитуда выходного сигнала. На низких частотах в анодную цепь добавляют сопротивление  $R_2$ , шунтированное конденсатором  $C_1$ . На высоких частотах емкостное сопротивление  $1/(\omega C_1)$  мало, часть анодной нагрузки замыкается на корпус. С уменьшением частоты шунтирующее действие  $C_1$  уменьшается, сопротивление анодной нагрузки возрастает, и коэффициент усиления каскада увеличивается. Таким образом, используя цепи коррекции, можно расширить полосу пропускания с  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ .

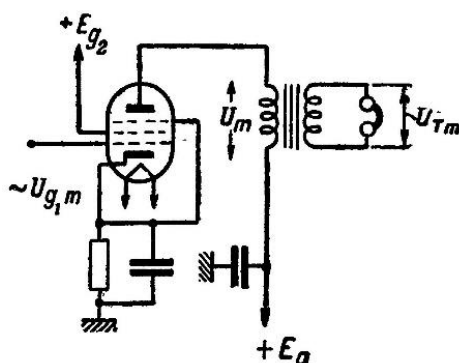


Рис. 111. Принципиальная схема выходного каскада видеосуилителя

Выходной каскад широкополосного усиления, с которого импульсы воздействуют на электронно-лучевой прибор (индикатор кругового обзора), обычно выполняется по схеме с трансформаторной нагрузкой на выходе (рис. 111).

В этой схеме при воздействии на сетку, например, положительного импульса напряжения возрастают анодный ток, а следовательно, и падение напряжения на сопротивлении нагрузки. Значит, на выходе получается импульс *того же знака*, что и на входе.

## Раздел 11. Индикаторные устройства РЛС

### § 11.1. Назначение и состав индикаторных устройств

Индикаторным устройством называется радиотехническая аппаратура, позволяющая по визуальному наблюдению показаний приборов определять наличие и положение цели в пространстве. В РЛС индикаторные устройства предназначены для определения текущих координат цели: наклонной дальности, азимута и угла места цели.

В состав индикаторных устройств РЛС, работающих в импульсном режиме, входят:

- индикатор, представляющий собой электроннолучевую трубку;
- дополнительные вспомогательные элементы, обеспечивающие возможность выбора цели и определения расстояния до нее, а также создающие в требуемые моменты времени соответствующую интенсивность свечения изображения цели на экране;
- источники питания индикаторного устройства и управления им.

Взаимодействие основных частей индикаторного устройства между собой (рис. 112) будет состоять в следующем.

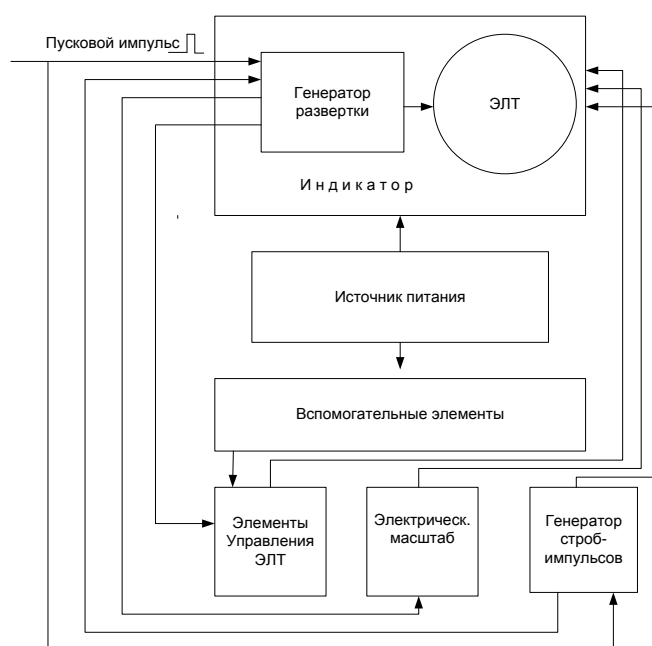


Рис. 112. Структурная схема индикаторного устройства

Пусковой импульс, начало которого совпадает с началом излучения в пространство электромагнитных колебаний, воздействует на генератор развертки и запускает его. Генератор развертки с приходом пускового импульса начинает вырабатывать в течение определенного времени развертывающее напряжение, под воздействием которого электронный пучок начинает перемещаться по экрану. Это перемещение называют «прямым ходом луча».

В элементах управления электроннолучевой трубкой, которые управляют фокусировкой, яркостью, положением начала движения электронного пучка и подсветкой, запускается генератор подсветки. Длительность подсветки должна строго соответствовать необходимой длительности прямого хода луча. Одновременно с началом движения электронного луча запускается генератор масштабных меток. Он создает на экране ряд видимых, расположенных строго на одном расстоянии яркостных или амплитудных меток, называемых масштабными.

При помощи масштабных меток можно грубо определять дальность до цели. Генератор строб-импульсов создает под воздействием пускового импульса селекторный импульс. Селекторные импульсы используются в целях подсвечивания электроннолучевой трубки в

определенном участке развертки. Все части индикаторного устройства приводятся в действие пусковым импульсом, приходящим в момент начала излучения электромагнитных колебаний. Источник питания индикаторного устройства обеспечивает необходимое для работы всех частей напряжение.

Индикаторные устройства с точки зрения метода индикации отраженных сигналов разделяются на две основные группы:

- индикаторы с амплитудной отметкой или модуляцией отклонения;
- индикаторы с яркостной отметкой или модуляцией по интенсивности.

На поверхности экрана электроннолучевой трубки электронный луч вычерчивает развертку. Разверткой называется светящаяся линия на экране ЭЛТ, прочерчиваемая электронным пучком под воздействием электрического или магнитного поля.

Различают две системы разверток: по дальности и по направлению. Наиболее распространенными развертками являются прямолинейные, круговые, радиально-круговые, строчные и спиральные.

1. *Прямолинейная развертка* (рис. 113) представляет собой прямую светящуюся линию, идущую от одного края экрана к другому. Такая развертка создается при помощи пилообразного напряжения, приложенного к отклоняющим пластинам электроннолучевой трубки.

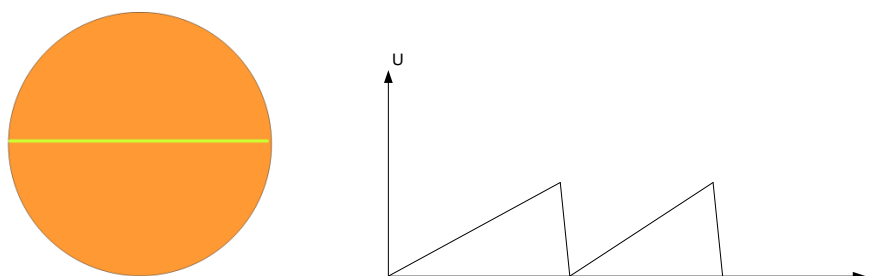


Рис. 113. Вид экрана индикаторного устройства с прямолинейной разверткой. Эюра пилообразного напряжения

2. *Круговая развертка* (рис. 114) представляет собой светящуюся линию окружности, прочерчиваемую на экране ЭЛТ, движущимся по кругу электронным лучом. Такая развертка образуется при помощи двух одинаковой амплитуды синусоидальных напряжений, имеющих между собой сдвиг по фазе на  $90^\circ$  и соответственно приложенных к горизонтальным и вертикальным отклоняющим пластинам.

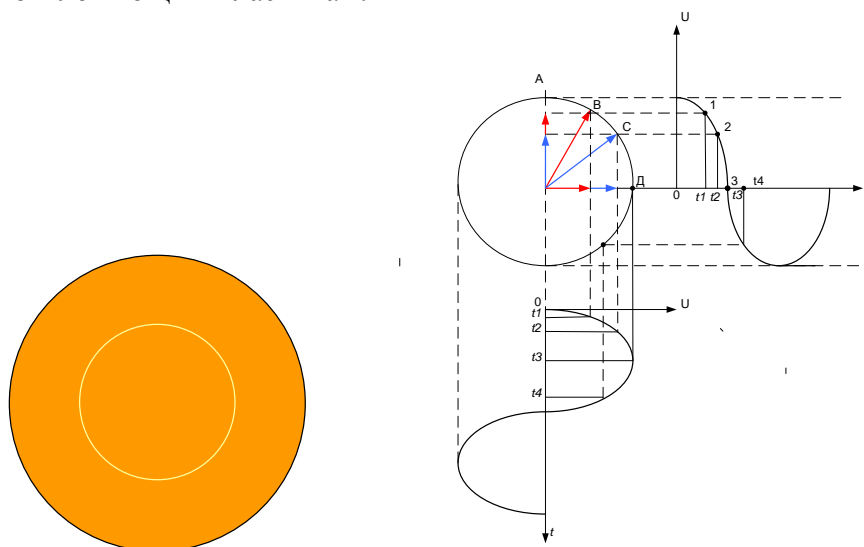


Рис. 114. Вид экрана индикатора с круговой разверткой. Эюра напряжений

3. *Радиально круговая развертка*, РКР (рис. 115) представляет собой прямолинейную развертку от центра до края экрана ЭЛТ и вращающуюся по кругу. Формирование РКР обеспечивается подачей на отклоняющие катушки линейно нарастающего напряжения, которое создаёт линейно изменяющийся во времени магнитный поток. Причём начало движения луча совпадает во времени с излучением импульса передатчика в пространство, а время движения к краю соответствует максимальному времени задержки прихода отражённых сигналов (эхо-сигналов) от целей на выбранном масштабе дальности.

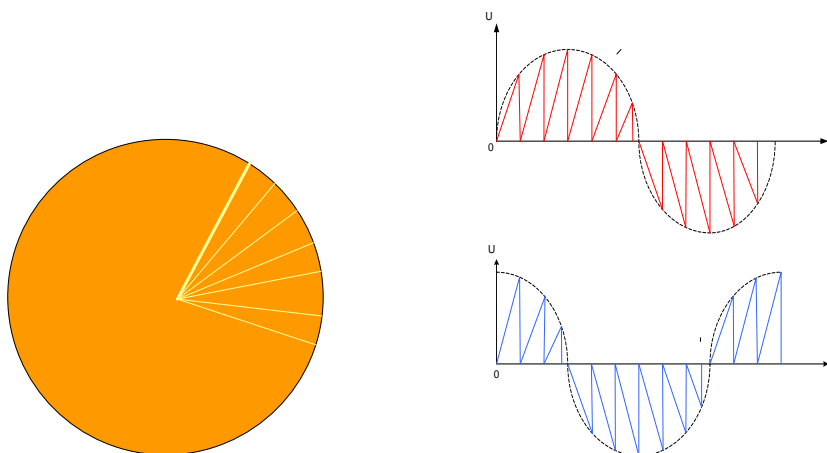


Рис. 115. Радиально-круговая развертка. Эюры напряжений

При вращении антенны РЛС в горизонтальной плоскости линия развёртки луча меняет своё направление синхронно и синфазно вращению антенны. Поэтому в любой момент времени направление развёртки на экране индикатора соответствует направлению электрической оси антенны в горизонтальной плоскости.

В электронно-лучевой трубке с электростатическим управлением при неподвижной отклоняющей системе РКР образуется двумя пилообразными токами, сдвинутыми по фазе на угол  $90^\circ$  и при условии, что огибающая амплитуд пилообразных токов меняется по синусоидальному закону.

4. *Строчная развертка* (рис. 116) представляет собой ряд последовательных светящихся линий, прочерчиваемых электронным пучком на экране электроннолучевой трубки в виде строк, идущих снизу-вверх и медленно справа налево.

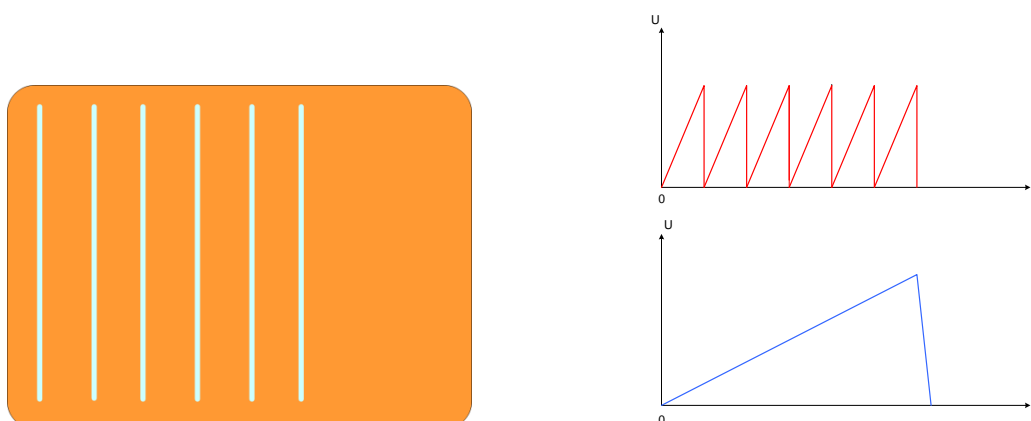


Рис. 116. Строчная развертка. Эюры напряжений

Такая развертка создается пилообразным напряжением строк, а движение ее по горизонтали осуществляется за счет пилообразного напряжения кадра.

5. *Спиральная развертка* (рис. 117) представляет собой светящуюся спираль Архимеда, прочерчиваемую лучом на экране ЭЛТ. Спираль получается, если питать отклоняющие пластины ЭЛТ изменяющимся по амплитуде переменным напряжением.

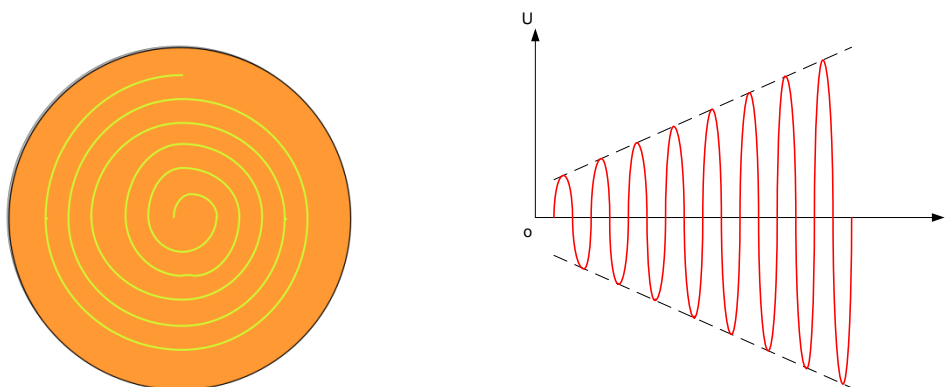


Рис. 117. Спиральная развертка. Эюра напряжения

В индикаторных устройствах РЛС 1РЛ33М применяются два вида разверток. В индикаторе поиска – радиально-круговая развертка, а в индикаторе дальности – линейная.

### § 11.2. Устройство индикатора дальности

Индикаторы с прямолинейной (линейной) разверткой, являющиеся однокоординатными и двухкоординатными индикаторами как с амплитудной, так и с яркостной отметкой, находят универсальное применение в радиолокационной технике. При однокоординатной индикации индикаторы с прямолинейной разверткой могут быть использованы для определения только дальности до цели, а при двухкоординатной индикации и для определения угловых координат. В радиолокационных станциях 1РЛ33 используются для поиска целей индикаторы однокоординатной индикации (рис. 118).

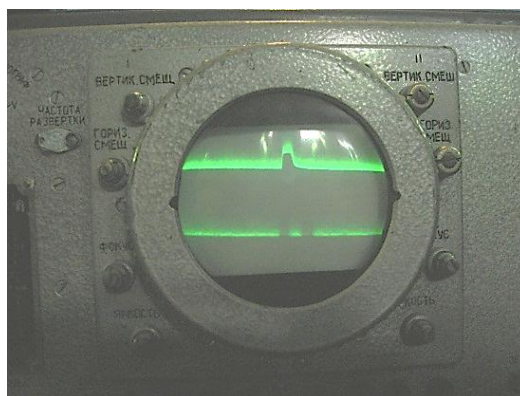


Рис. 118. Индикатор дальности с линейной разверткой

Линейная развертка, в виде прямой линии, развертывающаяся с постоянной скоростью слева – направо, располагается вдоль диаметра экрана. Выбросы электронного пучка вверх (вниз) имеют место в те моменты времени, когда на отклоняющую систему электроннолучевой трубки воздействует напряжение поступающего отраженного сигнала. В этом случае движущийся по экрану электронный пучок отклоняется в сторону от начального направления и вновь возвращается на прежнее направление, как только действие напряжения отраженного сигнала прекращается.

Функциональная схема индикатора дальности с линейной разверткой изображена на рис. 119. В данном индикаторе применена ЭЛТ с электростатическим управлением.



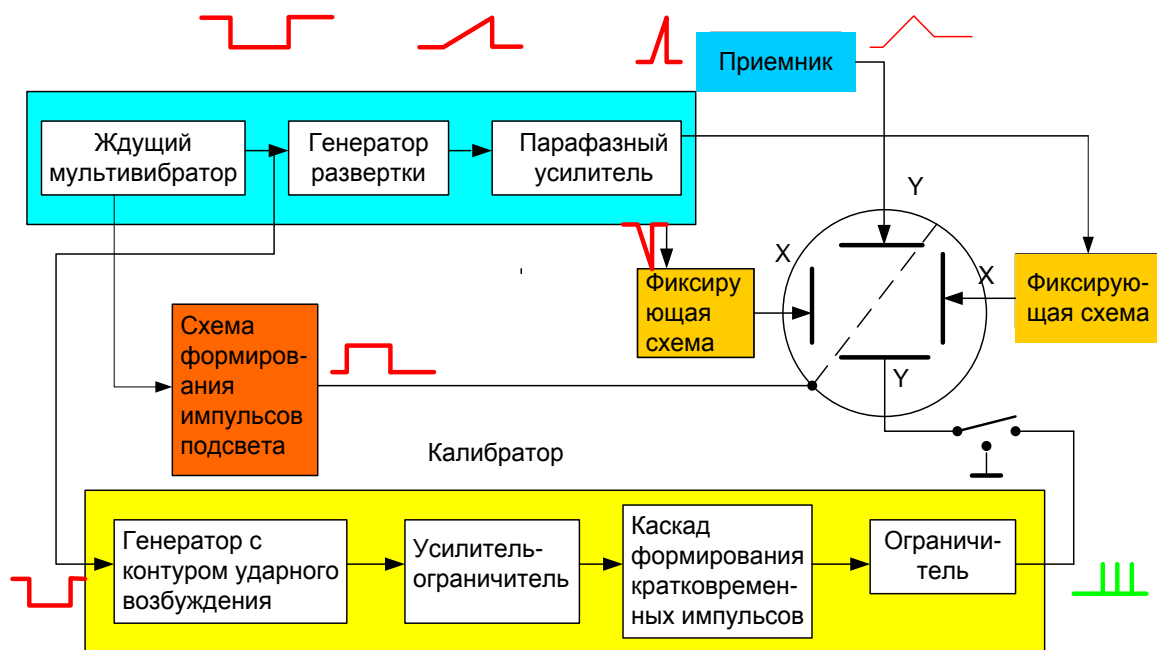


Рис. 119. Структурная схема индикатора дальности

Он состоит:

- канал развертывания дальности: ждущий мультивибратор, генератор развертки, парафазный усилитель;
- приёмник;
- две фиксирующие схемы;
- ЭЛТ;
- схема формирования импульса;
- калибратор: генератор с контуром ударного возбуждения, усилитель-ограничитель, каскад формирования кратковременных импульсов, ограничитель.

Индикатор синхронизируется от передатчика. Пусковые импульсы передатчика синхронизируют работу канала развертки дальности, канала формирования масштабных импульсов и схемы формирования импульсов подсвета. Эпюры напряжений на выходе отдельных блоков индикатора показаны непосредственно на схеме. Одновременно с излучением каждого прямоугольного импульса в пространство на ждущий мультивибратор поступает кратковременный пусковой импульс.

Под действием пускового импульса ждущий мультивибратор генерирует отрицательный прямоугольный импульс, длительность которого соответствует максимальной дальности действия станции и определяет длительность прямого хода луча развертки индикатора. Этот импульс поступает на вход генератора пилообразного напряжения развертки, выходное напряжение которого усиливается парафазным усилителем.

Выходным напряжением парафазного усилителя являются два пилообразных напряжения противоположных полярностей, используемых для создания так называемой «симметричной» линейной развертки на экране ЭЛТ. При симметричной развертке луч более равномерно фокусируется вдоль линии развертки, благодаря чему повышается разрешающая способность индикатора.

В индикаторе предусмотрено диодное фиксирование развертывающих напряжений. Фиксирование обеспечивает постоянство положения начала линейной развертки на экране индикатора при переключении диапазонов и при случайных изменениях амплитуды напряжения развертки.

Положительный импульс, снимаемый с анода другой лампы ждущего мультивибратора, подается на схему формирования импульсов подсвета прямого хода развертки. Последняя формирует положительный импульс необходимой амплитуды, который отпирает трубку только на время прямого хода развертки.

Канал формирования масштабных импульсов дальности собран по схеме калибратора с контуром ударного возбуждения и запускается отрицательным прямоугольным импульсом, поступающим от ждущего мультивибратора канала развертки. Выходное напряжение калибратора представляет собой серию кратковременных масштабных импульсов, следующих через равные промежутки времени. Длительность серии импульсов определяется длительностью входного отрицательного импульса.

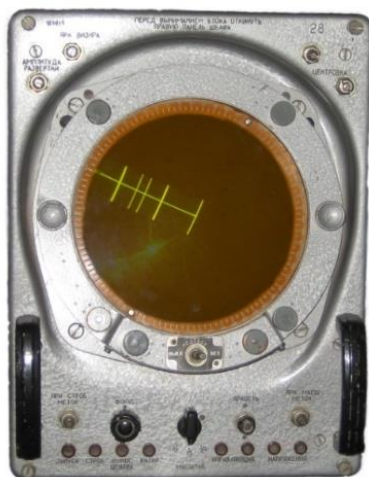
### **§ 11.3. Устройство индикатора кругового обзора**

Индикатор кругового обзора (ИКО) дает возможность:

- 1) получать полную картину воздушной обстановки в радиусе действия РЛС;
- 2) одновременно определять две координаты любой из обнаруженных целей – наклонную дальность  $D$  и азимут  $\beta$ , в сферической системе координат. Для одновременного наблюдения всех целей, находящихся под различными азимутами, применяют трубки, имеющие экран с большой длительностью послесвечения, приблизительно равной времени одного оборота антенны.

В ИКО электронный луч от центра экрана к его краю образует радиально-круговую развертку (РКР). При вращении антенны РЛС в горизонтальной плоскости линия РКР меняет свое положение на экране синхронно с вращением антенны. В любой момент направление основного визира РКР на экране индикатора соответствует направлению электрической оси антенны в горизонтальной плоскости.

В радиолокационных станциях 1РЛ33 (ЗСУ «Шилка») и 1РЛ35 (ЗАК С-60) для поиска целей установлены индикаторы кругового обзора, в которых используются ЭЛТ с магнитным управлением, имеющих неподвижную отклоняющую систему (рис. 120).



*Рис. 120. Индикатор кругового обзора РЛС 1РЛ33М*

Рассмотрим работу такого индикатора по упрощённой структурной схеме (рис. 121). Одновременно с излучением каждого зондирующего импульса передающим устройством производится запуск тракта формирования развёртки дальности. Импульс запуска поступает на схему расширения в обычном режиме и через схему задержки в кольцевом режиме.

Схема расширения под действием импульса запуска вырабатывает прямоугольный импульс, длительность которого определяется максимальной задержкой эхо-сигнала от наиболее удалённых целей выбранного масштаба дальности (рис. 122).

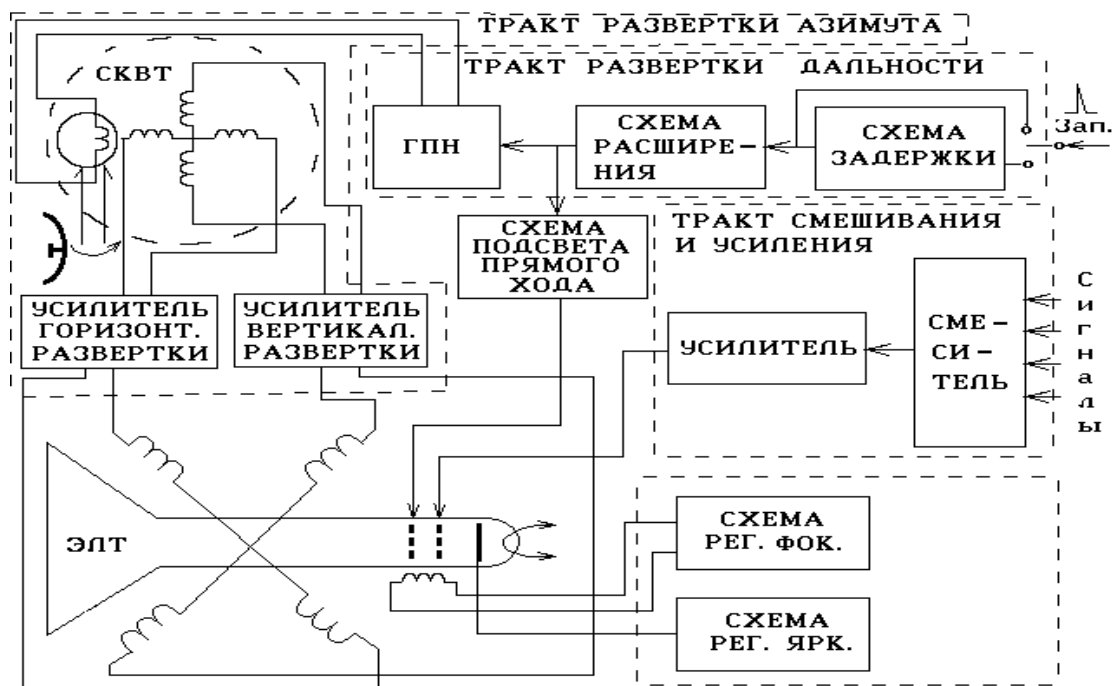


Рис. 121. Схема индикатора кругового обзора с неподвижной отклоняющей системой

Импульс с выхода схемы расширения воздействует на генератор пилообразного напряжения (ГПН), который вырабатывает импульс пилообразной формы. Нарастание напряжения в ГПН начинается не с нуля, а с некоторого напряжения  $U_{\text{п}}$ , называемого пьедесталом и необходимого для компенсации реактивной составляющей индуктивности в тракте формирования развёртки азимута. Длительность линейного участка (прямого хода) определяется длительностью импульса со схемы расширения, а длительность обратного хода определяется временем восстановления ГПН и системой отклонения трубки.

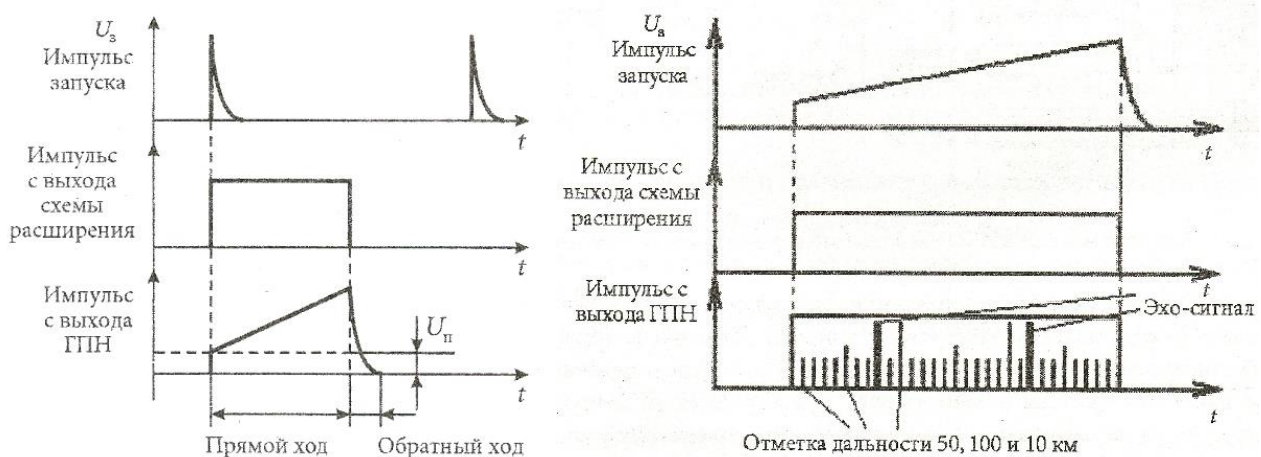


Рис. 122. Эпюры напряжений

Далее сигнал с выхода ГПН поступает на роторную обмотку синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ), которая механически связана с антенной РЛС и вращается с ней синхронно и синфазно. Со статорных обмоток СКВТ, которые расположены перпендикулярно друг другу, снимаются два пилообразных напряжения, промодулированных по закону «sin» и «cos» с частотой вращения антенны.

После усиления в усилителях горизонтальной и вертикальной развёрток эти напряжения поступают на соответствующие отклоняющие катушки.

Таким образом, луч на экране ЭЛТ отклоняется от центра к краю и вращается синхронно и синфазно с антенной РЛС.

В тракты смешивания и усиления поступают эхо-сигналы, масштабные отметки дальности и азимута, отметки опознавания (рис. 123). После усиления эти сигналы поступают на второй анод трубки, обеспечивая её отпирание на период их длительности, а на первый анод трубки подаётся положительный импульс подсвета прямого хода со схемы расширения через схему подсвета прямого хода, обеспечивая отображение информации только во время прямого хода.

На экране индикатора кругового обзора РЛС дальнего обнаружения отметки дальности изображаются в виде концентрических окружностей (рис. 123). Для облегчения измерения координат 10, 50 и 100-километровые отметки имеют разную градацию яркости. Отметки азимута отображаются в виде радиальных линий, следующих через 10 градусов; 30-градусные отметки более яркие. Отметки от целей отображаются яркостными отметками в виде дужек. На расстоянии примерно 5 км позади отметки о цели располагается отметка опознавания.

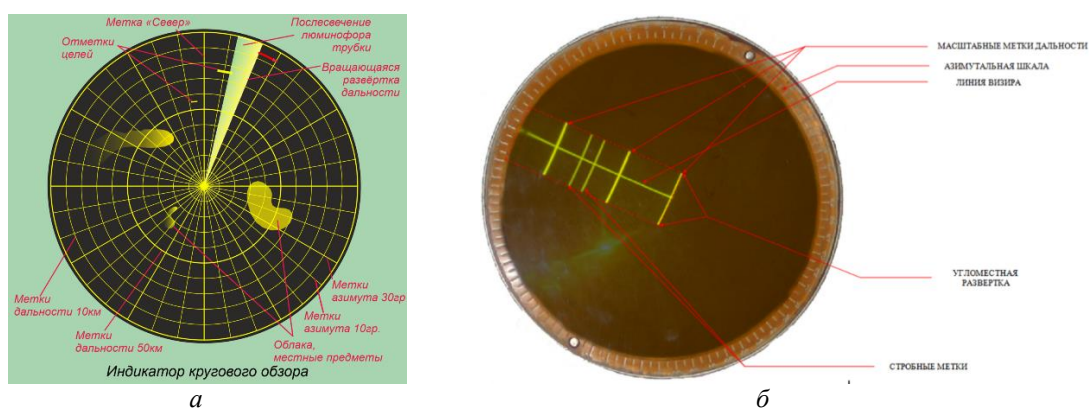


Рис. 123. Экран индикатора кругового обзора: а) РЛС дальнего обнаружения; б) РЛС ЗСУ «Шилка»

На экране индикатора кругового обзора РЛС ЗСУ «Шилка» отображается прямоугольный растр, который вращается синхронно с антенной. Растр имеет линейную развертку основного визира от центра к краю экрана. Перпендикулярно основному визирю расположены три масштабных метки через 5 км. Две стробных метки размещаются на основном визире для захвата цели в соответствии с ее удалением.

## Глава 3. Основы РЭБ в войсковой ПВО

### Раздел 1. Основы электронной защиты радиоэлектронных средств от помех

#### § 1.1. Радиоэлектронная борьба и ее составные части

Теория РЭБ – система научно обоснованных знаний о содержании, возможностях и закономерностях организации и осуществления противоборства сторон в области применения РЭС в мирное и военное время. Она определяет содержание и место РЭБ в общем процессе вооруженной борьбы, ее цели и задачи в бою (в том числе ПВО), роль и задачи РЭБ в повседневной деятельности войск.

**РЭБ** – совокупность согласованных по целям, задачам, месту и времени мероприятий и действий войск, по выявлению системы и средств управления войсками и оружием противника, их радиоэлектронному подавлению, а также по радиоэлектронной защите своих систем и средств управления войсками и противодействию техническим средствам разведки противника.

Составные части РЭБ:

- РЭП (радиоэлектронное подавление);
- РЭЗ (радиоэлектронная защита);
- ПдТСП (противодействие техническим средствам разведки).

**РЭБ** – вид боевого обеспечения боевых действий. Мероприятие по РЭБ проводится в тесном взаимодействии с действиями других родов войск и специальных войск и с мероприятиями других видов обеспечения (разведка, маскировка и т. п.).

**РЭП** – осуществляется воздействием на системы и средства управления войсками и оружием, а также на средства разведки противника специальными радиоэлектронными излучениями (помехами); уводом самонаводящегося на излучение и управляемых средств поражения от прикрываемых объектов; передачей дезинформирующих сигналов, а также изменением условий распространения электромагнитных волн и радиолокационной контрастности местности.

В соответствии со спецификой физических процессов РЭП условно делится на:

- радиоподавление;
- оптико-электронное подавление;
- гидроакустическое подавление.

Для решения задач РЭП используются средства создания помех: космические, воздушные, наземные, кроме того, применяются дымы, аэрозоли, инфракрасные прожекторы, лазеры, угловые отражатели и пиротехнические устройства, состоящие на вооружении общевойсковых частей, а также частей и подразделений РХБЗ и инженерных войск.

**РЭЗ** – комплекс организационных и технических мероприятий, направленный на обеспечение устойчивой работы систем и средств управления своими войсками и оружием в условиях ведения противником РЭБ, а также на исключение взаимного влияния своих РЭС.

РЭЗ включает:

- защиту РЭС от поражения самонаводящимся на излучение оружием;
- защита от РЭП;
- защита от воздействия ионизирующих и электромагнитных излучений ядерного и других видов оружия;
- обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) своих войск.

РЭЗ осуществляется в тесном взаимодействии с огневым поражением, РЭП и противодействием техническим средствам разведки.

*Противодействие техническим средствам разведки противника (ПдТСП)* – совокупность организационных и технических мероприятий, направленных на исключение или суще-

ственное затруднение добывания противником охраняемых сведений о войсках и их деятельности, вооружении, военной технике и военных объектах.

ПдТСР состоит:

- из радиоэлектронного подавления ТСР и каналов передачи разведывательной информации;
- защиты охраняемых параметров вооружения, техники и объектов;
- специальной защиты технических средств обработки и передачи информации;
- выявление технических каналов утечки информации и их устранения.

Мероприятия ПдТСР в ходе боевых действий проводятся в сочетании с огневым поражением и захватом (выводом из строя) ТСР и проведением мероприятий по тактической маскировке.

### **§ 1.2. Помехи радиоэлектронным средствам и их классификация**

**Радиоэлектронные помехи** – это не поражающие электромагнитные и акустические излучения, которые ухудшают качество функционирования РЭС, управляющего оружия и военной техники или систем обработки информации. Воздействуя на приемные устройства, помехи имитируют или искажают наблюдаемые сигналы, затрудняют или исключают выделение полезной информации, ведение радиопереговоров и обнаружение целей с помощью РЭС.

Так как РЭС используют различные виды сигналов, работают в различных диапазонах частот, то применяют специальные виды помех, предназначенные для подавления радиолокации, радионавигации, радиосвязи, лазерной, инфракрасной техники и т. д., кроме того, они могут использоваться комбинированно. Радиоэлектронные помехи классифицируют по различным признакам.

**По происхождению** различают естественные и искусственные помехи.

*Естественными* являются помехи природного происхождения:

- атмосферные (грозовые разряды);
- космические (излучение солнца);
- спорадические (нерегулярные) электромагнитные излучения околоземного пространства, вызванные потоками заряженных частиц в ионосфере и магнитосфере;
- радиоизлучение полярных сияний и радиационных поясов Земли;
- отражение от метеорологических образований (дождь, снег, облака и т. д.), земной и водной поверхности;
- акустические шумы океанов, морей и др.).

*Искусственные помехи* создаются устройствами, излучающими энергию электромагнитных (акустических) колебаний или отражателями, рассеивающих энергию падающих на них волн. В зависимости от источника образования эти помехи бывают непреднамеренными (посторонними передатчиками РЭС, установками электрооборудования и др.) и преднамеренными, созданными специально для подавления РЭС.

*Преднамеренные помехи* по виду используемых излучений делятся на электромагнитные и акустические. И те, и другие ухудшают качество функционирования РЭС, работающих на принципе приема, усиления и преобразования энергии эл. магнитных (акустических) волн. Помехи, создаваемые в диапазоне радиоволн, называют радиопомехами; в диапазоне световых (оптических) волн световыми (оптико-электронными) помехами.

**По способу формирования** (реализации) искусственные помехи подразделяются:

1. Активные, генерируемые специальными передатчиками помех.
2. Пассивные, образуемые в результате рассеяния (отражения) различными объектами волн, излучаемых РЭС.

**По эффекту (характеру) воздействия на РЭС** различают маскирующие и имитирующие помехи.

*Имитирующие (дезинформирующие) помехи* – это сигналы, излучаемые станцией помех для внесения ложной информации в подавляемые средства. По структуре они близки к полезным сигналам и поэтому в приемниках РЭС создают отметки ложных целей, снижают пропускную способность приёмной системы, вводят в заблуждение операторов, приводят к потере полезной информации. В РЛС срывают автоматическое сопровождение целей по направлению, дальности, скорости и перенацеливают на имитированные цели, или вызывают ошибки сопровождения цели.

*Маскирующие помехи* ухудшают характеристики приемного устройства РЭС, что увеличивает количество принятых сигналов, которые снижают информативность сообщения; создают фон, который затрудняет или полностью исключает обнаружение, распознавание, выделение полезных сигналов (целей). С увеличением мощности передатчика помех их маскирующее действие возрастает.

В зависимости от способа наведения помех, соотношение ширины спектров помех и полезных сигналов маскирующие помехи подразделяют на заградительные и прицельные.

*Заградительные помехи* имеют ширину спектра частот значительно превышающую полосу, занимаемую полезным сигналом, что позволяет подавлять одновременно несколько РЭС без точного наведения передатчика помех по частоте. Их можно создавать, не имея полных данных о параметрах сигналов, подавляемых РЭС. Особенностью заградительных помех является то, что при неизменной мощности передатчика помех (ПП) их спектральная плотность мощности уменьшается по мере расширения спектра излучения.

*Прицельные помехи* имеют ширину спектра соизмеримую (равную или в 1,5–2 раза превышающую) с шириной спектра сигнала, подавляемого РЭС. Эффективность их воздействия зависит от точности совмещения по частоте; от спектральной плотности мощности и способов обработки сигналов в приемнике РЭС. Так как РЭС имеют возможность быстро перестраиваться по частоте, то в составе станции прицельных помех применяется аппаратура обнаружения сигналов, перестройки и наведения по частоте передатчика в широком диапазоне волн.

Прицельные помехи характеризуют высокой спектральной плотностью мощности. Поскольку они излучаются в узкой полосе частот, то могут быть реализованы маломощным ПП. Недостаток их применения в том, что они могут воздействовать только на РЭС, работающие в данном диапазоне волн.

**По временной структуре излучения** помехи подразделяются на непрерывные и импульсные.

*Непрерывные помехи* представляют собой непрерывные электромагнитные излучения, модулированные по амплитуде, частоте или фазе.

*Импульсные помехи* имеют вид как модулированных, так и немодулированных радиоимпульсов.

В зависимости от интенсивности воздействия на РЭС маскирующие помехи подразделяются на слабые, средние, сильные.

Особое внимание необходимо уделить активным помехам. Они бывают немодулированные и модулированные.

Немодулированные помехи создаются непрерывными гармоническими колебаниями, излучаемых на частоте подавляемого РЭС или в требуемом диапазоне частот.

Модулированные помехи создаются изменением одного или нескольких параметров несущего колебания ПП. Могут иметь вид (а) непрерывных или (б) импульсных электромагнитных колебаний.

*Непрерывные помехи* представляют собой колебания, модулированные по амплитуде, частоте (фазе) или одновременно по амплитуде и частоте (фазе). В соответствии с видом модуляции различают:

- амплитудно-модулированные (АМ)
- частотно-модулированные (ЧМ)
- амплитудно-частотно-модулированные (АЧМ);

В качестве модулирующего напряжения может использоваться и напряжение шума – шумовые помехи.

*Импульсные помехи* представляют собой серию немодулированных или модулированных высокочастотных импульсов. Модуляцией по амплитуде, частоте следования, длительности или нескольких этих параметров повышает эффективность их воздействия на РЛС. Тем более можно подобрать амплитуду и длительность сигнала помехи таким образом, что отличить от истинного сигнала будет невозможно. Еще одной особенностью является то, что при средней мощности передатчика помех можно достичь высокой импульсной мощностью помехи, за счет того, что излучение энергии кратковременное.

Импульсные помехи (ИП) различаются как:

- синхронные, у которых частота следования импульсов равна или кратна частоте следования импульсов подавляемого средства;
- несинхронные, когда частота следования импульсов помех и импульсов подавляемого средства не совпадают.

### § 1.3. Воздействие помех на РЛС

Рассмотрим подробнее воздействие различного вида помех на индикаторы радиолокационных станций.

*Активные помехи.* Активные помехи могут быть различных видов: импульсные, непрерывные немодулированные и модулированные синусоидальным напряжением или беспорядочно изменяющимся напряжением (шумами). Различные виды активных помех имеют свои характерные особенности в воздействии на приемник, индикаторы и другие устройства радиолокационной станции.

*Импульсная помеха.* Генераторы импульсных помех вырабатывают импульсы с частотой повторения равной или кратной частоте повторения импульсов подавляемой РЛС. Если частота повторения импульсов помех не совпадает с частотой повторения РЛС, то такие помехи называют *несинхронными*. Если совпадают – *синхронными*. Вид экрана ИКО при действии таких помех изображен на рис. 124. На экране импульсные помехи создают характерные яркие полосы. *Несинхронные помехи* – в виде спиральных полос, *синхронные* – полосы в закрашенных секторах.

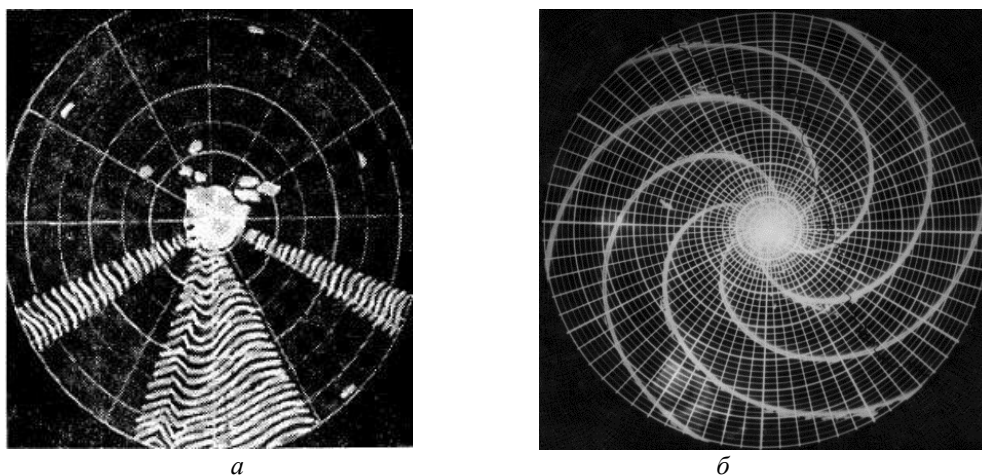


Рис. 124. Вид экрана ИКО при действии импульсной помехи:  
а) синхронной; б) несинхронной

На индикаторе дальности расстояние между импульсами помех одинаковое, и они быстро перемещаются по развертке (рис. 125). Это дает возможность без особого труда визуально обнаружить сигнал среди импульсных помех.



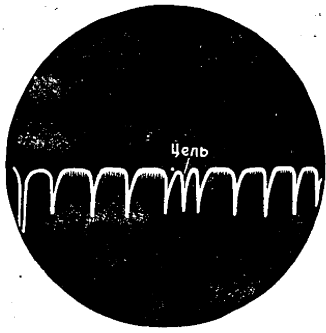


Рис. 125. Вид экрана индикатора дальности РЛС при действии импульсной помехи

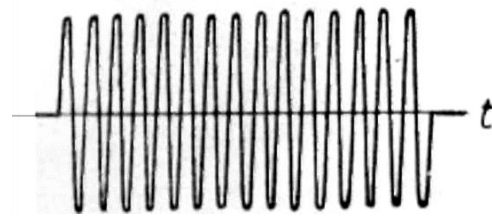


Рис. 126. Немодулированная помеха

*Немодулированная помеха.* Источник немодулированной помехи создает на входе приемника синусоидальное напряжение высокой частоты, амплитуда и частота которого не изменяются (немодулированные) (рис. 126).

Эффективность воздействия немодулированной помехи на приемник и индикаторы зависит от ее мощности и от того, насколько близка частота помехи к частоте полезного сигнала, на которую настроен приемник. Если частота помехи близка к частоте сигнала и помеха имеет достаточную мощность, то она может вызвать перегрузку окончных каскадов приемника.

Перегрузка усилителя происходит тогда, когда амплитуда напряжения на сетке превышает напряжение смещения. При этом в лампе протекает сеточный ток, который нагружает предыдущий каскад и тем самым уменьшает его усиление и вызывает заряд переходных конденсаторов, вследствие чего после окончания импульса лампы могут запереться. В результате сильной перегрузки получается ограничение сигнала, т. е. напряжение на выходе приемника перестает возрастать при увеличении напряжения на входе. Перегрузка в приемнике является основной причиной потери сигнала под воздействием помехи.

При одновременном воздействии сигнала и помехи напряжение на сетке лампы может либо возрасти, либо уменьшиться в зависимости от того, совпадают по фазе напряжения сигнала и помехи или находятся в противофазе. При увеличении сеточного напряжения анодный ток вследствие ограничения не увеличивается, при уменьшении же напряжения он уменьшается. В результате этого изменяется полярность импульсов на выходе приемника и импульсы целей на индикаторах дальности получают перевернутыми (рис. 127), а на индикаторе кругового обзора отметки целей исчезают.

Если помеха слабая, то перегрузка приемника получается незначительной и сопровождается уменьшением импульсов целей, пропаданием шумов на индикаторе дальности и уменьшением яркости отметок целей на индикаторе кругового обзора.

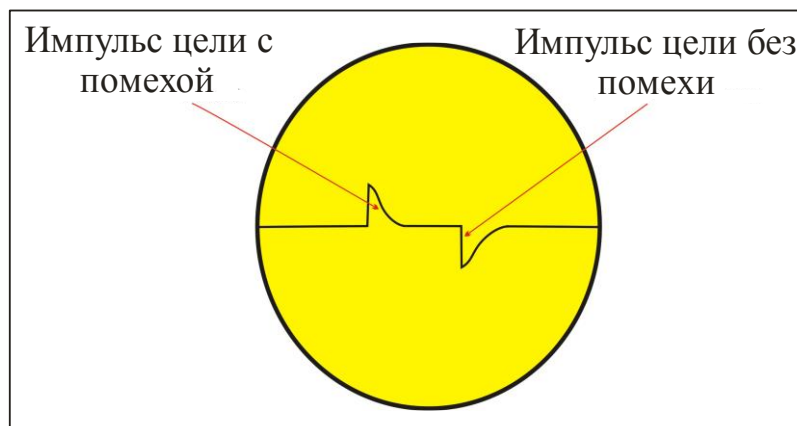


Рис. 127. Вид экрана индикатора дальности РЛС при наличии сильной немодулированной помехи

**Модулированная помеха.** Модулированная помеха создает на входе приемника непрерывное напряжение СВЧ, у которого изменяется амплитуда (амплитудно-модулированная помеха) (рис. 128) или частота (частотно-модулированная помеха) (рис. 129). Если такая помеха имеет достаточную мощность и ее частота близка к частоте сигнала, она вызывает перегрузку приемника подобно немодулированной помехе.

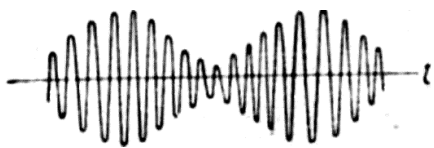


Рис. 128. Амплитудно-модулированная помеха

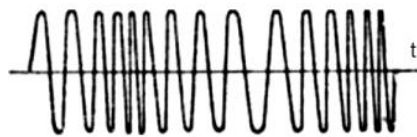


Рис. 129. Частотно-модулированная помеха

Амплитудно-модулированная помеха, напряжение которой изменяется по синусоидальному закону (рис. 128), вызывает искривление формы развертки, причем развертка непрерывно перемещается по экрану трубки (рис. 130). На индикаторе кругового обзора образуются засвеченные секторы неравномерной яркости (рис. 131).

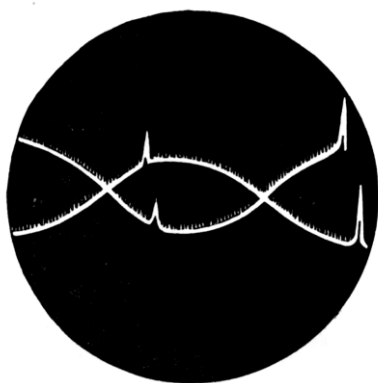


Рис. 130. Вид экрана индикатора дальности РЛС при амплитудно-модулированной помехе



Рис. 131. Вид экрана ИКО при действии амплитудно-модулированной (шумовой) помехи

**Шумовая помеха** получается, если амплитуду синусоидального напряжения СВЧ беспорядочно изменять, подобно изменению напряжению шумов. Для создания шумовой помехи обычно используется напряжение шумов, возникающее в лампе в результате неравномерного излучения электронов катодом. Это напряжение усиливается несколькими каскадами и используется для изменения амплитуды напряжения СВЧ.

На индикаторах дальности шумовая помеха создает изображение такого же вида, как и внутренние шумы приемника, только значительно более интенсивное (рис. 132).

*Частотно-модулированная помеха* применяется в том случае, если частота станции противника точно неизвестна (что обычно и бывает). Так как частота этой помехи непрерывно изменяется, в некоторые моменты времени возможно совпадение ее частоты с частотой сигнала. В результате этого на индикаторе дальности получают импульсы, перемещающиеся по развертке (рис. 133), а на ИКО — полосы, как при амплитудно-модулированной помехе (рис. 133).

Из всех рассмотренных видов активных помех труднее всего бороться с шумовыми помехами ввиду их беспорядочного характера и широкой полосы частот.

**Пассивные помехи.** Образуются вследствие воздействия на РЭС энергии электромагнитных (акустических) волн, рассеянных (отраженных) искусственными и естественными отражателями (объектами) или отражающими средами. Отражателем ЭМВ может быть любое тело с электрическими параметрами, отличными от параметров окружающей среды. В зависимости от источника образования различают естественные и искусственные пассивные помехи.

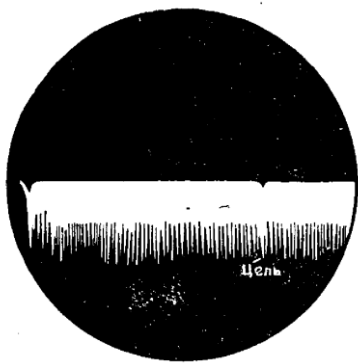


Рис. 132. Вид экрана индикатора дальности РЛС при действии шумовой помехи

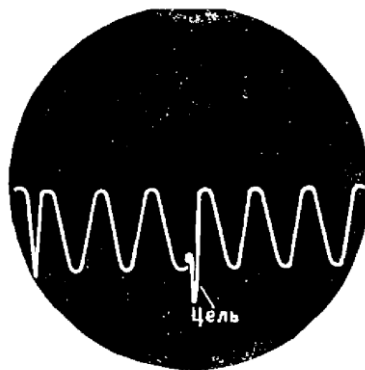


Рис. 133. Вид экрана индикатора дальности РЛС при действии частотно-модулированной помехи



Рис. 134. Вид экрана ИКО при действии пассивных помех

Искусственные пассивные помехи являются результатом рассеяния электромагнитных (акустических) волн дипольными, уголковыми и линзовыми отражателями, отражающими антенными решетками, ионизированными средами и аэрозольными образованиями. Энергия, рассеянная множеством близко расположенных друг к другу отражателей, может вызвать частичную или полную засветку экрана, имитировать или маскировать отметки целей (рис. 134).

## Раздел 2. Защита радиолокатора от помех

### § 2.1. Способы защиты РЭС от помех.

#### Понятие электромагнитной совместимости

Радиоэлектронная защита (РЭЗ) представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий по обеспечению устойчивой работы радиоэлектронных систем и средств управления войсками и оружием в условиях ведения противником РЭБ и взаимного влияния РЭС.

Она включает в себя:

- защиту РЭС от поражения самонаводящимся на излучение оружием,
- защиту от РЭП противника,
- защиту от воздействия ионизирующего и электромагнитных излучений ядерного и других видов оружия.

РЭЗ осуществляется в сочетании с огневым поражением, захватом (выводом из строя) сил и средств РЭБ противника, радиоэлектронным подавлением систем управления средствами разведки и РЭБ противника, а также с мероприятиями по противодействию его техническим средствам разведки.

Существующие способы защиты РЭС от ПРР можно разделить на активные и пассивные.

*Активные* – это уничтожение самолетов – носителей ПРР до пуска ПРР и уничтожение самих ракет на траектории полета.

*Пассивные* способы могут быть разделены на три группы:

1. Способы, реализующие смещения эквивалентного центра излучения в сторону от РЛС, применение:

- дополнительных (отвлекающих) передатчиков;
- активных переизлучателей;
- пассивных ретрансляторов и отражателей;
- нескольких синхронизированных РЛС.

2. Способы, уменьшающие информацию об излучении РЛС (во время их разведки и захвата ГСН за счет ухудшения селекции параметров излучения РЛС на борту самолета и ПРР):

- временная регламентация излучения РЭС;
- работа РЭС в режиме непрерывной перестройки несущей частоты;
- изменение частоты следования импульсов;
- малые мощности излучения;
- прерывистые режимы работы;
- пассивные средства обнаружения и сопровождения;
- РЛС, работающие в различных диапазонах частот в режиме «Мерцание»;
- применение помех на несущей частоте РЛС другими источниками излучения;
- применение передатчиков помех, маскирующих параметры излучения основной РЛС;
- выключение излучения РЛС на конечном участке траектории ПРР.

3. Способы, повышающие живучесть РЭС в целом:

- бронирование РЭС;
- инженерное оборудование позиций РЭС;
- использование естественных укрытий;
- организационно-тактические мероприятия (дублирование, резервирование РЭС, создание ложной радиоэлектронной обстановки и т. д.);
- специальная и психологическая подготовка расчетов.

При возрастающей плотности размещения радиоэлектронных средств в различных видах боя возникает проблема их электромагнитной совместимости.

**Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств (ЭМС РЭС)** – это способность технических средств одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных электромагнитных помех и не создавать недопустимых ЭМП другим техническим средствам.

При решении проблемы ЭМС РЭС приходится учитывать ряд проблем технического и тактического свойства:

Из-за особенностей распространения электромагнитных волн. Большинство РЭС работают в одном диапазоне. Кроме того, на вооружении, как правило, находятся однотипные РЛС, радиостанции и другие средства так же работающие в одном диапазоне волн.

Увеличение мощности передатчиков и чувствительности приемников, современных РЭС создает соответственно более мощную помеху соседям и принимает более мощный помеховый сигнал. При этом технически обоснованно, что в интересах ЭМС надо отдавать предпочтение повышению мощности передающих устройств, а не чувствительности приемных.

В немалой степени проблема ЭМС обусловлена возрастающей плотностью РЭС в войсках и неравномерным их распределением по фронту и глубине. При этом только в войсках ПВО общевойсковой армии может одновременно функционировать более 1000 РЭС, на удалении до 20 км от переднего края средняя плотность размещения РЭС достигает до 5 РЭС на км<sup>2</sup>, а в районе КП (ПУ) до 25 РЭС на км<sup>2</sup>. К этим средствам необходимо прибавить РЭС других видов и родов войск, которые также используют однодиапазонные средства радиосвязи, РЛС разведки, а части РЭБ создают помехи своим РЭС так же, как и чужим.

Учитывая технические проблемы, применяются следующие **способы обеспечения ЭМС РЭС**:

1. Введение ограничения на боевое применение РЭС ПВО и других средств, но без снижения эффективности, как средств ПВО, так и эффективности действий прикрываемых войск.

Данный способ достигается четким распределением усилий по времени, районам применения, рубежам или выполняемым задачам. Временные ограничения обычно вводятся, когда другими мерами ЭМС обеспечить не удастся, а уровень помех настолько высок, что приносит выполнению общей задачи больший ущерб, чем выключения мешающегося РЭС. Такие ограничения в первую очередь будут вводиться для средств РЭБ.

Для РЭС (особенно РЭБ) могут назначаться и районы (сектора) их применения; рубежи начала и окончания постановки помех или пуска ПРП (для авиации), кроме того, согласуются маршруты полета и расположения зон барражирования самолетов и вертолетов РЭБ. Так же могут назначаться районы, запрещенные для работы РЭС.

2. Основной путь обеспечения ЭМС состоит в *частотно-территориальном разноре*. Поскольку мощность или интенсивность непреднамеренных помех между РЭС главным образом зависит от расстояния между ними, а также от соотношения полос частот принимаемых и излучаемых ими сигналов.

В настоящее время разработан каталог норм частотно-территориального разноре, в котором указаны потенциально не совместимые РЭС и допустимые расстояния между ними, при соблюдении которых взаимные помехи между РЭС не превышают допустимых и не окажет существенного влияния на работоспособность РЭС.

В целом соблюдение рекомендованных боевым уставом войск ПВО нормативные показатели при построении боевых порядков обеспечивают соблюдение норм ЭМС. Но на практике могут возникать случаи, когда соблюдение этих норм может оказаться невозможным или нецелесообразным (условия местности, высокая плотность РЭС и т. д.).

В этих случаях помехой приходится пренебрегать или вводить ограничения технического состава:

- частотные, как правило, применяются для средств РЭБ (на этих частотах помеха ставится, а на других нет) и для средств связи (централизованно для каждой сети назначается основная и запасные частоты, работа на других частотах запрещена);
- пространственные, вводятся обычно для РЛС направленного действия путем назначения им рабочих секторов запрета.

Таким образом, изучение основ теории РЭБ позволяет разработать широкий арсенал способов обеспечения высокой надежности ПВО в условиях интенсивной РЭБ.

## **§ 2.2. Защита РЛС от помех**

Защита РЭС от преднамеренных радиопомех достигается проведением комплекса организационно тактических и технических мероприятий.

Технические мероприятия выполняются, как правило, боевыми расчетами на основе использования имеющихся в составе станций и комплексов аппаратуры защиты от помех. Они указаны в эксплуатационной документации и рассматриваются в ходе изучения материальной части.

Организационно-тактические мероприятия реализуются по следующим направлениям:

- комплексное использование РЭС различных частотных диапазонов работы;
- рациональное размещение РЭС в группировках войск, их умелое использование и организация взаимодействия;
- маскировка, резервирование РЭС, дезинформация противника;
- подготовка войск к ведению боевых действий в условиях РЭБ.

Комплексное использование РЭС различных принципов действия и частотных диапазонов предусматривает создание группировок, включающих РЭС:

- активных и пассивных комплексов;
- использующих импульсное и непрерывное излучение радиоволн, различные виды модуляции сигналов и методы передачи информации;
- с командным, активным, полуактивным способами наведения ракет ЗРК;
- радио, радиорелейных, тропосферных и спутниковых систем связи,
- многочастотных и перестраивающихся по частоте систем;
- работающих в различных участках радио и оптического диапазонов волн.

Рациональное размещение РЭС в группировках войск, их умелое использование в организации взаимодействия обеспечивается:

- рациональным выбором и инженерным оборудованием позиции РЭС;
- выполнением требований СУВ, установленных режимов работы РЭС и правил их эксплуатации;
- непрерывной оценкой складывающейся РЭ обстановки, на этой основе определения наиболее целесообразных способов боевого применения РЭС; своевременный маневр силами и средствами;
- сосредоточением усилий на первоочередном поражении носителей РЭБ; поиск и уничтожение забрасываемых передатчиков помех;
- рациональным назначением и маневром параметрами РЭС, оперативная смена рабочих частот в соответствии со складывающейся РЭО;
- введение временных, территориальных, пространственных, энергетических и частотных ограничений на работу РЭС;
- своевременным получением информации по каналам взаимодействия и организация совместных действий по выявлению и уничтожению воздушного противника.

Маскировка, резервирование РЭС, дезинформация противника о составе, размещении, способах боевого применения и ТТХ РЭС заключается:

- в соблюдении правил радио и радиотехнической маскировки, контроля за соблюдением режимов работы РЭС;
- в создании дублирующих и обходных каналов связи; «скрытых» РЭС и радиосетей, выделение резерва РЭС;
- в создании ложных группировок и позиционных районов РЛС.

Подготовка войск к ведению боевых действий в условиях РЭП предусматривает:

- постоянное изучение возможностей противника по РЭП, приемов и способов применения им средств РЭБ;
- твердое усвоение наиболее целесообразных приемов управления войсками в сложной РЭО и методов защиты РЭС от воздействия РЭП;
- морально-психологическую подготовку личного состава расчетов РЭС в условиях ведения противником РЭБ.

Создаются помехи только тем РЭС, которые действуют на принципе приема ЭМВ, например РЛС. Причем отметки на экранах индикатора, образуемые помехой могут, практически, не отличаться от отметок реальных объектов. А энергия, рассеянная множеством близко расположенных друг к другу объектов, может вызвать частичную или полную засветку экрана, имитировать или маскировать отметки от целей.

Отражающие (рассеивающие) свойства различных объектов и местности оценивают эффективной поверхностью рассеивания (ЭПР), характеризующей их способность отражать падающую ЭМВ в направлении облучающего устройства.

Применительно к радиолокации *ЭПР объекта* называют эквивалентную ему площадь поперечного сечения, которая, будучи помещенная в точку нахождения объекта, рассеивает во все стороны падающую энергию радиоволн, создавая в приемнике радиоволн РЛС такую же плотность потока мощности, как и реальный объект.

Значение ЭПР зависит от отражающих свойств объекта (размеров, формы, материала) и его положения, от длины и поляризации волны излучаемой РЛС. На практике обычно используется средним значением ЭПР ( $\sigma_{cp}$ ).

Например:

Вертолет – 0,5...1,0 м<sup>2</sup>.

Истребитель тактический:

- типа F-4 Фантом – 5...7 м<sup>2</sup>;

- типа F-15 «Игл» – 3 м<sup>2</sup>;
  - типа F-16 «Файтинг Фалкон» – 1,7 м<sup>2</sup>.
- Радио отражатели дипольные (пачка) – 10...20 м<sup>2</sup>.

Стратегический бомбардировщик:

- типа B-52 – 100 м<sup>2</sup>;
- типа B-1 – 10 м<sup>2</sup>.

В зависимости от источника образования различают естественные и искусственные ПП.

*Естественные помехи* возникают вследствие рассеивания ЭМВ земной и водной поверхностью, различными местными предметами, облаками, каплями дождя, частицами снега и неоднородностями атмосферы.

*Искусственные помехи* являются результатом рассеяния ЭМВ дипольным, уголковыми и линзовыми радио отражателями, антенными решетками, ионизированными средами и аэрозольными образованиями.



*a*



*б*

Рис. 135. Дипольный радио отражатель

Дипольные радио отражатели (рис. 135, *a*) представляют собой тонкие пассивные вибраторы, изготовленные из металлизированной бумаги, металлизированного стеклянного волокна, алюминиевой фольги и т. д. Их длину и толщину выбирают такими, чтобы обеспечить наибольшее рассеяние радиоволн при меньших размерах.

Максимальное значение ЭПР имеет ДРО с длиной, близкой к половине длины волны подаваемой РЛС (рис. 135, *б*), при которой наблюдается резонансное рассеяние.

Уголковый радио отражатель (РО) состоит из жестко связанных между собой взаимно перпендикулярных плоскостей. Важнейшим свойством угловых отражателей является то, что значительная доля ВЧ-энергии, подающей на них с любого направления в пределах внутреннего угла, отражается обратно, в сторону облучающей РЛС (рис. 136).

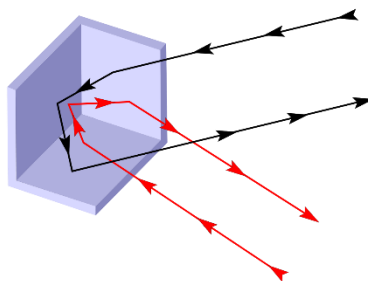


Рис. 136. Отражение ВЧ-энергии

Благодаря этому уголковый отражатель даже небольших размеров обладает значительными ЭПР. Уголковые отражатели должны изготавливаться весьма тщательно, т. к. отклонение от прямого угла всего лишь на 1° уменьшает ЭПР примерно в 5 раз.

Поэтому на практике чаще используют угол отражения с треугольными гранями (рис. 137), т. к. они менее чувствительны к погрешностям изготовления, хотя и уступают в ЭПР другим отражателям. Например: при одинаковой длине ребра ЭПР отражателя с квадратными гранями в 10 раз больше, чем с треугольными. Кроме того, используют сложные группы, состоящие из нескольких отражателей. Одним из недостатков уголкового отражателя является малая ширина ДР энергии радиоволн.



Рис. 137. Уголкового радио отражатель

*Переизлучающие антенные решетки* по устройству аналогичны обычным антеннам РЭС, но используются в режиме пере излучения принимаемых сигналов. Такой режим получается при коротком замыкании антенн в точке подключения фидера или волновода. Простейшая ПАР образуется при попарном соединении двух элементарных полуволновых вибраторов. Радиосигналы, принятые одним вибратором (диполем), пере излучаются в обратном направлении вторым. Из нескольких таких пар, соединенных линиями одинаковой электрической длины, составляется антенная решетка Ван–Атта. По способности фокусировать энергию радиоволны, такие решетки подобны трехгранным уголкового отражателям.

Ионизация воздуха, как правило, вследствие применения противником термоядерного оружия, которое по совокупности поражающих факторов либо выводит РЭС из строя, либо делает их работу невозможной.

Аэрозоли представляют собой взвешенные в газообразной среде мельчайшие частицы различных веществ, которые образуют дым (пыль, туман). Эти завесы затрудняют или исключают возможность наблюдения военной техники и объектов с помощью разведывательных средств, работающих в ультрафиолетовом, инфракрасном и видимом диапазоне волн.

Для поддержания нормальной работы РЭС надо иметь возможность искусственным путем выделить отметку цели на фоне помех. Задача выявления отметки цели на фоне местных предметов или пассивных помех сводится к выделению сигналов, отраженных от движущихся предметов, из всей совокупности сигналов, поступающих в приемник РЛС, или селекция движущихся целей (СДЦ).

Существует несколько методов селекции движущихся целей, но в войсках ПВО широкое применение нашел *когерентно-импульсный метод*. В нем сочетается определение дальности импульсным методом с выявлением радиальной составляющей скорости цели на основе эффекта Доплера.

Суть эффекта заключается в следующем: частота сигнала, отраженного движущейся целью, отличается от частоты колебаний, излученных передатчиком на частоту  $f$  (она же частота Доплера) определяемую радиальной скоростью движения цели относительно РЛС и длиной волны передатчика



$$F_{\text{доп}} = \pm \frac{2V_r}{\lambda},$$

где  $V_r$  – радиальная составляющая скорости цели;  $\lambda$  – длина волны передатчика; «+» – цель приближается на РЛС; «-» – цель удаляется на РЛС.

При определенных скоростях цели она, за период повторения импульсов, будет перемещаться на расстояние кратное  $\lambda/2$ . При этом фазовые отношения меняться не будут, а амплитуда сигнала на экране индикатора остается постоянной (как от неподвижной цели). Такие скорости называют «слепые». Это один из недостатков когерентно – импульсного метода. Для его устранения изменяют частоту повторения импульсов.

Еще одним недостатком является то, что невозможно отличить движущуюся цель, обладающую нулевой радиальной скоростью. Например, летающую по кругу вокруг РЛС (не удаляясь и не приближаясь). Этот недостаток смягчается тем, что такой маршрут цели маловероятен. Используя когерентно импульсный метод можно отличать движущиеся цели на экране РЛС от неподвижных.

Но для удобства работы, особенно при автоматическом сопровождении цели необходимо отметки от неподвижных объектов исключать. Для этого производится компенсация сигналов с помощью специального устройства, которое включается после приемника. Оно позволяет сохранить сигналы только от движущихся целей, устраняя полностью (или почти полностью) сигналы мешающих объектов. В результате экран индикатора очищается от помех.

В компенсирующем устройстве производится взаимное вычитание отраженных импульсов, задержанных на определенный интервал времени. В зависимости от времени задержки различают: череспериодную компенсацию – время задержки равно периоду повторения импульсов  $T_{\text{п}}$ ; кадровую компенсацию – время задержки равно периоду вращения антенны  $T_{\text{А}}$ .

В войсках ПВО широкое применение нашли устройства, работающие с череспериодной компенсацией сигналов. Компенсирующие устройства могут выполняться на линиях задержки или на потенциоскопах. Их принцип действия заключается в следующем: электронным лучом на мишени потенциоскопа записывается РЛ-информация, причем период развертки луча равен периоду повторения импульсов станции, а время прямого хода, исходя из максимальной дальности действия РЛС. Развертка синхронизируется с системой измерения дальности с тем, чтобы начало прямого хода совпадало с моментом посылки импульса передатчиком станции.

Во время второго хода луча происходит считывание записанной информации, причем записанные видеоимпульсы воспроизводятся в противоположной полярности. Это дает возможность производить компенсацию тех видеоимпульсов, которые не меняются за период повторения, т. е. полученные от неподвижных объектов. От перемещающихся объектов видеоимпульсы от периода к периоду будут менять свою амплитуду и полярность и поэтому остаются некомпенсированными. Таким образом, на экране индикатора видны отметки только от движущихся целей.

## Глава 4. Основы автоматики

### Раздел 1. Общие сведения о системах автоматики

#### § 1.1. Принцип работы автоматической следящей системы

Следящие системы – системы автоматического регулирования, в которых задающее воздействие изменяется по неизвестному заранее закону и для системы является случайной величиной. Состав следящей системы (рис. 138):

1. Задающий элемент (датчик).
2. Измерительный элемент.
3. Преобразующий элемент.
4. Усилительный элемент.
5. Исполнительный элемент.
6. Элемент (датчик) обратной связи (ООС).
7. Объект управления.

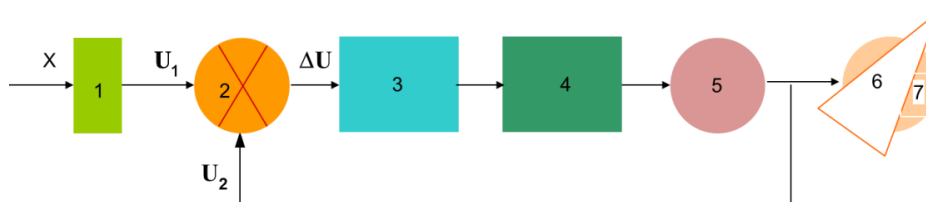


Рис. 138. Следящая система

Рассмотрим принцип работы следящей системы по структурной схеме. Под действием задающего воздействия  $X$ , задающий элемент  $1$  вырабатывает управляющее воздействие  $U_1$ , которое подается на измерительный элемент  $2$ . Туда же подается управляющее воздействие  $U_2$  через элемент (датчик) обратной связи. В измерительном элементе сравниваются управляющие воздействия  $U_1$  и  $U_2$ , в результате неравенства управляющих воздействий  $U_1$  и  $U_2$  на выходе измерительного элемента появляется управляющее воздействие рассогласования (параметр рассогласования)  $\Delta U$ , который подается в преобразующий элемент  $3$ , где при необходимости – преобразуется из одной формы в другую. С выхода преобразующего элемента сигнал подается на усилительный элемент  $4$ , где усиливает по напряжению и мощности (току) и подается на исполнительный элемент  $5$ .

Исполнительный элемент через регулирующий орган объекта управления изменяет положение(состояние) объекта управления  $7$ . Одновременно с изменением положения (состояния) объекта управления будет изменяться управляемая величина, а следовательно, и управляющее воздействие  $U_2$  до тех пор, пока управляющее воздействие рассогласования  $\Delta U$  не будет равно  $0$  или какому – то определенному значению (статистическая ошибка), при изменении которого будет изменяться положение или состояние объекта управления.

#### § 1.2. Индикаторные синхронные передачи. Системы дистанционных синхронных передач координат

В радиолокационных станциях для передачи на большие расстояния данных дальности, азимута и угла места широко применяются индикаторные синхронные передачи.

Синхронной передачей называется система, обеспечивающая непрерывное согласование положения двух или нескольких механически не связанных между собой валов в процессе их вращения. Электрическая синхронная передача включает следующие элементы (рис. 139):

- датчик  $D$  – устройство, преобразующее угол поворота командного вала КВ в соответствующие ему электрические сигналы;

- приемник П – устройство, воспринимающее электрические сигналы датчика для их последующего преобразования в угол поворота приемного вала ПВ;
- линия связи ЛС – для передачи электрических сигналов датчика к приемнику.

При передаче координат при помощи синхронной передачи угловое положение  $\alpha$  командного вала определяет величину передаваемого угла, а угловое положение  $\beta$  приемного вала – величину воспроизведенного на приемном пункте переданного угла. Так, например, если КВ связать при помощи зубчатой передачи с приводом антенны, то стрелка, связанная с ПВ, укажет азимутальное или угломестное положение антенны. Можно также передать величину дальности, связав зубчатой передачей КВ с потенциометром дальности.

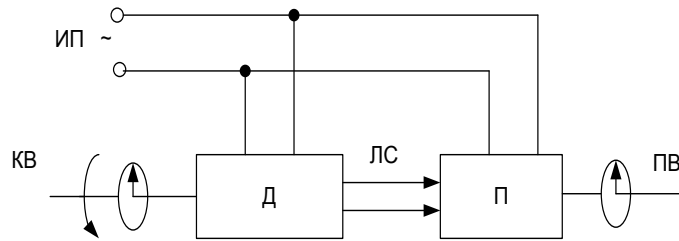


Рис. 139. Структурная схема синхронной передачи

В автоматике радиолокационных систем наиболее часто применяют индукционные синхронные передачи. В качестве датчиков и приемников в индукционной синхронной передаче применяются электрические индукционные машины – *сельсины* (рис. 140).

**Сельсин** – это электрическая машина, предназначенная для осуществления углового перемещения вала какого-либо механизма в соответствии с угловым перемещением вала другого механизма. Название *сельсин* происходит от английского *self* – сам и греческого *synchronos* – синхронный. Сельсины представляют собой особый вид электрических машин переменного тока мощностью от нескольких ватт до нескольких сот ватт, обладающих свойством самосинхронизации.

**Сельсин** служит для дистанционной передачи механического угла поворота электрическим путем между устройствами, не имеющими между собой механической связи. Сельсин имеет статор и ротор, на которых расположены обмотки переменного тока. Существуют сельсины с однокатушечной обмоткой на статоре и трехкатушечной на роторе, и, наоборот, с трехкатушечной обмоткой на статоре и однокатушечной на роторе, и, наконец, с трехкатушечной обмоткой на статоре и с такой же обмоткой на роторе.

По своему назначению в схемах авторегулирования сельсины делятся на: сельсин-датчики, сельсин-приемники, дифференциальные. На рис. 140 представлена схема одного варианта соединения сельсинов.

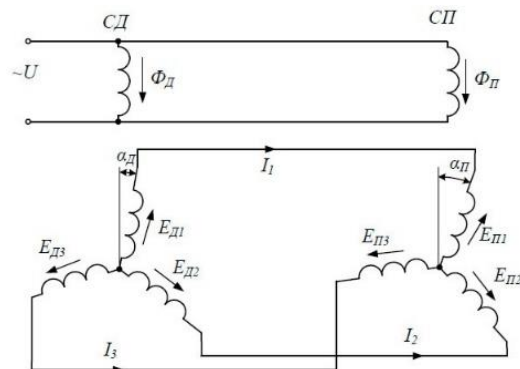


Рис. 140. Сельсин. Схема индукционной синхронной передачи

Схема состоит из сельсина-датчика СД, поворотом ротора которого задается передаваемый угол, и сельсин-приемника СП, поворот ротора которого воспроизводит передаваемый угол. Однофазные роторные обмотки возбуждения подключены к источнику питания ИП, а соответствующие фазы трехфазных роторных обмоток соединены между собой.

Действие сельсинной связи основано на принципе электромагнитной индукции, заключающейся в следующем. Переменный ток однокатушечной обмотки статора индуцирует в трехкатушечной обмотке ротора токи, величины которых зависят от относительного расположения обмоток ротора и статора.

Если роторы обоих сельсинов расположены одинаково по отношению к своим статорам, то токи в соединительных проводах роторов равны и противоположны между собой, и поэтому ток в каждой катушке равен нулю. Как следствие, равен нулю вращающий момент на валу одного и другого сельсинов.

Если повернуть ротор сельсин-датчика на определенный угол, то нарушится равновесие токов между роторами, и на валу сельсин-приемника возникнет вращающийся момент, благодаря чему его ротор будет поворачиваться до тех пор, пока не исчезнет неравновесие, токов, т. е. пока этот ротор не примет то же положение, что и сельсин-датчик.

Отклонение условий эксплуатации сельсинов от номинальных (изменение трения в кольцах и подшипниках за счет нагара на кольцах и засорения смазки, изменение напряжения частоты ИП, длины ЛС) приводит к снижению точности работы синхронной передачи.

Для повышения точности передачи данных применяют **двухскоростные** (двухканальные) синхронные передачи. Схема такой передачи показана на рис. 141. В ней имеются две параллельно работающих синхронные передачи грубого и точного отсчета. Командный вал связан непосредственно с СД<sub>го</sub> и через редуктор с ускоряющей передачей  $q$  с СД<sub>то</sub>. Этим обеспечивается высокая точность отсчетов данных по точному каналу.

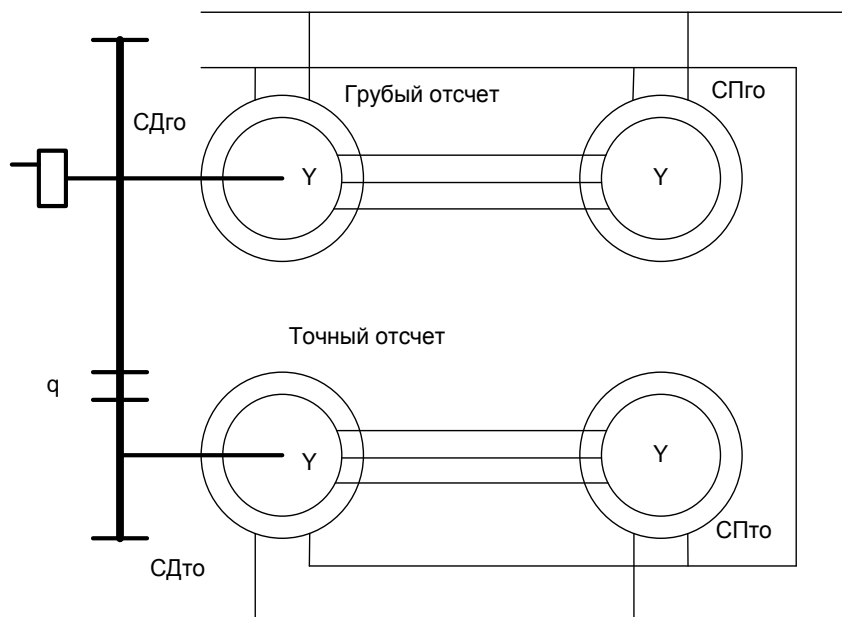


Рис. 141. Схема двухскоростной индукционной передачи

Часто один СД служит для передачи угла двум или нескольким сельсин – приемникам. На рис. 142 показана схема индикаторной передачи, когда к одному СД подключены параллельно два сельсин – приемника СП<sub>1</sub> и СП<sub>2</sub>.

Промышленностью выпускаются специальные датчики серии ДИ, рассчитанные на работу различного числа принимающих сельсинов.

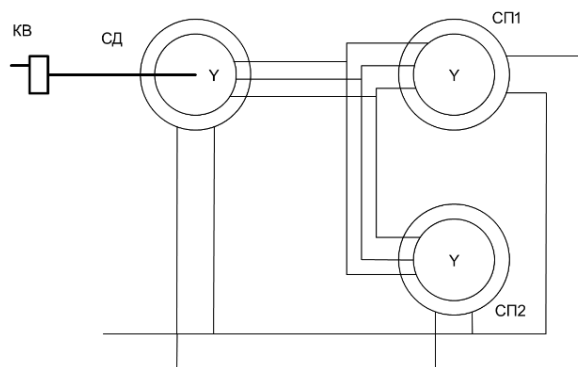


Рис. 142. Параллельная работа сельсинов в синхронной передаче

При дистанционной индикаторной передаче угла иногда применяют дифференциальные сельсины.

Дифференциальный сельсин применяется для алгебраического суммирования угловых перемещений двух механически не связанных между собой валов. Дифференциальный сельсин ДС включается в цепь роторных обмоток сельсинов  $C_1$  и  $C_2$  дистанционной индикаторной передачи угла, как это показано на рис. 143. В этой схеме ДС может работать датчиком или приемником.

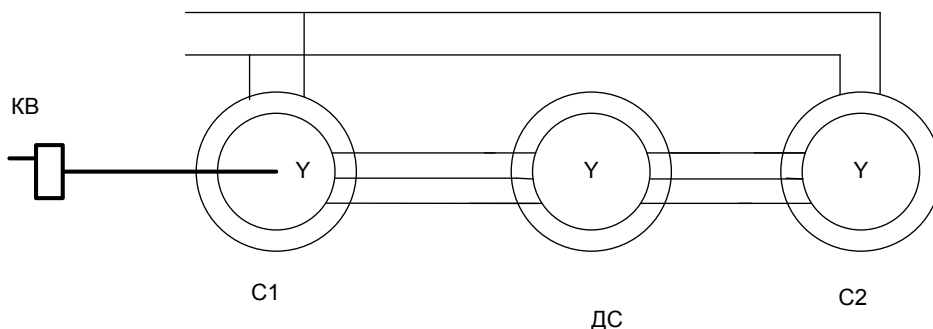


Рис. 143. Схема индикаторной синхронной передачи с дифференциальным сельсином

Когда сельсины  $C_1$  и  $C_2$  работают в качестве датчиков, а ДС в качестве приемника, то ротор ДС будет поворачиваться на угол, равный алгебраической сумме угловых положений сельсинов  $C_1$  и  $C_2$ .

В индикаторных синхронных передачах могут применяться бесконтактные сельсины (рис. 144).

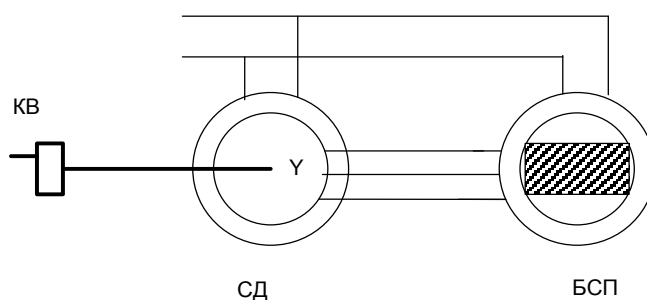


Рис. 144. Схема синхронной передачи с бесконтактным сельсином

Синхронная передача собирается на двух бесконтактных сельсинах или на одном контактном и одном бесконтактном сельсине. В последнем случае в качестве приемника применяется бесконтактный сельсин БСП, а датчика – контактный сельсин. Трехфазные обмотки ротора СД и статора БСП включаются между собой, как в обычной индукционной передаче.

В радиотехнических устройствах сельсины могут применяться в трансформаторном режиме работы (рис. 145). При трансформаторной (измерительной) синхронной передаче вторичную обмотку СД соединяют с трехфазной обмоткой сельсин – трансформатора СТ. К однофазной обмотке СТ подключают нагрузку. Напряжение питания подается на обмотку возбуждения СД.

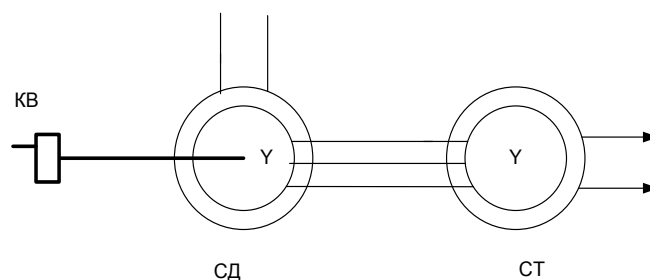


Рис. 145. Схема трансформаторной синхронной передачи

При повороте ротора СД на некоторый угол в однофазной обмотке СТ наводится ЭДС переменного тока, амплитуда которой пропорциональна углу рассогласования между угловым положением роторов СД и СТ, а фаза несущей зависит от направления (знака) рассогласования.

Основным показателем качества дистанционных синхронных передач является ошибка в передаче координаты, которая главным образом зависит от класса точности сельсинов и нагрузки на валу сельсин – приемника. Промышленностью выпускаются контактные сельсины трех классов точности.

Сельсин-датчики:

- 1-го класса до  $0,25^\circ$ ;
- 2-го класса до  $0,5^\circ$ ;
- 3-го класса до  $1,0^\circ$ .

Сельсин-приемники:

- 1-го класса до  $\pm 0,75^\circ$ ;
- 2-го класса от  $\pm 0,75^\circ$  до  $\pm 1,5^\circ$ ;
- 3-го класса от  $\pm 1,5^\circ$  до  $\pm 2,5^\circ$ .

### § 1.3. Принцип работы вращающихся трансформаторов

В качестве измерительного устройства в приводе 2Э2 ЗСУ-23-4 применяется синхронная передача, собранная на вращающихся трансформаторах (рис. 146).

**Вращающийся трансформатор (ВТ)** – информационная электрическая машина, (электрическая микромашина переменного тока), резольвер (от англ. *resolver*), предназначенная для получения напряжения, пропорционального тригонометрической или линейной функции угла поворота ротора  $U = f(\alpha)$ .

Вращающийся трансформатор представляет собой индукционную машину, в которых статор и ротор выполнены в виде цилиндров с распределительными взаимно перпендикулярными обмотками. По конструкции аналогичны асинхронным электродвигателям с фазным ротором. Ротор вращается в подшипниках, расположенных в гнездах крышек. В пазы статора и ротора укладываются по две взаимно перпендикулярные обмотки. На передней крышке ВТ укрепляются соединительные колодки для подключения его к элементам схем. Концы статорных обмоток непосредственно подводятся к соединительным колодкам, а концы роторных обмоток – через токосъемное устройство. Вращающиеся трансформаторы подразделяются на контактные и бесконтактные, с ограниченным и неограниченным углом поворота ротора. Типы ВТ:

- линейные (ЛВТ);
- синусно-косинусные (СКВТ).

Схема соединения и распределения обмоток ВТ и маркировка выходных концов показаны на рис. 146.

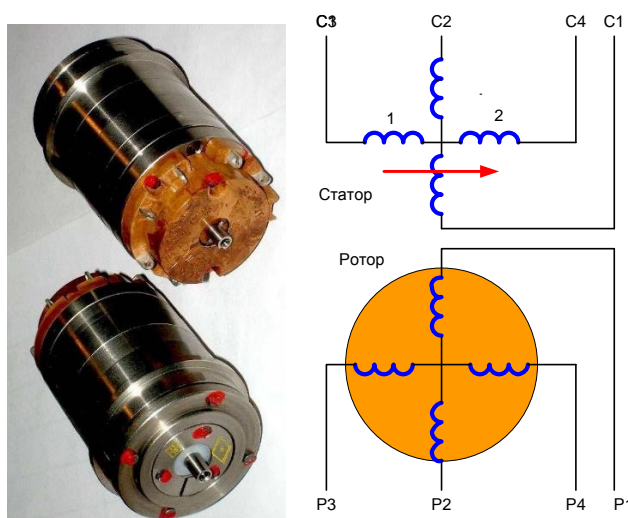


Рис. 146. Вращающиеся трансформаторы со схемой соединения и распределения обмоток

К источнику переменного тока подключается одна из обмоток статора ( $C_3C_4$ ). При этом создается пульсирующий магнитный поток  $\Phi_{\text{в}}$ . При совпадении этого потока с осью обмотки ротора  $P_3P_4$  в ней наводится ЭДС  $E_{\text{т}}$ , действующее значение которой определяется ЭДС обмотки статора  $E_{\text{в}}$  и коэффициентом трансформации  $K_e$ .

$$E_{\text{т}} = \frac{E_{\text{в}}}{K_e}; \quad K_e = \frac{W_{P_3P_4}}{W_{C_3C_4}} = \frac{W_{\text{р}}}{W_{\text{с}}},$$

где  $W_{\text{р}}$  – коэффициентное число витков роторной обмотки;  $W_{\text{с}}$  – эффективное число витков обмотки возбуждения.

При повороте ротора на угол  $\alpha$  величина потока, сцепленного с обмоткой  $P_3P_4$ , изменяется пропорционально косинусу угла поворота, и ЭДС, наводимая этим потоком будет  $E_2 = E_{\text{т}} \cdot \cos \alpha$ . Для обмотки ротора  $P_1P_2$  величина ЭДС  $E_1 = E_{\text{т}} \cdot \sin \alpha$ , т. к. она расположена под углом  $90^\circ$  к обмотке  $P_3P_4$ . Поэтому первая обмотка ротора ВТ называется синусной, а вторая – косинусной, а сам ВТ называется синусно-косинусным ВТ (СК ВТ).

**Синхронная передача** в приводе 2Э2 собрана на двух ВТ, один из которых называется ВТ-датчик, другой ВТ-приемник. Эта передача служит для измерения угла рассогласования между ротором ВТ-П и ротором ВТ-Д. Ротор ВТ-Д жестко связан с задающим валом оружейного преобразователя координат. Ротор ВТ-П жестко связан с валом гидромотора с помощью жесткой связи, выполненной в виде безлюфтового приборного редуктора в принимающем приборе. Передаточные отношения от гидромотора до принимающего ВТ и от гидромотора до механизмов наведения пушки одинаковы, таким образом ротор принимающего ВТ повторяет движение пушки. Роторные обмотки ВТ-Д и ВТ-П попарно соединены между собой. На одну из статорных обмоток ВТ-Д подается напряжение 50 В 400 Гц, другая статорная обмотка замкнута накоротко. На стороне ВТ-П используется только синусная обмотка, вторая разомкнута и сигнал с нее не снимается.

Итак, подаем напряжение 50 В 400 Гц на обмотку статора, дающего ВТ, по этой обмотке протекает ток, который создает пульсирующий магнитный поток  $\Phi_{\text{в}}$ . Поток возбуждения наводит в обмотках ротора ЭДС.

ЭДС в обмотке  $P_1P_2$  –  $E_1 = E_{\text{т}} \cdot \sin \alpha$ , ЭДС в обмотке  $P_3P_4$  –  $E_2 = E_{\text{т}} \cdot \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол поворота ротора от нулевого положения.

Под действием этих напряжений в роторных обмотках принимающего ВТ протекают токи, создающие результирующий магнитный поток  $\Phi_{\Pi}$ , равный векторной сумме потоков каждой обмотки. При таком положении ротора ВТ-Д, когда  $\alpha = 0$ , то ток протекает только по обмоткам  $P_3P_4$  ВТ-Д и ВТ-П. При этом результирующий магнитный поток  $\Phi_{\Pi}$  будет пронизывать витки синусной обмотки статора ВТ-П под углом  $90^\circ$ , следовательно, напряжение на концах этой обмотки будет равно 0 и на входе электронного усилителя сигнал будет отсутствовать. Такое положение роторов ВТ-П и ВТ-Д считается согласованным (рис. 147).

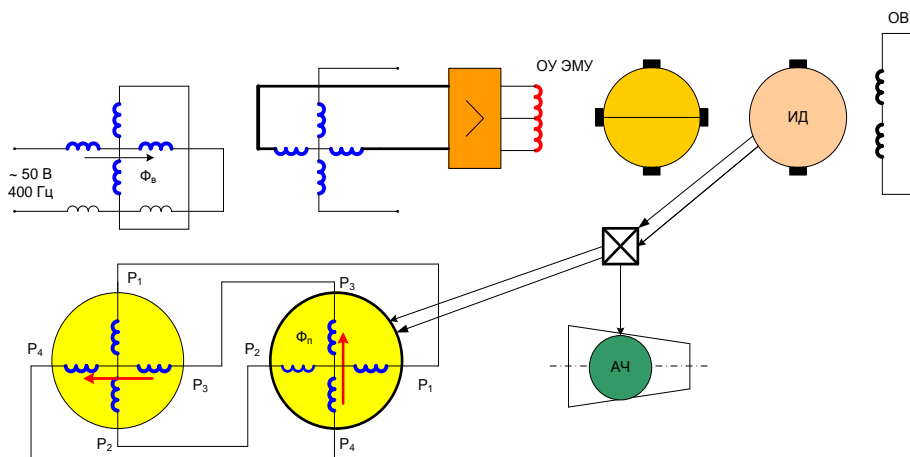


Рис. 147. Синхронная передача в согласованном положении

Если повернуть ротор датчика на угол  $45^\circ$  относительно согласованного датчика (рис. 148), то в обмотках ротора наводятся ЭДС.

$$\text{В обмотках } P_1P_2 - E_1 = E_T \sin \alpha = \frac{E_T \sqrt{2}}{2}; \quad (\alpha = 45^\circ).$$

$$\text{В обмотках } P_3P_4 - E_2 = E_T \cos \alpha = \frac{E_T \sqrt{2}}{2}, \quad \text{т. е. } E_1 = E_2.$$

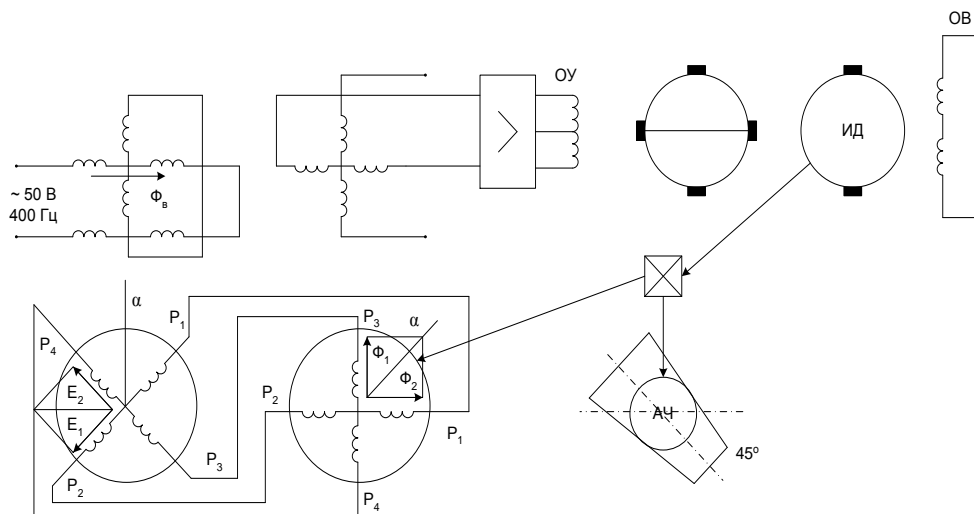


Рис. 148. Синхронная передача в рассогласованном положении

Таким образом, в роторных обмотках ВТ-П будут протекать токи, которые создадут потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  (притом  $\Phi_1 = \Phi_2$ ). Сложим векторно  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , получим результирующий магнитный поток  $\Phi_{\Pi}$ , повернутый на  $45^\circ$  относительно согласованного положения, притом повернут также по часовой стрелке.



В синусной обмотке статора под действием  $\Phi_n$  будет индуцироваться ЭДС, называемая управляющим напряжением рассогласования  $U_y = U_T \cdot \sin 45^\circ$ . Это управляющее напряжение, будучи преобразовано и усилено, поступает на ИД, который вращаясь, поворачивает пушку в сторону уменьшения угла рассогласования, одновременно вращение подается на ротор принимающего ВТ, и он поворачивается в сторону уменьшения управляющего напряжения.

Как только угловые положения ротора ВТ-П и ротора ВТ-Д будут равны, результирующий  $\Phi_n$  вновь станет перпендикулярным статорной обмотке ВТ-Д и ИД, следовательно, и пушка останется в этом положении.

Синхронные передачи на ВТ характеризуются тем, что при рассогласованном положении роторов дающего и принимающего ВТ, в обмотке принимающего возникает управляющее напряжение рассогласования, величина которого зависит от угла рассогласования, а фаза от напряжения рассогласования.

## Раздел 2. Принципы работы автоматических систем РЛС

### § 2.1. Принцип автоматического сопровождения по дальности

Сопровождение цели по какой-либо координате заключается в непрерывном определении данной координаты выбранной цели. При сопровождении цели по дальности необходимо непрерывно определять дальность и непрерывно вводить определяемую величину в систему передачи данных и оттуда в какое-либо счетно-решающее устройство.

Дальность можно вводить либо поворотом ротора сельсин-датчика, либо изменением величины или фазы эталонного напряжения с помощью потенциометра или фазовращателя. Сопровождение цели по дальности может быть ручным, полуавтоматическим и автоматическим.

При ручном сопровождении цели дальность определяется путем непрерывного совмещения механического или электронного визира с отраженным сигналом на экране ЭЛТ.

При полуавтоматическом сопровождении цели визир перемещается по экрану с помощью специальных устройств, а оператор лишь регулирует скорость движения визира, добиваясь совмещения визира с отраженным сигналом.

При автоматическом сопровождении процесс сопровождения цели полностью автоматизирован. Автоматизация процесса сопровождения цели дает следующие преимущества:

- повышается точность определения и скорость отработки дальности, что особенно важно при высоких скоростях цели;
- исключаются субъективные ошибки оператора;
- в ряде случаев отпадает необходимость в ЭЛТ с ее громоздкой схемой, поскольку появляется возможность определять дальность и вводить ее в счетно-решающий прибор без индикации цели на экране.

Любая система автоматического сопровождения по дальности является замкнутой системой автоматического регулирования и содержит три основных элемента: временной дискриминатор (измерительное устройство), усилительно – преобразующее устройство и генератор временной задержки (исполнительное устройство). Принцип автоматического сопровождения цели по дальности можно пояснить по функциональной схеме, изображенной на рис. 149.

Входным сигналом системы являются отраженные от выбранной цели сигналы-видеоимпульсы, поступающие на систему АСД с выхода приемника. Время запаздывания  $t_1$  этих сигналов, относительно момента запуска передатчика, характеризует определяемую системой дальность до цели  $D$ . Выходным сигналом АСД являются кратковременные следящие видеоимпульсы (стробы), которые вырабатываются исполнительным устройством системы, т. е. генератором временной задержки.

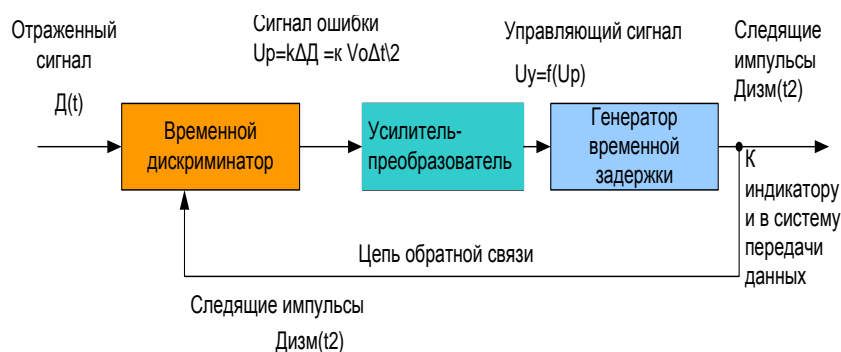


Рис. 149. Система автоматического регулирования

Время задержки  $t_2$  выходного сигнала системы АСД (следящих импульсов) относительно прямого импульса станции соответствует измеренному системой значению дальности цели  $D_{изм}$ :

$$D_{изм} [\text{км}] = 0,15t_2 [\text{мкс}].$$

Выходные импульсы, характеризующие измеренную дальность цели, подаются с выхода системы на индикаторное устройство РЛС для создания электронного визира дальности, а также через систему передачи данных вводятся в счетно-решающий прибор. Кроме того, по цепи обратной связи следящие импульсы поступают на измерительное устройство системы – временной дискриминатор.

Во временном дискриминаторе время  $t_2$  задержки следящих импульсов сравнивается со временем  $t_1$  запаздывания сигнала, отраженного от цели. Другими словами, в дискриминаторе измеренная дальность  $D_{изм}$  «вырабатываемая» системой, сравнивается с истинной дальностью  $D$ . В результате определяется их разность  $\Delta D = D - D_{изм}$ , т. е. ошибка определения дальности, или ошибка сопровождения, и вырабатывается сигнал ошибки (сигнал рассогласования)  $U_p$ , пропорциональный ошибке сопровождения  $\sigma_d$ :

$$U_p = k\sigma_d = kV_0(t_1 - t_2)/2 = kV_0\Delta t/2,$$

где  $\Delta t$  – временная ошибка сопровождения ( $\Delta t = t_1 - t_2$ );  $V_0$  – скорость распространения электромагнитной энергии в атмосфере;  $k$  – постоянный коэффициент.

Сигнал ошибки, выработанный дискриминатором, попадает на усилитель преобразователь. Усиленный и преобразованный сигнал ошибки представляет собой управляющий сигнал  $U = f(U_p)$ , который вынуждает генератор временной задержки изменить временную задержку следящих импульсов таким образом, чтобы приблизить измеренное значение дальности  $D_{изм}$  к истинному значению дальности  $D$ . Благодаря этому в процессе сопровождения ошибка уменьшается, стремясь к минимальному значению.

## § 2.2. Принцип автоматического сопровождения по угловым координатам

Процесс сопровождения цели по направлению (угловым координатам) – это процесс непрерывного определения текущих угловых координат выбранной цели. Практически он сводится к непрерывному совмещению направления оси антенны с направлением на цель ручным полуавтоматическим или автоматическим способом. Направление оси антенны при сопровождении индицируется механическими или иными указателями и через систему передачи данных передается в счетно-решающий прибор. В станциях высокой точности сопровождение цели обычно полностью автоматизировано и осуществляется с помощью специальной системы автоматического сопровождения цели по направлению (системы АСН).

Системы АСН делятся на одноканальные и двухканальные. В одноканальных системах сигнал ошибки, возникающий при несовпадении электрической или геометрической оси антенны с направлением на цель, усиливается и детектируется в общих для канала азимута и

угла места каскадах и лишь затем преобразуется в два напряжения, каждое из которых характеризует ошибку сопровождения цели в одной из плоскостей и подается на соответствующий канал. В двухканальных системах азимутальный и угломестный каналы разделяются уже в антенно-фидерном устройстве, т. е. двухканальные системы состоят из двух полностью независимых каналов, каждый из которых обеспечивает автоматическое сопровождение в одной плоскости, т. е. по одной угловой координате.

В РЛС 1РЛ33 и 1РЛ35 применяется одноканальный метод (рис. 150).

Принцип работы одноканальной системы следующий. При несовпадении оси антенны с направлением на цель на выходе приемника возникает сигнал ошибки. Он подается на вход системы АСН. В системе АСН сигнал ошибки преобразуется в два напряжения, каждое из которых характеризует ошибку сопровождения цели в одно из плоскостей (азимутальной или угломестной). Эти напряжения управляют поворотом антенны в соответствующей плоскости. Под воздействием этих управляющих напряжений приводные двигатели азимута и угла места поворачивают антенну так, чтобы ошибка сопровождения, а следовательно, и сигнал ошибки уменьшились.

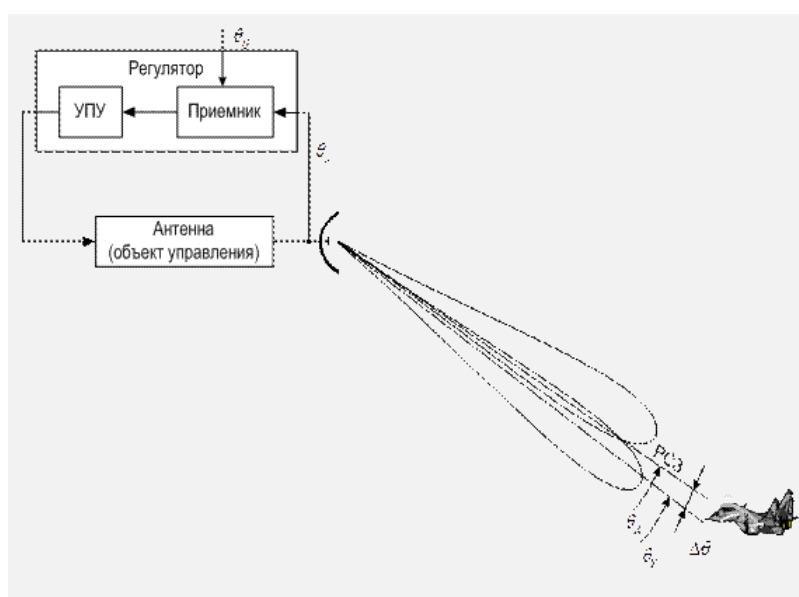


Рис. 150. Схема одноканальной системы сопровождения по направлению

При сопровождении движущейся цели ошибка сопровождения не обращается в нуль, потому что угловые координаты цели непрерывно меняются. Ось антенны перемещается вслед за целью с некоторым отставанием. Это отставание определяет точность сопровождения цели и называется динамической ошибкой сопровождения.

Использование одноканальных систем АСН характерно для РЛС, в которых угловые координаты цели определяются методом конического сканирования луча антенны. Данный метод применяется в РЛС 1РЛ33 и 1РЛ35 и рассматривался в главе 2 раздел 3. Сущность метода заключается в том, что при несовпадении оси антенны с направлением на цель возникает амплитудная модуляция отраженного сигнала с частотой конического сканирования облучателя антенны  $\Omega$ .

Закон модуляции при малых углах рассогласования выражается формулой:

$$E = E_0 [1 + m \sin(\Omega_A + \varphi_0)],$$

где коэффициент модуляции  $m$  пропорционален угловому смещению цели, а начальная фаза  $\varphi_0$  зависит от направления смещения цели относительно оси антенны. Кривая, огибающая вершины отраженных импульсов, является сигналом ошибки.

При коническом сканировании сопровождение цели сводится к тому, что автоматическая система непрерывно поворачивает ось антенны так, чтобы отраженные сигналы сохраняли постоянную амплитуду, т. е. сигнал ошибки равнялся нулю. При смещении оси антенны относительно направления на цель они модулируются по амплитуде этим сигналом.

### § 2.3. Следящий привод управления антенной

Принцип работы следящего привода управления антенной рассмотрим на рис. 151. Из приемной системы видеоимпульсы поступают на преобразователь сигнала ошибки. Преобразователь сигнала ошибки предназначен для выделения и усиления сигнала ошибки. Он состоит из импульсного детектора и усилителя. Импульсный детектор детектирует поступающие от приемника отрицательные видеоимпульсы. На его выходе образуется пульсирующее выпрямленное напряжение, переменная составляющая которого усиливается в двухкаскадном усилителе с симметричным выходом.

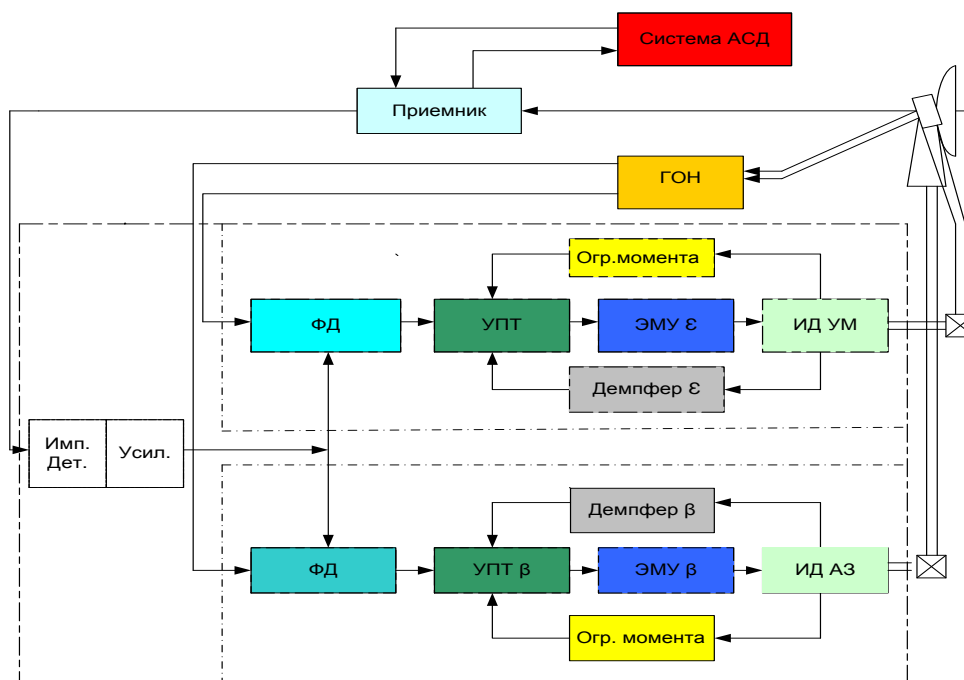


Рис. 151. Схема следящего привода управления антенной

Далее система АСН разделяется на два автономных канала – канал азимута и канал угла места. Каждый канал управляет антенной в соответствующей плоскости независимо от другого канала.

В начале каждого канала имеется специальный каскад, выделяющий из общего сигнала ошибки составляющую, пропорциональную угловому смещению цели в соответствующей плоскости. Таким каскадом является фазовый детектор. На фазовые детекторы поступают напряжения сигнала ошибки и опорные напряжения, вырабатываемые генератором опорных напряжений (ГОН). ГОН смонтирован на одном валу с двигателем вращения облучателя антенны и представляет собой двухфазный генератор синусоидальных напряжений. Он вырабатывает два опорных напряжения синусоидальной формы, сдвинутых между собой по фазе на  $90^\circ$ . Их частота равна частоте конического сканирования  $\Omega_A$ , а фаза жестко связана с положением луча антенны в пространстве. Одно из этих напряжений  $U_{0\beta}$ , является опорным напряжением канала азимута, другое,  $U_{0\varepsilon}$  – опорным напряжением канала угла места.

На фазовый детектор каждого канала подаются напряжения сигнала ошибки и соответствующее опорное напряжение. В результате совместного детектирования этих напряжений

на нагрузке фазового детектора выделяется постоянное напряжение, пропорциональное угловому смещению цели в соответствующей плоскости. Напряжение, снимаемое с фазового детектора, называется управляющим, так как в зависимости от его величины и знака антенна поворачивается в ту или другую сторону.

Для управления положением антенны напряжение, снимаемое с фазовых детекторов, нуждается в значительном усилении как по напряжению, так и по току. Это усиление осуществляется в двухкаскадном усилителе мощности, состоящем из двухтактного усилителя постоянного тока и электромашинного усилителя (ЭМУ). Выходное напряжение питает якорную обмотку приводного двигателя антенны, изменяя движение антенны в соответствии с величиной и знаком управляющих напряжений.

Кроме рассмотренных элементов в системах АСН обычно имеются стабилизирующие устройства, обеспечивающие плавность перемещения оси антенны в процессе сопровождения цели. Их действие основано на использовании отрицательной обратной связи. В рассматриваемой схеме роль стабилизирующих устройств выполняют два каскада – ограничитель моментов и демпфер. Ограничитель моментов устраняет сильные рывки антенны и предохраняет цепи приводного двигателя от перегрузок, при больших амплитудах сигнала ошибки. Демпфер устраняет колебания антенны. Причина возникновения колебаний – инерционность механической части антенной системы. Приводной двигатель, стремящийся повернуть антенну в положение точного пеленга, при котором сигнал ошибки равен нулю, не может мгновенно остановить антенну, и она по инерции проскакивает это положение. По другую сторону положения точного пеленга сигнал ошибки меняет знак, вследствие чего антенна начинает двигаться в обратном направлении, вновь проскакивая нулевое положение и т. д.

Для устранения подобных колебаний используется отрицательная обратная связь. Напряжением обратной связи, подаваемым на усилитель постоянного тока для подавления колебаний, является переменное напряжение, индуктируемое при колебаниях антенны в якоре приводного двигателя.

Автоматическое сопровождение цели осуществимо лишь в том случае, когда на систему АСН поступает импульс, отраженный от одной цели. Однако в пределах луча антенны, помимо выбранной цели, могут оказаться и другие. В этом случае за период повторения импульсов в приемник поступает несколько отраженных сигналов. В результате форма огибающей видеоимпульсов на выходе приемника искажается. Систем АСН при этом вырабатывает ложный сигнал ошибки, и автоматическое сопровождение заданной цели становится невозможным.

Для нормальной работы системы АСН на ее вход должны поступать отраженные импульсы не от всех целей, а только от одной выбранной цели. Поэтому тот канал приемника, с которого поступают видеоимпульсы на вход системы АСН (канал автосопровождения), должен отпираться лишь при приеме сигнала, отраженного от выбранной цели.

Процесс, при котором из суммы импульсов, приходящих в различное время, выбираются лишь импульсы, соответствующие определенному времени (в данном случае времени запаздывания импульса от заданной цели) называется *временной селекцией*.

Для временной селекции в данной схеме используются селекторные импульсы. Канал автосопровождения приемника постоянно заперт и отпирается лишь на время действия селекторного импульса. Поэтому в этом канале усиливаются только те отраженные импульсы, время запаздывания которых относительно прямого импульса равно времени задержки селекторного импульса. Для непрерывной временной селекции при перемещении цели необходимо согласовать момент генерирования селекторного импульса, т. е. время задержки, с дальностью цели, т. е. с временем запаздывания отраженного сигнала. Следовательно, система АСН в процессе работы должна быть связана с системой измерения дальности. В рассматриваемой системе АСН временная селекция цели осуществляется селекторными импульсами, поступающими из системы автосопровождения по дальности.

## Раздел 3. Элементы АСУ

### § 3.1. Система АПЧ

Автоматическая подстройка частоты (АПЧ) применяется для поддержания величины промежуточной частоты приемника неизменной при изменении частоты передатчика или гетеродина под влиянием случайных факторов (изменение температуры, нагрузки и т. п.) или при перестройке несущей частоты РЛС. Системы АПЧ разнообразны по структуре и конструктивному исполнению. Общая структурная схема АПЧ показана на рис. 152.

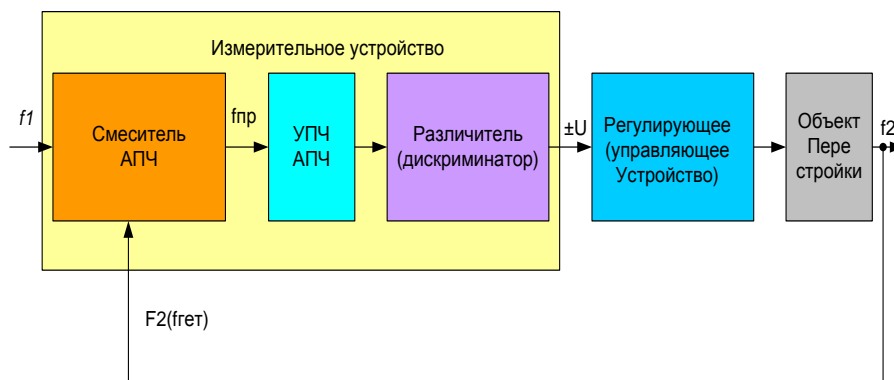


Рис. 152. Структурная схема системы АПЧ

Постоянное значение промежуточной частоты ( $f_{пр} = f_{гет} - f_{пер}$ ) можно поддерживать путем подстройки частоты передатчика  $f_{пер}$  или частоты гетеродина  $f_{гет}$ . Для измерения отклонения промежуточной частоты от заданного значения схема АПЧ имеет в своем составе измерительное устройство, включающее обычно смеситель, усилитель промежуточной частоты и частотный дискриминатор. Напряжение гетеродина и передатчика подаются на смеситель, который вырабатывает новое напряжение, частота которого называется текущей промежуточной частотой и равна разности частот  $f_{пер}$  и  $f_{гет}$ . Это напряжение поступает на УПЧ системы и после усиления подается на частотный дискриминатор.

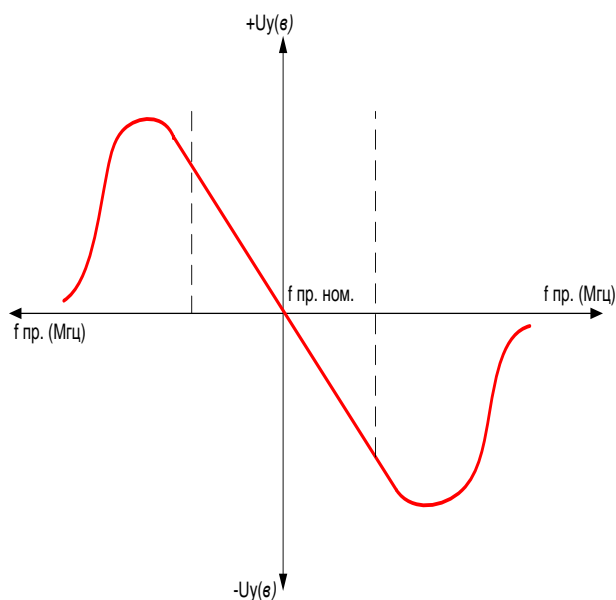


Рис. 153. Частотная характеристика дискриминатора

Частотный дискриминатор имеет частотную характеристику, показанную на рис. 153. Если разность частот гетеродина и передатчика не равна промежуточной частоте, то на выходе дискриминатора вырабатывается напряжение постоянного тока  $\pm U_{рас}$  величина и полярность которого зависит от величины ухода частоты от промежуточной и направления ухода  $\pm f_{пр}$ .

Регулирующее устройство усиливает и преобразует напряжение рассогласования в управляющее напряжение, величина и форма которого удобны для воздействия на элемент подстройки.

Под воздействием регулирующего (управляющего) напряжения частота передатчика изменяется так, что разность  $f_{пер} - f_{гет} = f_{пр}$ . Регулирующее устройство во многом определяет тип и поведение всей системы АПЧ.

По типу регулирующего устройства схемы АПЧ делятся на электронные, электромеханические и термические. В электронных схемах все элементы регулирующего устройства выполнены на электронных приборах. Наиболее часто используются усилители постоянного тока, тиратронные и фантастронные схемы. В электромеханических системах в качестве исполнительного элемента применяются маломощные электродвигатели или реле, механически изменяющие частоту гетеродина или передатчика. маломощные электродвигатели или реле, механически изменяющие частоту гетеродина или передатчика. В схемах АПЧ с термической подстройкой осуществляется изменение частоты специальных клистронов под влиянием изменения температуры.

### § 3.2. Усилители мощности

В автоматических системах РЛС широко применяются усилители мощности различных типов. Усилители мощности предназначены для усиления сигнала по мощности (току), что обеспечивает нормальную работу исполнительных элементов. В следящих системах усилители мощности применяются в качестве окончательного каскада усилительно-преобразующего устройства, который усиливает маломощный сигнал рассогласования до величины необходимой для управления обрабатываемым устройством (эл. двигателем и т. п.). Рассмотрим следующие типы применяемых усилителей мощности: электронные, магнитные и электромашинные.

**1. Электронные усилители мощности** представляют собой усилитель с нелинейный элементом (транзистор, лампа), который осуществляет усиление входного сигнала по току. В выходных каскадах следящих систем РЛС 1РЛ33 они построены на мощных электронных лампах (пентодах). Нагрузкой ( $R_n$ ) таких усилителей являются электронные катушки исполнительных устройств (рис. 154).

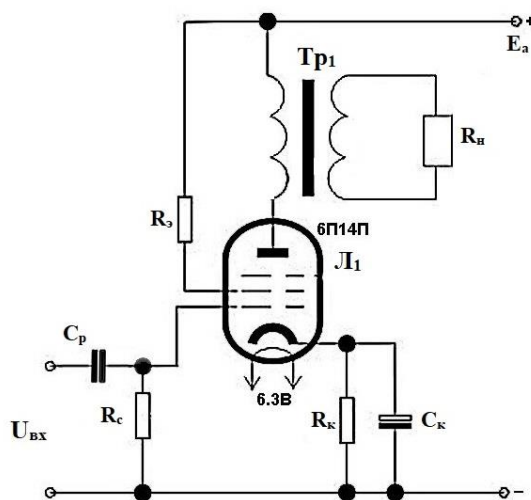


Рис. 154. Схема усилителя мощности

Устройство и принцип работы такого усилителя аналогичен усилителю низкой частоты и рассмотрен ранее.

**2. Электромашинный усилитель** предназначен для усиления управляющего напряжения до мощности, необходимой для вращения якоря исполнительного двигателя следящих систем. Конструктивно ЭМУ представляет собой однокорпусный агрегат, состоящий из генератора постоянного тока, который и является электромашинным усилителем (ЭМУ), и приводного асинхронного электродвигателя трехфазного переменного тока. Якорь генератора вращается совместно с якорем приводного двигателя.

ЭМУ состоит из якоря, коллектора, статора. На якоре выполнена обмотка, которая закладывается в пазы. Концы секций обмотки якоря впаяны в пазы пластин коллектора. Коллектор имеет два комплекта щеток, продольные  $Я_1 - Я_2$  и поперечные  $У_5 - У_6$  (рис. 155). Поперечные щетки короткозамкнуты.

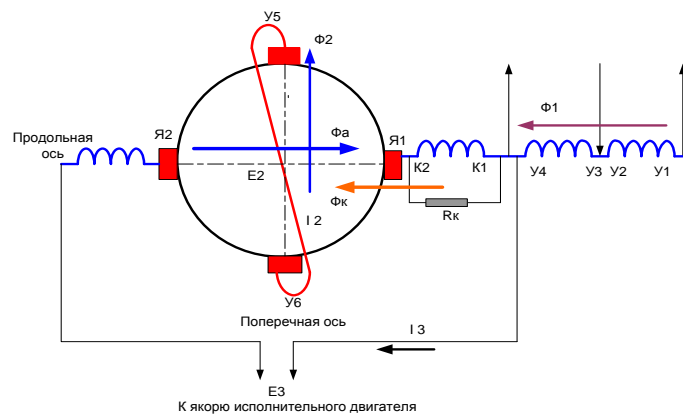


Рис. 155. Принципиальная схема соединения обмоток генератора ЭМУ

Ток, протекающий по обмотке возбуждения  $I_b$ , создает продольный магнитный поток  $\Phi_1$ , направленный по продольной оси полюсов машины. При вращении якоря на поперечных щетках  $У_5 - У_6$  появляется ЭДС  $E_2$ . Так как они замкнуты накоротко, то в обмотке якоря появляется большой ток  $I_2$ . Этот ток создает в обмотке якоря сильное поперечное магнитное поле реакции якоря  $\Phi_2$ , неподвижное в пространстве и направленное по оси щеток  $У_5 - У_6$ . Под действием магнитного потока  $\Phi_2$  в якорной обмотке между щетками  $Я_1 - Я_2$  возникает ЭДС  $E_3 \gg E_2$ , так как  $\Phi_2 \gg \Phi_a$ .

При подключении к щеткам  $Я_1 - Я_2$  нагрузки  $R_n$  в цепи потечет ток  $I_3$  превышающий ток  $I_b$  в десятки тысяч раз. Если нагрузку ЭМУ подключить непосредственно к щеткам  $Я_1 - Я_2$ , то появившийся при этом ток  $I_3$  проходя по обмоткам якоря, создаст в них магнитный поток  $\Phi_a$ , называемый потоком реакции якоря. Поток будет направлен по продольной оси машины и навстречу потоку управления  $\Phi_1$ . Поток  $\Phi_a$  является размагничивающим и во много раз сильнее потока  $\Phi_1$ . Чтобы исключить размагничивающее действие потока реакции якоря на поток управления последовательно со щетками  $Я_1 - Я_2$  включена компенсационная обмотка  $К_1 - К_2$  по которой проходит ток нагрузки  $I_3$ . При прохождении тока нагрузки через компенсационную обмотку в ней возникает магнитный поток  $\Phi_k$  направленный навстречу потоку реакции якоря, который компенсирует размагничивающее действие потока реакции якоря. Для улучшения коммутации, т. е. уменьшения искрения щеток, а следовательно, улучшения условий работы щеток рабочей цепи машины (щетками  $Я_1 - Я_2$ ) последовательно с компенсационной обмоткой включается обмотка дополнительных полюсов  $Д_1 - Д_2$ . Электромашинные усилители применяют для автоматического управления мощными электродвигателями.

**3. Фазочувствительные усилители** являются активными фазочувствительными выпрямителями. Фазочувствительный выпрямитель (демодулятор) предназначен для преобразования напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока, полярность которого зависит от фазы, а величина от амплитуды напряжения переменного тока. Фазочувствительные выпрямители подразделяются на пассивные и активные.

В пассивных ФЧВ происходит только преобразование напряжения переменного тока в постоянный. В активных ФЧВ кроме преобразования – усиление постоянного напряжения. Принципиальная схема фазочувствительного выпрямителя активного типа (усилителя) приведена на рис. 158.

Состав фазочувствительного усилителя:

- входной трансформатор  $ТР_1$ ;



- усилитель на лампах  $L_1$  и  $L_2$  (двойные триоды);
- трансформатор  $Tr_2$ , являющегося источником анодного напряжения;
- потенциометр симметрирования  $R_8$ ;
- резистор  $R_9$ , обеспечивающий смещение на сетках лампы  $L_1$  и  $L_2$ ;
- резистор  $R_7$ , ограничивающий сеточные токи при больших напряжениях;
- конденсаторы  $C_4$  и  $C_5$ , сглаживающие пульсации переменного тока;
- резисторы  $R_{10}$  и  $R_{11}$  (анодные нагрузки).

Рассмотрим работу фазочувствительного усилителя по схеме на рис. 156. При отсутствии входного сигнала с  $Tr_1$ , отсутствует напряжение на выходе фазочувствительного усилителя.

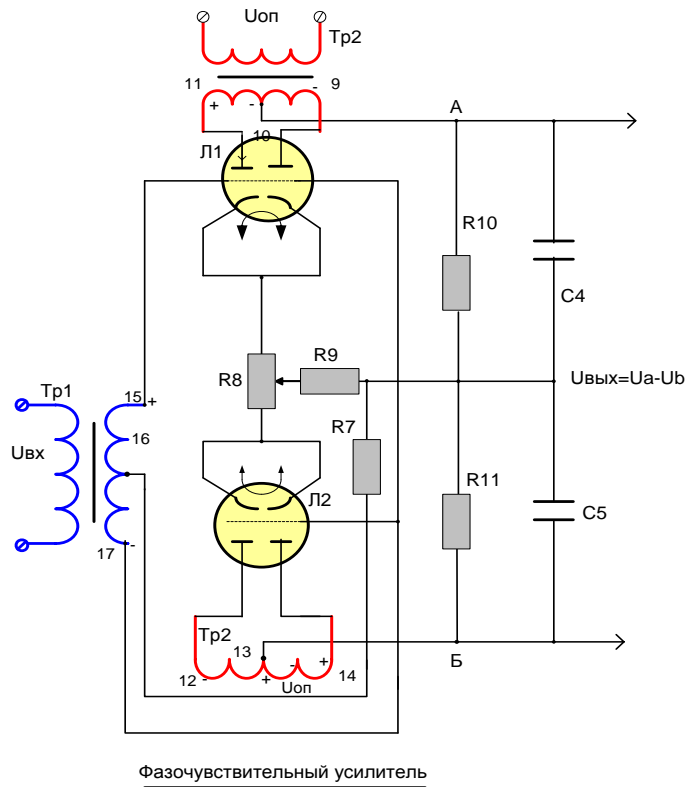


Рис. 156. Схема фазочувствительного усилителя

Предположим, в первый полупериод анодного напряжения анодный ток протекает по цепи. «+» 11 вывод вторичной обмотки трансформатора анод – катод  $L_{1a}$ ,  $R_8$ ,  $R_9$ ,  $R_{10}$  средний вывод 10; Лампа  $L_{1b}$  закрыта «-» на аноде. Аналогично, «+» 14 вывод вторичной обмотки трансформатора анод – катод  $L_{2b}$ ,  $R_8$ ,  $R_9$ ,  $R_{11}$  средний вывод 13, лампа  $L_{2a}$  закрыта «-» на аноде.

Во второй полупериод анодного напряжения лампы  $L_{1b}$  и  $L_{2a}$  открыта, в следствии этого разность потенциалов между точками А и В равна нулю.

При наличии сигнала на входе фазочувствительного усилителя, появляется напряжение на выходе каскада. Предположим, что с трансформатора  $Tr_1$  на управляющую сетку лампы  $L_{1a}$  подается «+» а на управляющую сетку лампы  $L_{2b}$  подается «-», тогда анодный ток через лампу  $L_{1a}$  увеличивается, а через лампу  $L_{2b}$  уменьшается, лампы  $L_{1b}$  и  $L_{2a}$  закрыты.

Во второй полупериод управляющего напряжения открываются лампы  $L_{1b}$  и  $L_{2a}$ , а лампы  $L_{1a}$  и  $L_{2b}$  закрыты. Полярность сигнала на выходе между точками А и Б не изменится. Если фаза управляющего напряжения изменится на обратную, через лампу  $L_1$  начнет протекать незначительный по величине анодный ток, а через лампу  $L_2$  большой по величине анодный ток. Полярность сигнала на выходе изменится на обратную.

## Раздел 4. Исполнительные элементы следящих систем

### § 4.1. Электрические двигатели и гидравлические машины

Электрические двигатели занимают лидирующие позиции среди силовых агрегатов различного типа оборудования, а также широко применяются в исполнительных устройствах автоматических систем управления.

**Электродвигатель** – это электротехническое изделие, основной функцией которого является преобразование электрической энергии в механическую, а именно во вращательное движение вала. Физическое действие электродвигателей основано на явлении электромагнитной индукции.

В состав электродвигателя входят статор (индуктор) и ротор (якорь), которые соответственно являются неподвижной и движущейся частью. В стандартных двигателях статор служит их наружной оболочкой, где происходит формирование неподвижных полей, обладающих магнитными свойствами. Роторная конструкция помещается внутри статора. Она включает в себя определенное число постоянных магнитов, сердечник в виде обмоток из проволоки, коллектор и щетки.

На рис. 157 проиллюстрирована работа простейшего электродвигателя, состоящего из рамки с током в магнитном поле.

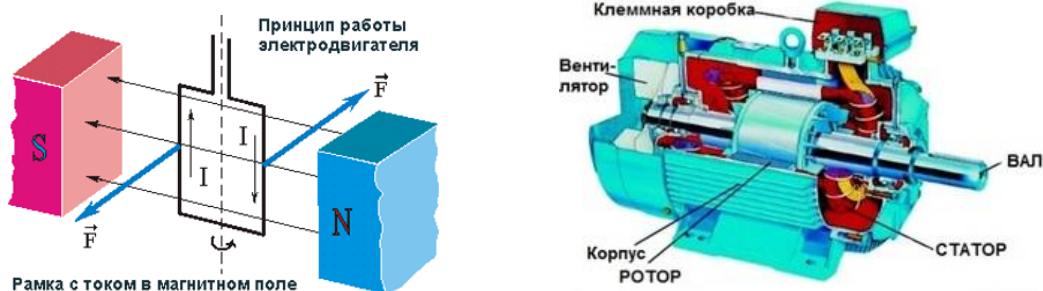


Рис. 157. Принцип работы и устройство электродвигателя

При подключении источника питания статорные и роторные поля начинают взаимодействовать между собой. Это приводит к возникновению момента вращения, вызывающего движение роторного вала агрегата. В свою очередь, энергия вращающегося вала подается к рабочему органу всего технического устройства, составной частью которого является тот или иной двигатель.

В процессе преобразования электричества в механическое движение, возникают определенные энергетические потери. Это связано с силой трения, намагничиванием сердечников, нагревом проводниковых элементов и другими факторами. На КПД электродвигателя оказывает влияние даже сопротивление воздуха деталям, находящимся в движении. Тем не менее, благодаря современным технологиям, коэффициент полезного действия современных агрегатов может достигать до 90 %. Кроме того, эти устройства отличаются экологической чистотой и высокими эксплуатационными характеристиками.

По типу электропитания различают два основных вида: двигатели переменного и постоянного тока.

**1. Электродвигатель постоянного тока** – это двигатель, работающий от источника постоянного тока. Такие двигатели обеспечивают максимально равномерное вращение вала и обладают способностью к перезагрузке. Устанавливаются в электроприводах с возможностью регулировок, где требуются высокие эксплуатационные и динамические показатели.

Одним из самых распространенных является электродвигатель постоянного тока с параллельным возбуждением. Он состоит из корпуса, якоря, вала, обмотки возбуждения, коллектора и щеток (рис. 158).

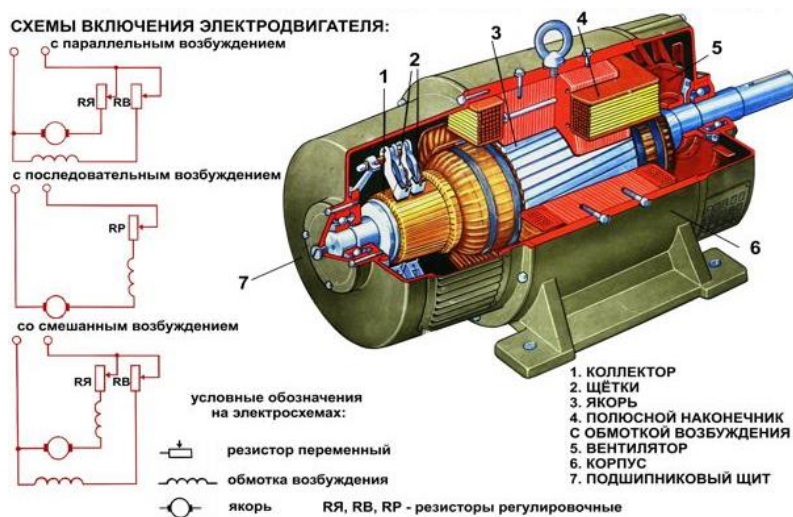


Рис. 158. Электродвигатель постоянного тока

**Корпус** представляет собой чугунную цилиндрическую конструкцию, которая защищает якорь и обмотку возбуждения от внешнего воздействия. Также он может служить как система охлаждения для двигателя. **Вал** является механической частью двигателя и служит для передачи механической энергии от двигателя к механизму, который он приводит в движение. **Якорь** представляет собой сердечник из магнитопровода, на который намотаны провода. Внутри находятся железные якорные лопасти, которые образуют полюса. На эти лопасти также намотаны провода. В результате ток проходит через провода на лопасти, создавая магнитное поле вокруг них.

**Обмотка** возбуждения находится внутри корпуса и состоит из проводов, намотанных на магнитопровод из специальных пластин. Обмотка образует электромагнит, который создает магнитное поле внутри корпуса. **Коллектор** является проводящим кольцом, на котором находятся щетки. **Щетки** по схеме контактируют с коллектором и позволяют току протекать через якорь. Обычно они сделаны из углеродного материала и имеют форму прямоугольных блоков.

Кроме схемы подключения с параллельным возбуждением применяются схемы с последовательным и смешанным подключением.

Основной действующий принцип работы электродвигателя постоянного тока состоит в следующих процессах. К обмотке возбуждения, называемой также индукторной обмоткой, осуществляется подача постоянного тока. В результате, создается постоянное магнитное поле, используемое для возбуждения. В моторах с использованием постоянных магнитов, создание поля происходит под их воздействием. Поступление постоянного тока происходит и в якорную обмотку. Здесь он попадает под влияние магнитного поля, созданного статором, создавая момент вращения. В результате такого воздействия, ротор совершает поворот на  $90^\circ$ , затем его обмотки вновь коммутируются и вращающиеся движения продолжаются.

Работа двигателя постоянного тока зависит от многих факторов. Если подключение выполнено напрямую, то во время пуска якорный ток многократно превышает номинальное значение. Для выравнивания этих величин в цепь с якорем устанавливается пусковое сопротивление, выполненное в виде реостата. Плавность в время пуска обеспечивается ступенчатой конструкцией этого устройства. На первом этапе оказываются включены все ступени и сопротивление достигает максимального значения. По мере того, как двигатель разгоняется, возникает сила, противоположная ЭДС. Она постепенно возрастает, а якорный ток снижается за счет последовательного выключения ступеней. Подача электроэнергии на якорь и обмотки возбуждения может быть отрегулирована тиристорными преобразователями, известными как приводы постоянного тока.

**2. Электродвигатель переменного тока** – это двигатель, работающий от источника переменного тока. Основным отличием этих агрегатов от других устройств считается возможность трансформации электрической энергии в механическую и обратно. Вращательное движение вызывают взаимодействующие магнитные поля. Одно из них относится к категории динамического или вращающегося, а другое считается статическим или постоянным. В результате их взаимодействия, вал электродвигателя начинает вращаться.

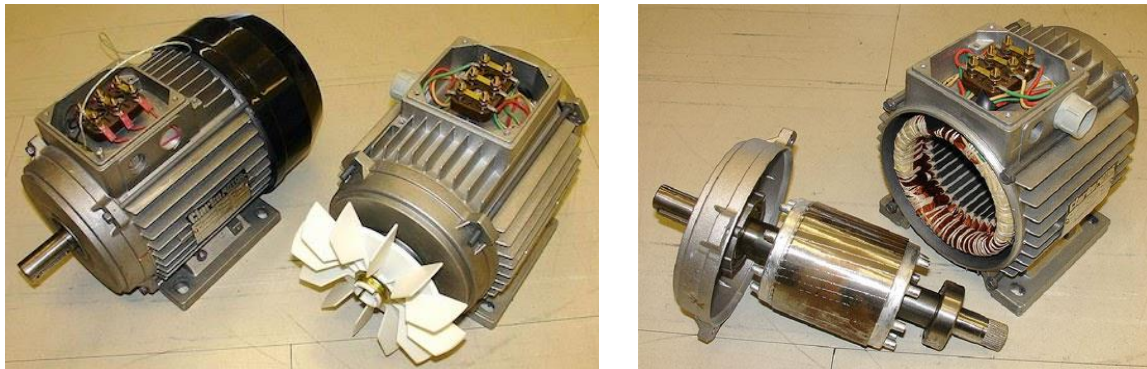


Рис. 159. Электродвигатель переменного тока

Электродвигатель переменного тока имеет статор с тремя обмотками. К каждой из них соответственно подключаются три фазы (рис. 159). Трехфазный ток характеризуется плавно изменяющимися параметрами напряжения и тока, течение которых имеет вид синусоидального графика. Максимальная мощность в обмотке плавно перетекает из одной ее точки в другую. На концах синусоиды, расположенных на максимальном удалении, значение этой мощности будет наименьшим. Когда напряжение с трех фаз подается к обмоткам статора, это приводит к образованию магнитного поля, вращающегося с такой же частотой, как и в сети, то есть, 50 Гц. Внутри статора расположен ротор, в котором также образуется магнитное поле. Оно отталкивается от поля статора и создает момент вращения. В общих чертах это принцип работы большинства аналогичных технических устройств.

Электродвигатели переменного тока разделяют на два основных типа: *синхронные* и *асинхронные*. По электропитанию различают *трех* и *однофазные*.

**1. Асинхронный электродвигатель** – это двигатель, у которого ротор вращается медленнее вращающегося магнитного поля в статоре. По устройству асинхронные двигатели делятся на двигатели с *короткозамкнутым* или *фазным* ротором.

**Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором** – является самым распространенным из электрических двигателей, применяемых в промышленности.

На статоре размещается трехфазная обмотка 6, питаемая трехфазным током (рис. 160). Начала трех фаз этой обмотки выводятся на общий щиток, укрепленный снаружи на корпусе двигателя. Собранный сердечник статора укрепляют в чугунном корпусе 7 двигателя. Вращающуюся часть – ротор 5 собирают также из отдельных листов стали. В пазы ротора закладывают медные стержни с двух сторон припаивают к медным кольцам.

**Асинхронный двигатель с фазным ротором** по устройству статора и его обмотки не отличается от двигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 161). Различие между этими двигателями заключается в устройстве ротора.

Фазный ротор имеет три фазные обмотки, соединенные между собой звездой (реже треугольником). Концы обмоток фазного ротора присоединяют к трем медным кольцам, укрепленным на валу ротора и изолированным как между собой, так и от стального сердечника ротора, вследствие чего этот двигатель получил также название двигателя с контактными кольцами.

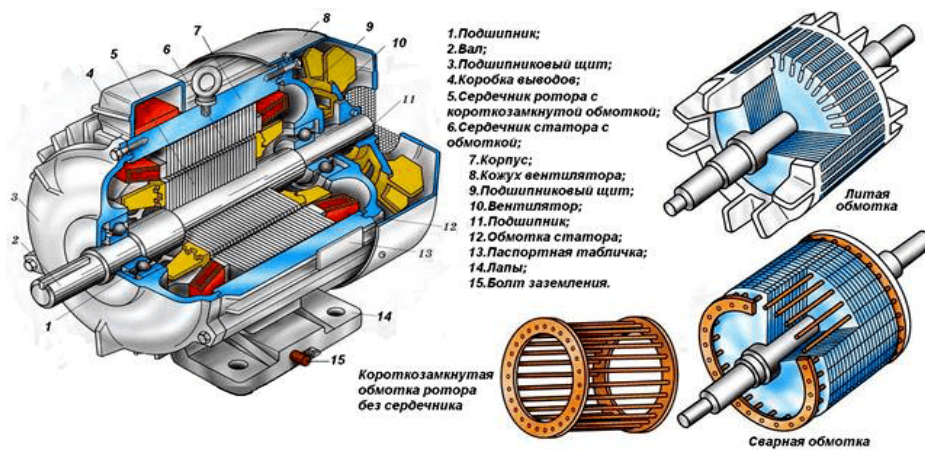


Рис. 160. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

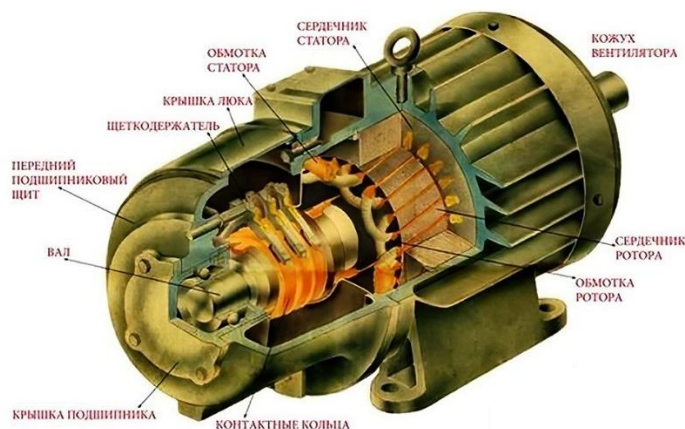


Рис. 161. Асинхронный двигатель с фазным ротором

Три кольца жестко насажены на вал ротора (через изоляционные прокладки). На кольца накладываются щетки, которые размещены в щеткодержателях, укрепленных на одной из подшипниковых крышек. Щетки, скользящие по поверхности колец ротора, все время имеют с ними хороший электрический контакт и соединены, таким образом, с обмотками ротора. Щетки соединены с трехфазным реостатом.

Основной действующий принцип работы электродвигателя переменного тока состоит в следующих процессах. Когда к обмотке трехфазного статора подается напряжение, во всех фазах возникает магнитный поток, изменяющийся с такой же частотой, как и в поступающем напряжении. У всех магнитных потоков имеется сдвиг на  $120^\circ$  по отношению друг к другу. В результате образуется общий магнитный поток, который и обеспечивает собственное вращение. Он оказывает влияние на проводники роторных обмоток и создает в них ЭДС. Образовавшийся ток начинает взаимодействовать с магнитным потоком статора, что, в результате, приводит к возникновению пускового момента электромотора. То есть, ротор устремляется к повороту в том же самом направлении, в каком осуществляется вращение магнитного поля статора. После того как пусковой момент превысит тормозной момент ротора, вал двигателя начнет вращаться.

**2. Синхронный электродвигатель** – это двигатель, у которого ротор вращается синхронно с вращающимся магнитным полем в статоре. Устройство синхронного электродвигателя немного отличается от асинхронного и включает в себя несколько ключевых компонентов для обеспечения стабильной и эффективной работы. Его основная особенность заключается в том, что скорость вращения ротора синхронизирована с частотой переменного тока подаваемого питания (рис. 162).

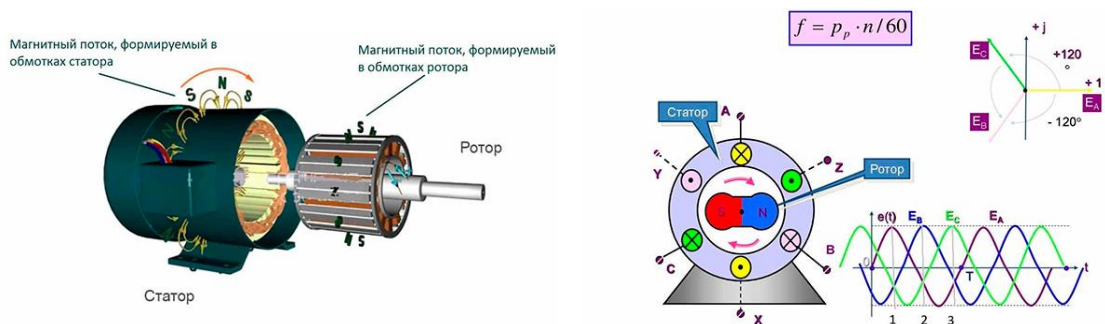


Рис. 162. Устройство и принцип работы синхронного двигателя

**Корпус (статор)** состоит из стальных ламелированных пакетов, в которые вкладываются обмотки. Обмотки статора обычно выполнены в трехфазном исполнении и размещены на определенном расстоянии друг от друга. По этим обмоткам поступает переменное напряжение, создающее магнитное поле вокруг статора. Корпус снаружи имеет кожух для охлаждения и защиты от перегрева.

**Ротор (якорь)**, выполнен в виде обмоток, намотанных на железный каркас (обмоточный тип), либо из постоянных магнитов. Концы обмоток выводятся и закрепляются на коллекторе. На коллектор или токосъемное кольцо подается напряжение посредством графитовых щеток. При этом концы обмоток размещены таким образом, что одновременно напряжение может подаваться только на одну пару. Коммутационная система позволяет подавать электрический ток на обмотки статора в нужной последовательности. Для этого используются щетки и коллекторы для устройств с обмоточным ротором.

В отличие от асинхронных на ротор синхронных двигателей напряжение подается щетками, заряжая его обмотки, а не индуцируется переменным магнитным полем. Направление тока в обмотках ротора меняется параллельно с изменением направления магнитного поля, поэтому выходной вал всегда вращается в одну сторону. Синхронные электродвигатели позволяют регулировать скорость вращения вала путем изменения значения напряжения. На практике для этого обычно используются реостаты.

Принцип работы синхронного электродвигателя основан на взаимодействии крутящегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора. Это взаимодействие обеспечивает синхронное вращение ротора с определенной скоростью, связанной с частотой переменного тока, подаваемого на статор. При работе индуктора создается магнитное поле, которое меняет свою полярность согласно частоте переменного тока. Это магнитное поле образует вращающееся поле, которое называется вращающимся магнитным полем статора (рис. 163).

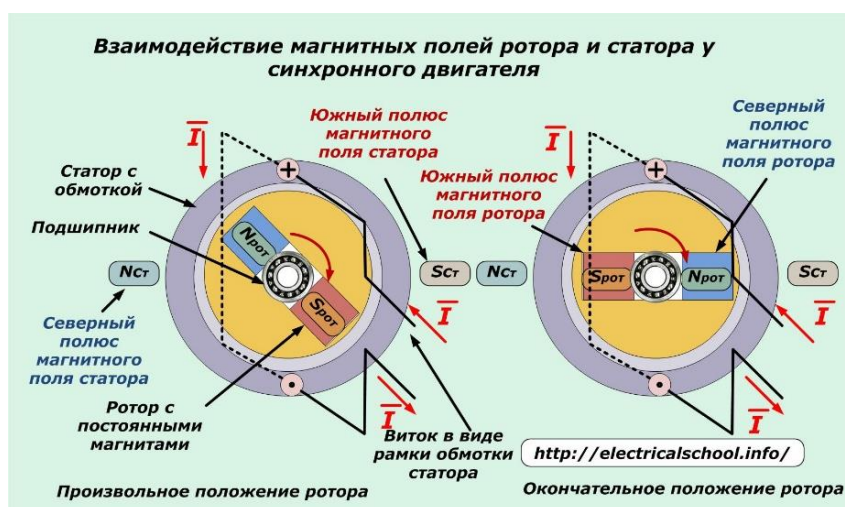


Рис. 163. Принцип работы синхронного двигателя

Ротор находится внутри вращающегося магнитного поля статора. Если он также содержит обмотки, то под воздействием вращающегося магнитного поля он начинает выстраиваться параллельно этому полю и вращаться в синхронном режиме с ним. Если ротор является постоянным магнитом, то он будет «захвачен» вращающимся полем статора.

Скорость вращения ротора определяется частотой переменного тока и числом пар полюсов. Одним из преимуществ является возможность точного управления скоростью вращения. Это достигается с помощью частотных преобразователей, которые изменяют частоту тока, подаваемого на статор, что влияет на скорость вращения ротора.

Синхронные электродвигатели являются важной частью систем электропривода, где требуется точное управление скоростью и надежная работа. Они широко применяются в силовых приводах ЗСУ-23-4 и других установках в качестве исполнительного элемента следящих систем.

**Гидравлический привод (гидропривод)** – совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством гидравлической энергии. Основными элементами гидропривода являются насос и мотор.

**Гидропривод** (рис. 164) представляет собой своего рода «гидравлическую вставку» между приводным двигателем и нагрузкой (машиной или механизмом) и выполняет те же функции, что и механическая передача (редуктор, ремённая передача, кривошипно-шатунный механизм и т. д.).

Основное назначение гидропривода, как и механической передачи – это преобразование механической характеристики приводного двигателя в соответствии с требованиями нагрузки (преобразование вида движения выходного звена двигателя, его параметров, а также регулирование, защита от перегрузок и др.).

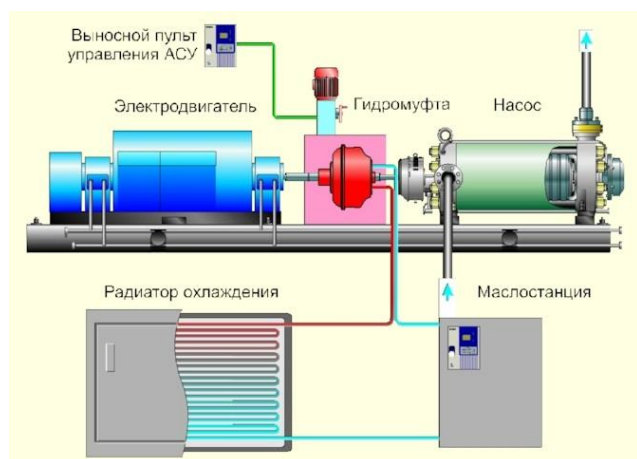


Рис. 164. Гидропривод

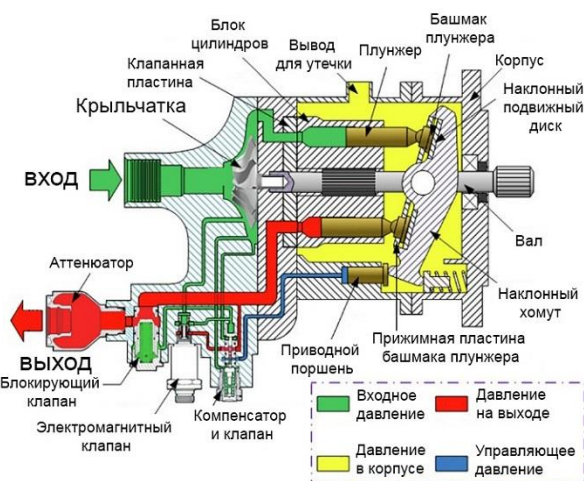


Рис. 165. Гидравлическая машина (насос-мотор)

В качестве приводного двигателя насоса применяются синхронный электродвигатель, двигатели внутреннего сгорания и другие, поэтому иногда гидропривод называется соответственно электронасосный, дизельнасосный и т. д.

**Гидронасос** служит для превращения механической энергии вращения приводного вала в энергию давления гидравлической жидкости. Насос обладает принципом обратимости. Так при подаче жидкости в гидравлику, вал приходит во вращение и насос становится **гидромотором** (рис. 165).

Принцип действия **гидромотора** состоит в следующем. Жидкость под давлением поступает в блок, изменяет объем в цилиндрах, давит на плунжеры (поршни). Головки плунжеров запрессованы в наклонном подвижном диске. Плунжеры перемещаются и вызывают вращение диска и блока, а также связанного с ними вала. Скорость вращения регулируется поворотом наклонного диска.

**Гидропривод** применяется в ЗСУ-23-4 для автоматического и полуавтоматического управления автоматической зенитной пушкой и башней.

На рис. 166 проиллюстрирована работа пары гидравлических элементов – насоса и мотора. Отклонение люльки насоса изменяет его производительность, а следовательно, и скорость вращения вала гидромотора.

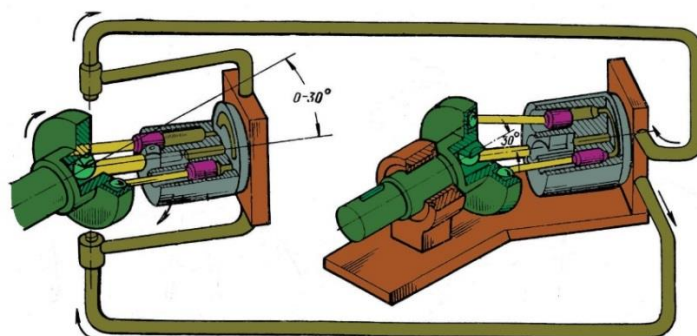


Рис. 166. Гидравлическая пара (насос-мотор)

**Гидроприводы** существуют двух типов: гидродинамические и объёмные. В гидродинамических приводах используется в основном кинетическая энергия потока жидкости. В объёмных гидроприводах используется потенциальная энергия давления рабочей жидкости. Широкое распространение в настоящее время получил объёмный гидропривод. Под объёмным гидроприводом понимается совокупность объёмных гидромашин, гидроаппаратуры и других устройств, предназначенная для передачи механической энергии и преобразования движения посредством рабочей жидкости.

Объёмной называется гидромашина, рабочий процесс которой основан на попеременном заполнении рабочей камеры жидкостью и вытеснении её из рабочей камеры. К объёмным машинам относят: поршневые насосы, аксиально-поршневые, радиально-поршневые, шестерённые гидромашин и др. Одна из особенностей, отличающая объёмный гидропривод от гидродинамического – это большие давления в гидросистемах.

**Гидропривод** обеспечивает бесступенчатое регулирование скоростей в широком диапазоне, получение больших сил и мощностей при малых размерах и весе передаточного механизма, возможность осуществления различных видов движения, возможность частых и быстрых переключений при возвратно-поступательных и вращательных прямых и реверсивных движениях, возможность равномерного распределения усилий при одновременной передаче на несколько приводов.

К основным преимуществам гидропривода относятся:

- возможность универсального преобразования механической характеристики приводного двигателя в соответствии с требованиями нагрузки, простота управления;
- простота предохранения приводного двигателя и исполнительных органов машин от перегрузок; надёжность эксплуатации;
- широкий диапазон бесступенчатого регулирования скорости выходного звена, большая передаваемая мощность на единицу массы привода, надёжная смазка трущихся поверхностей при применении масел в качестве рабочих жидкостей.

К недостаткам гидропривода относятся:

- утечки рабочей жидкости через уплотнения и зазоры при высоких давлениях;
- нагрев рабочей жидкости, что в ряде случаев требует применения специальных охлаждающих устройств и средств тепловой защиты;
- более низкий КПД, чем у сопоставимых механических передач;
- необходимость обеспечения в процессе эксплуатации чистоты рабочей жидкости и защиты от проникновения в неё воздуха;



- пожароопасность в случае применения горячей рабочей жидкости;
- зависимость вязкости рабочей жидкости, а значит и рабочих параметров гидропривода, от температуры окружающей среды.

При правильном выборе гидросхем некоторые из перечисленных недостатков гидропривода можно устранить или значительно уменьшить. Тогда преимущества гидропривода перед механическими передачами становятся существенными.

## § 4.2. Электромагнитные реле. Реле времени

### Электромагнитные реле управления

Реле – электрический аппарат, предназначенный для коммутации электрических цепей (скачкообразного изменения выходных величин) при заданных изменениях электрических или не электрических входных величин.

Все электромагнитные реле имеют общие детали конструкции, а именно: магнитную систему и систему электрических контактов. Конструкция конкретных типов реле существенно отличается друг от друга, но принцип действия остается общим:

- преобразование входного электрического сигнала в промежуточный сигнал;
- управление с помощью промежуточного сигнала контактной группой;
- наличие в контактной группе пружинного механизма самовозврата контактов в исходное состояние после отключения катушки реле от источника сигнала.

Типы реле:

1. Электромеханические (электромагнитные) реле, в которых электрическими контактами управляет электромагнит с толкателем (рис. 167).

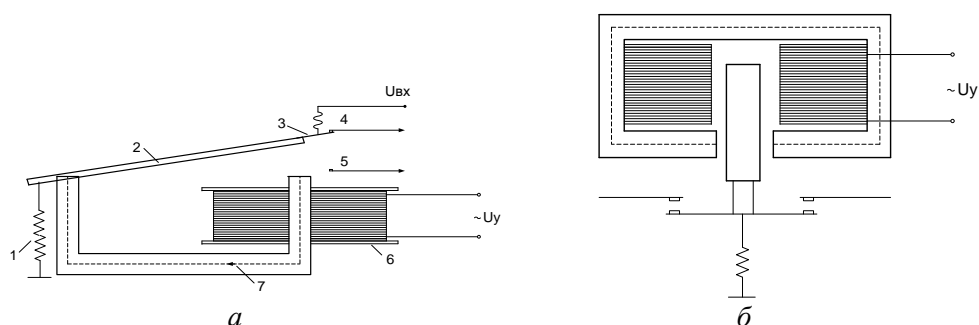


Рис. 167. Электромагнитные реле:  
а – с поворотным якорем; б – с вытяжным якорем

2. Герконовые реле (рис. 168), в которых магнитное поле катушки управления непосредственно управляет контактами, выполненными из ферромагнитного сплава.

3. Соленоидные реле, в которых вся механическая конструкция выполнена в виде соленоида с подвижным сердечником – это, как правило, очень мощные реле или контакторы.

4. Реле с вращающимся ротором, напоминающие по конструкции шаговые электродвигатели (эти реле используются там, где требуется работа при исключительно сильных вибрациях).

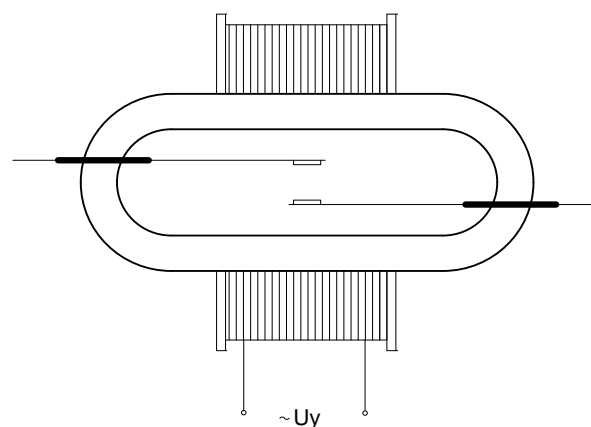


Рис. 168. Реле с герконом

## Классификация реле

Реле классифицируются по различным признакам:

- по виду входных физических величин, на которые они реагируют;
- по функциям, которые они выполняют в системах управления;
- по конструкции.

По виду физических величин различают электрические, механические, тепловые, оптические, магнитные, акустические реле.

## Устройство реле

Реле обычно состоит из трех основных функциональных элементов: воспринимающего, промежуточного и исполнительного.

Воспринимающий (первичный) элемент воспринимает контролируемую величину и преобразует её в другую физическую величину.

Промежуточный элемент сравнивает значение этой величины с заданным значением и при его превышении передает первичное воздействие на исполнительный элемент.

Исполнительный элемент осуществляет передачу воздействия от реле в управляемые цепи. Все эти элементы могут быть явно выраженными или объединёнными друг с другом. По устройству исполнительного элемента реле подразделяются на контактные и бесконтактные.

Контактные реле воздействуют на управляемую цепь с помощью электрических контактов, замкнутое или разомкнутое состояние которых позволяет обеспечить или полное замыкание, или полный механический разрыв выходной цепи.

Бесконтактные реле воздействуют на управляемую цепь путём резкого (скачкообразного) изменения параметров выходных электрических цепей (сопротивления, индуктивности, ёмкости) или изменения уровня напряжения (тока).

Основные характеристики реле определяются зависимостями между параметрами выходной и входной величины.

Различают следующие основные характеристики реле:

1. Величина срабатывания  $X_{ср}$  реле – значение параметра входной величины, при которой реле включается.

2. Мощность срабатывания  $P_{ср}$  реле – минимальная мощность, которую необходимо подвести к воспринимающему органу для перевода его из состояния покоя в рабочее состояние.

3. Управляемая мощность  $P_{упр}$  – мощность, которой управляют коммутирующие органы реле в процессе переключения.

4. Время срабатывания  $t_{ср}$  реле – промежуток времени от подачи на вход реле сигнала  $X_{ср}$  до начала воздействия на управляемую цепь.

Электромагнитные реле делятся на реле постоянного и переменного тока. Реле постоянного тока делятся на нейтральные и поляризованные.

Нейтральные реле одинаково реагируют на постоянный ток обоих направлений, протекающий по его обмотке, а поляризованные реле реагируют на полярность управляющего сигнала. Реле, по сути, выполняют роль усилителя тока, напряжения и мощности в электрической цепи.

Электромагнитное реле обладает рядом преимуществ, отсутствующих у полупроводниковых конкурентов:

- способность коммутации нагрузок мощностью до 4 кВт при объеме реле менее  $10\text{ см}^3$ ;
- устойчивость к импульсным перенапряжениям и разрушающим помехам, появляющимся при разрядах молний и в результате коммутационных процессов в высоковольтной электротехнике;
- исключительная электрическая изоляция между управляющей цепью (катушкой) и контактной группой;

- малое падение напряжения на замкнутых контактах, и, как следствие, малое выделение тепла;
- экстремально низкая цена электромагнитных реле по сравнению с полупроводниковыми ключами.

Недостатки реле – малая скорость работы, ограниченный (хотя и очень большой) электрический и механический ресурс, создание радиопомех при замыкании и размыкании контактов и, наконец, последнее и самое неприятное свойство – проблемы при коммутации индуктивных нагрузок и высоковольтных нагрузок на постоянном токе.

Реле времени (реле выдержки времени, таймер) – устройство, релейный элемент которого срабатывает с некоторой временной задержкой (от нескольких миллисекунд до нескольких часов) после получения управляющего сигнала (рис. 169). Задержку срабатывания реле можно регулировать, например, влияя на скорость изменения физической величины, воздействующей на релейный элемент.

Реле времени, как и любое реле, можно классифицировать в зависимости от физической природы входного (управляющего) и выходного сигнала.

Наибольшее применение в технике нашли электрически управляемые таймеры для коммутации электрических сигналов. Реле времени, содержащее электросхемную задержку и полупроводниковое (бесконтактное) реле может быть отнесено к статическим электрическим реле, принцип работы которых не связан с использованием относительного перемещения их механических элементов. Если схема задержки собрана на электронных элементах, то такие реле называют электронными реле времени.

Электрически управляемые реле времени для коммутации электрических сигналов классифицируются аналогично используемому релейному элементу:

- по роду тока в цепи питания (управления): постоянного тока, переменного тока, постоянного и переменного тока;
- по наличию регулировки выдержек времени: с нерегулируемыми (фиксированными) выдержками времени, с регулируемыми выдержками времени;
- по виду выходной цепи: с контактным выходом, с бесконтактным выходом;
- по устройству выходной цепи: с замыкающим, размыкающими, переключающими, перемыкающими и не перекрывающими выходами (контактами), с сочетанием замыкающих, размыкающих и переключающих выходов (контактов);
- по конструктивному исполнению корпуса реле времени: герметичные и негерметичные.

### § 4.3. Соединительные муфты

Муфты служат для соединения валов или валов с деталями, свободно вращающимися на них (зубчатыми колесами, шкивами и т. п.), с целью передачи вращения без изменения скорости.

Муфты применяют для включения и выключения исполнительного органа при непрерывно работающем двигателе, для предохранения рабочих органов от перегрузок и чрезмерно больших скоростей, для передачи движения между валами только в одном направлении, для остановки в качестве тормоза и других функций.

Муфты по управляемости передачей вращения между соединяемыми валами делят на три группы:

1. Муфты постоянные (рис. 170), осуществляющие постоянное соединение валов: глухие, компенсирующие, упругие.

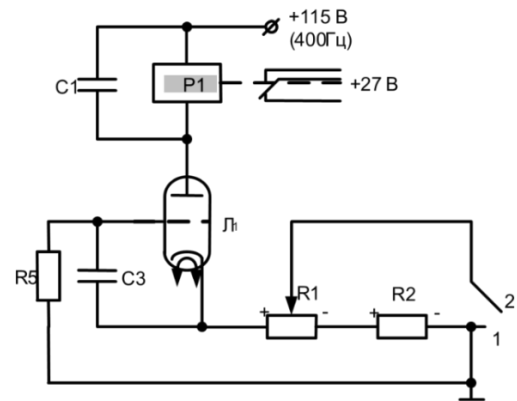


Рис. 169. Реле времени



Рис. 170. Муфты постоянные:  
а – глухая; б – компенсирующая; в – упругая

2. Муфты управляемые (рис. 171), обеспечивающие режим «включено-выключено» с помощью:

- дистанционного (электрического) управления – электромагнитные, магнитопорошковые (магнитожидкостные), пьезокристаллические;
- ручного (механического) управления – зубчатые, кулачковые, фрикционные.

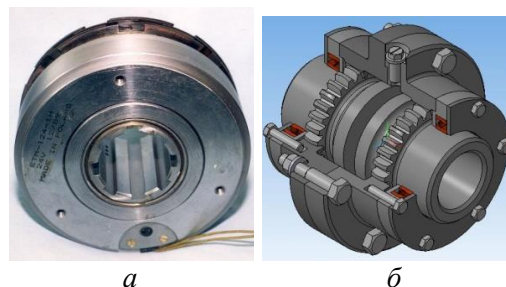


Рис. 171. Муфты управляемые:  
а – электромагнитная; б – зубчатая

3. Муфты самоуправляемые (рис. 172), осуществляющие автоматическое разъединение или соединение валов: по величине передаваемого момента – предохранительные; по скорости вращения – центробежные; по направлению вращения – обгонные.

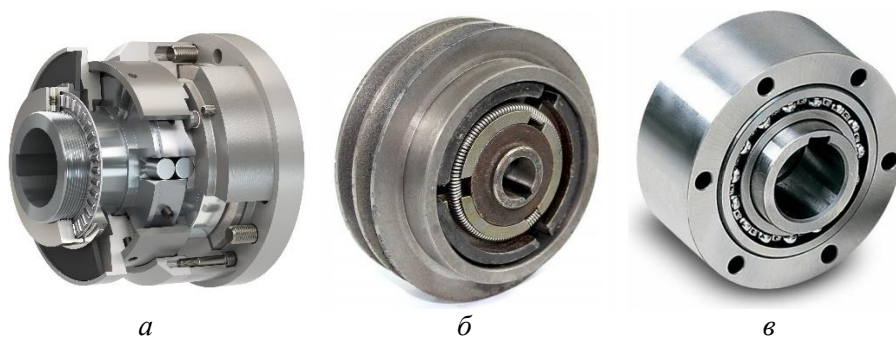


Рис. 172. Муфты самоуправляемые:  
а – предохранительная; б – центробежная; в – обгонная

Глухие жесткие муфты используют при передаче движения между соосными валами, которые должны работать как единый вал.

Компенсирующие подвижные муфты применяют при передаче движения между несоосными валами при наличии небольших радиальных, осевых, угловых или комбинированных смещений осей валов.

Упругими муфтами пользуются для смягчения толчков, динамических нагрузок при передаче вращающегося момента между валами.

Предохранительные муфты применяют во избежание поломок деталей механизма из-за перегрузок.

Обгонные муфты используют для передачи движения только в одну сторону.

## Контрольные вопросы

### Глава 1

1. Упредительное время – определение, формула.
2. Координаты положения воздушной цели – дать определение, перечислить и указать виды.
3. Перечислить характеристики зенитных орудий.
4. Параметры движения воздушной цели – дать определение, перечислить.
5. Формулы перехода в различные системы координат.
6. Определение деривации, её виды и единицы измерения.
7. Что включает ЗАК находящихся на вооружении ВС РФ.
8. Перечислить задачи обеспечиваемые РЛС РПК.
9. Последовательность решения задачи встречи снаряда с целью в СРП ЗАК.
10. Раскрыть периоды выстрела.
11. Дать определение сущности стрельбы ЗАК.
12. Состав ЗАК ЗСУ-23-4, схема.
13. Дать определение плоской зоны обстрела и указать от чего зависит её площадь.
14. Дать определение зоны досягаемости и указать чем она ограничена с внутренней и внешней сторон.
15. Дать определение зоны обстрела и указать чем она ограничена с внутренней и внешней сторон.
16. Раскрыть принцип работы ЗАК.
17. Перечислить системы координат и указать величины их образующие.
18. В чем заключается сущность стрельбы по воздушной цели.
19. Перечислить нормальные баллистические условия.
20. Кривая досягаемости – определение.
21. Исходный момент времени – определение.
22. Перечислить нормальные метеорологические условия.
23. Перечислить этапы подготовки выстрела.
24. Вывод формулы тысячной.

### Глава 2

1. Перечислить виды радиолокации и раскрыть принцип действия.
2. Принципы опознавания воздушных целей – перечислить и охарактеризовать системы опознавания.
3. Методы определения дальности до цели – перечислить, раскрыть применяемый в РПК-2.
4. Радиоволны: дать определение, написать формулу длины волны, перечислить диапазоны волн.
5. К чему сводится задача измерения дальности в импульсной РЛС.
6. Перечислить явления распределения радиоволн за пределы горизонта, принцип распространения.
7. Методы определения угловых координат – перечислить, раскрыть метод применяемый в РПК-2.
8. Структурная схема импульсной РЛС.
9. Типы линий и их конструкция.
10. Типы линий, применяемых в радиолокации.
11. Виды импульсов и электрических цепей.
12. Принцип действия двух зеркальной поляризованной антенны. Устройство зеркальной системы.

13. Виды электронной эмиссии – перечислить, охарактеризовать.
14. Перечислить и охарактеризовать – поля, действующие на электрон в магнетроне.
15. Состав приемника прямого усиления, схема.
16. Состав передатчика РЛС, схема.
17. Состав гетеродинного приёмника, схема.
18. Перечислить составные части магнетрона.
19. Виды и системы разверток – перечислить.
20. Состав индикаторного устройства РЛС работающего в импульсном режиме.
21. Перечислить параметры УПЧ.
22. Перечислить вспомогательные цепи приёмника.
23. Устройство пентода и принцип действия.
24. Устройство подогревного катода.

### **Глава 3**

1. Дать определение РЭБ.
2. Дать определение РЭЗ.
3. Перечислить составные части РЭП.
4. Дать определение ПдТСР.
5. Дать определение радиоэлектронных помех.
6. Перечислить мероприятия, входящие в ПдТСР.
7. Перечислить способы защиты РЭС от ПРР и их группы.
8. Способы обеспечения ЭМС РЭС.
9. Чем создаются искусственные пассивные помехи.
10. Ограничения технического состава для РЭС.
11. Определение ЭПР в радиолокации.
12. Чем достигается защита РЭС от преднамеренных радиопомех.
13. Направления реализации организационно-тактических мероприятий защиты РЭС.

### **Глава 4**

1. Состав следящей системы (схема).
2. Дать опр. следящей системы.
3. Элементы эл. синхронной передачи (схема).
4. Что называется синхронной передачей.
5. Способы сопровождения цели по дальности – перечислить, охарактеризовать.
6. Назначение вращающихся трансформаторов.
7. Виды систем автоматического сопровождения по направлению – перечислить, охарактеризовать.
8. Виды усилителей мощности и их назначение.
9. Система АПЧ – назначение, схема.
10. Что такое реле и его назначение, классификация.
11. Назначение муфт и их группы.
12. Устройство асинхронного электродвигателя.
13. Режимы работы эл. двигателя – перечислить, охарактеризовать.
14. Дать определение гидравлического привода.

## Заключение

Дисциплина «Основы построения зенитных артиллерийских комплексов» – составная часть военно-технической подготовки, включающая глубокое изучение студентами принципов построения зенитных артиллерийских комплексов (зенитных артиллерийских комплексов с РПК) войсковой ПВО ВС РФ.

В данном учебном пособии представлен материал для изучения основных положений радиолокации, радиотехники, автоматики, а также работы типовых радиотехнических схем и узлов, используемых в материальной части зенитных артиллерийских комплексов.

Содержание материала, изложенного в настоящем пособии, определяется Программой подготовки офицеров запаса по ВУС «Боевое применение подразделений зенитной артиллерии» и «Боевое применение подразделений, вооружённых зенитными артиллерийскими самоходными установками с радиоприборными комплексами». Изучая материал вопросов, раскрываемых в пособии, рекомендуется: пользоваться иллюстрациями, следуя соответствующим ссылкам.

## Список литературы

1. Горохов А.Ф. Стрельба зенитной артиллерии. Книга 1 / А.Ф. Горохов. – Москва : Воениздат, 1958. – 644 с.
2. Клишевич М.Я. Принципы построения зенитных комплексов / М.Я. Клишевич. – Киев: ВА ПВО СВ, 1987. – 286 с.
3. Катков Е.А. Основы радиолокационной техники. Часть 2 / Е.А. Катков, Г.С. Кромин. – Москва : Воениздат, 1959. – 465 с..
4. Слуцкий В.З. Импульсная техника и основы / В.З. Слуцкий, Б.И. Фогельсон. – Москва : Воениздат, 1975. – 440 с.
5. Учебник сержанта войск ПВО. Книга 1. – Москва : Воениздат, 2005. – 295 с.
6. Справочник по основам радиолокационной техники / под ред. В.В. Дружинина. – Москва : Воениздат, 1967. – 768 с.
7. Палий А.А. Радиоэлектронная борьба / А.А. Палий. – Москва : Воениздат, 1989. – 350 с.
8. Стригин В.В. Автоматика и вычислительная техника / В.В. Стригин. – Москва : Высшая школа, 1970. – 324 с.

Учебное издание

ПОДГОРНЫЙ Виктор Александрович  
ГАВРИЛОВ Алексей Александрович  
ЦЕЛЕБРОВСКИЙ Алексей Игоревич

## ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ЗЕНИТНЫХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*  
Дизайн обложки

Подписано к печати **xx.10.2024**. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать CANON. Усл. печ. л. 18,61. Уч.-изд. л. 16,83.  
Заказ **xxx-24**. Тираж 100 экз.

---



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ