

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 13.11.2023 14:57:00

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabb0754943d14a4851da56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
О.Г. Локтионова  
« 8 » 08 2023 г.



## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУПЕРГЕТЕРОДИННОГО ПРИЁМНИКА СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ

Методические указания  
по выполнению курсового проекта  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
по дисциплине «Радиопередающие и радиоприемные устройства»

Курск 2023

УДК 621.396

Составители: Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
заведующий кафедрой космического приборостроения и систем  
связи

*В. Г. Андронов*

**Проектирование супергетеродинного приёмника системы радиосвязи:** методические указания по выполнению курсового проекта / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Д.С. Коптев – Курск, 2023. – 35 с.

Методические указания по выполнению курсового проекта содержат исходные данные для проектирования различных радиоприёмных устройств: дискретных и непрерывных сигналов (связных), радиолокационных, радионавигационных и радиовещательных, а также методические указания по выполнению их расчета с указанием особенностей каждой группы.

Методические указания соответствуют учебному плану по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также рабочей программе дисциплины «Радиопередающие и радиоприёмные устройства».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», заочной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 08.08.2023. Формат 60x841/16.  
Усл. печ. л. 2,03. Уч.-изд. л. 1,84. Тираж 100 экз. Заказ 899. Бесплатно  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## Список основных обозначений и сокращений

$B$	– база сигнала,
$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$	– скорость распространения радиоволн,
$D$	– динамический диапазон изменения уровня сигнала,
$E_A$	– чувствительность приемника в единицах напряжения,
$F_{\Pi}$	– частота повторения импульсов,
$F_B, F_H$	– максимальная и минимальная частоты спектра передаваемого сообщения,
$\Delta f_{ДЕВ}$	– девиация частоты,
$\Delta f_{СК}$	– расстройка соседнего канала,
$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$	– постоянная Больцмана,
$k_{\Pi}$	– пик-фактор сообщения (для речи $k_{\Pi} \approx 3$ ),
$K_{СЖ}$	– коэффициент сжатия,
$n$	– число импульсов в пачке,
$P_e$	– вероятность ошибки,
$P_D$	– вероятность правильного обнаружения,
$P_F$	– вероятность ложной тревоги,
$R$	– дальность до цели,
$R_A$	– сопротивление приемной антенны,
$T$	– длительность элементарной посылки сигнала,
$\tau_{\Pi}$	– длительность зондирующего импульса,
$T_0 = 290 \text{ К}$	– стандартная температура приемника,
$V = 1/T$	– скорость передачи (символов в секунду),
$\gamma_{ВХ}$	– отношение сигнал-шум на входе детектора,
$\gamma_{ВЫХ}$	– отношение сигнал-шум на выходе детектора,
$\psi$	– индекс частотной модуляции ЧМ (ЧТ),
$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{\varphi^2}{2}\right) d\varphi$	– интеграл вероятности,
$\Pi$	– полоса пропускания линейного тракта приемника,
$\Pi_C$	– ширина спектра принимаемого сигнала, :
$\Pi_{УНЧ} \cong 1,1F_B$	– полоса пропускания тракта УНЧ,
$\Pi_{Ш} \cong 1,1\Pi$	– шумовая полоса приемника,
$\Pi$	– коэффициент шума,

АД	– амплитудный детектор,
АП	– антенный переключатель,
АРУ	– автоматическая регулировка усиления,
АМ, АТ	– амплитудная модуляция, телеграфия,
АО	– амплитудный ограничитель,
ВУ	– входное устройство,
ГФ	– гребенчатый фильтр,
Д	– детектор,
ДОФТ	– двукратная относительно фазовая телеграфия,
ДМ	– демодулятор,
И	– индикатор,
ИМ	– исполнительный механизм,
ЛА	– летательный аппарат,
МШУ	– малошумящий усилитель,
ОМ	– однополосная модуляция,
ОФТ	– относительно фазовая телеграфия,
ПУ	– пороговое устройство,
ПЧ	– преобразователь частоты,
РЛС	– радиолокационная система,
СФ	– согласованный фильтр,
СД	– синхронный детектор
УПЧ, УРЧ, УНЧ	– усилитель промежуточной частоты, радиочастоты, низкой частоты,
УФОК	– устройство формирования опорного колебания,
ФАП	– фазовая автоподстройка,
ФБП	– фильтр боковой полосы,
ФД	– фазовый детектор,
ФЗК	– фильтр зеркального канала,
ФОН, ФСС, ФНЧ	– фильтр остатка несущей, сосредоточенной селекции, нижних частот,
ЧАП	– частотная автоподстройка,
ЧД	– частотный детектор,
ЧТ, ЧМ	– частотная телеграфия, модуляция,
ЭГ	– эталонный генератор,
ЭЛТ	– электронно-лучевая трубка.

## ВВЕДЕНИЕ

Курсовое проектирование имеет следующие цели:

- закрепить и углубить теоретические знания по курсу «Радиопередающие и радиоприемные устройства»;
- привить практические навыки проектирования радиоприемных устройств различного назначения;
- развить навыки применения компьютера при решении инженерных радиотехнических задач;
- развить навыки самостоятельной работы студентов с технической литературой;
- разработать умение технически грамотно, кратко и ясно излагать принятые решения в пояснительной записке;
- способствовать изучению и применению на практике ГОСТов и других нормативных документов.

### 1. ТЕМЫ И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ

Типовые задания на курсовое проектирование содержат 100 вариантов, приведенных в таблицах 1-10. Выбор варианта производится по последним двум цифрам номера студенческого билета. В таблицах 1-3 содержатся задания на расчет связных приемников дискретных сигналов, в таблицах 4, 5 – связных приемников непрерывных сигналов, в таблицах 6-8 – радиолокационных приемников, в таблицах 9, 10 – радионавигационных и радиовещательных приемников соответственно.

Типовое задание предусматривает выбор и расчет структурной схемы всего приемника, составление его принципиальной электрической схемы, а также подробный электрический расчет отдельных каскадов. Если в приемнике предусмотрено двойное преобразование частоты, то, чтобы избежать однотипных расчетов, допустимо рассчитать тракт лишь одной промежуточной частоты (первой или второй – по выбору студента). Гетеродины приемника и усилители низкой частоты (видеоусилители) детально рассчитывать не требуется: следует лишь определить схемы, по которым они должны выполняться и усилительные приборы для них.

При расчете каскадов приемника, их оптимизации и проверке расчета целесообразно применение готовых пакетов схемотехнического проектирования Micro Cap, Electronics Workbench, PSpice, Design Center и др.

Курсовой проект должен включать в себя:

1. Титульный лист.
2. Лист задания.
3. Содержание.
4. Введение.
4. Расчет структурной схемы радиоприемного устройства.
5. Расчет принципиальных электрических схем отдельных каскадов приемника.

6. Результаты моделирования и оптимизации отдельных каскадов и систем приемника, а также радиоприемного устройства в целом, полученные с применением стандартных пакетов схемотехнического проектирования.

7. Заключение.

8. Список использованных источников.

9. Приложения.

В отдельных случаях студенту может быть выдано индивидуальное задание, связанное с проектированием перспективных приемников, разрабатываемых в настоящее время на предприятиях, с расчетом и моделированием на ЭВМ нестандартных каскадов приемника или устройств обработки радиосигналов, а также с решением некоторых вопросов исследовательского характера.

Объем курсового проекта должен составлять не менее 30 страниц машинописного текста без учёта приложений.

Требования к оформлению курсового проекта изложены в методических указаниях «Курсовая работа. Курсовой проект. Выпускная квалификационная работа» (сост.: А.А. Чуев, Д.С. Коптев; ЮЗГУ, 2023. 36 с.). *Данное методическое указание выдается студенту вместе с заданием.*

В основной части все пункты выполнения курсового проекта должны располагаться в той последовательности, которая приведена выше, иметь ту же нумерацию и те же заголовки.

Рисунки и таблицы должны быть пронумерованы и озаглавлены, на графиках должны быть четко обозначены оси координат и указаны масштабы.

При вычислениях по формулам должна приводиться исходная формула, затем та же формула с подставленными в нее численными данными, и в конце – результат вычисления.

Графики временных или спектральных диаграмм, иллюстрирующие преобразования сигнала в радиоприёмном устройстве необходимо располагать один под другим с соблюдением масштабных соотношений по осям координат.

Во введении формулируются цель, задачи, предмет и объект курсового проекта с учётом её содержания.

В заключении даётся краткий анализ полученных в каждом разделе основной части результатов.

Таблица 1 – Задания на расчет связанных приемников дискретных сигналов

Исходные данные	Вариант №									
	00	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Диапазон частот $f_{0\ min} - f_{0\ max}$ , МГц	2-30	2-24	2-16	3-18	1.5-12	3-24	1.5-6	3-15	3-30	6-12
Чувствительность $E_A$ , мкВ	1.0	1.0	2.0	1.0	3.0	1.0	8.0	1.0	2.0	1.0
Вероятность ошибки $P_e$	$10^{-2}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-4}$	$10^{-2}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
Вид модуляции	АТ	ЧТ	АТ	ОФТ	ДОФТ	ЧТ	ОФТ	ДОФТ	ЧТ	ЧТ
Избирательность по всем Каналам приёма $\sigma_{зк}, \sigma_{пр}, \sigma_{ск}$ , дБ	45	50	60	55	50	60	60	50	55	70
Расстройка соседнего канала $\Delta f_{ск}$ , кГц	0.2	0.2	0.2	1.5	1.5	1.0	0.3	0.8	3	1
Скорость телеграфирования $V$ , Бод	75	50	50	600	750	600	125	300	600	175
Индекс частотной модуляции $\psi$	–	3	–	–	–	2	–	–	5	3
Относительная нестабильность Частоты передатчика $\delta$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент регулирования АРУ	$10^3/2$	$10^3/3$	$10^3/4$	$10^4/3$	$10^5/4$	$10^4/2.5$	$10^5/3$	$10^3/2$	$10^4/3$	$10^4/4$
Сопротивление антенны $R_A$ , Ом	200	75	200	75	200	75	300	300	50	200
Сопротивление нагрузки $R_H$ , Ом	500	500	8	50	500	8	50	8	500	8
Мощность в нагрузке $P_H$ , Вт	0.4	0.2	1.1	0.5	0.4	0.6	0.3	0.5	0.2	1.0

Таблица 2 – Задания на расчет связанных приемников дискретных сигналов

Исходные данные	Вариант №									
	01	11	21	31	41	51	61	71	81	91
Диапазон частот $f_{0\ min} - f_{0\ max}$ , МГц	30-42	42-48.5	20-44	30-48.5	100-150	110-140	115-130	105-145	118-136	100-118
Чувствительность $E_A$ , мкВ	1.0	5.0	2.5	2.0	1.0	2.0	3.0	5.0	1.5	3.0
Вероятность ошибки $P_e$	$10^{-3}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$
Вид модуляции	ОФТ	ЧТ	ДОФТ	ЧТ	ДОФТ	ОФТ	ЧТ	ЧТ	ДОФТ	ОФТ
Избирательность по всем Каналам приёма $\sigma_{зк}, \sigma_{пр}, \sigma_{ск}$ , дБ	70	60	65	75	60	55	50	60	45	55
Расстройка соседнего канала $\Delta f_{ск}$ , кГц	1.5	2	1.2	1	2.5	8	15	15	15	25
Скорость телеграфирования $V$ , Бод	600	300	300	175	1200	2400	2400	4800	4800	9600
Индекс частотной модуляции $\psi$	–	6	–	4	–	–	3	3	–	–
Относительная нестабильность Частоты передатчика $\delta$	$10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$
Коэффициент регулирования АРУ	$10^5/3$	$10^3/2.5$	$10^4/2.5$	$10^5/4$	–	–	–	–	–	–
Сопротивление антенны $R_A$ , Ом	50	200	200	75	50	75	50	200	50	50
Сопротивление нагрузки $R_H$ , Ом	40	500	8	8	40	8	50	500	4	500
Мощность в нагрузке $P_H$ , Вт	0.3	0.1	0.8	0.4	0.2	1.0	0.5	0.1	2.0	0.3



Таблица 3 – Задания на расчет связанных приемников дискретных сигналов

Исходные данные	Вариант №									
	02	12	22	32	42	52	62	72	82	92
Диапазон частот $f_{0 \min} - f_{0 \max}$ , МГц	300	170-190	250-265	335	148	83-96	77 95	220	270	330
Чувствительность $E_A$ , мкВ	5.0	15.0	100.0	1.0	1.0	4.0	40.0	5.0	7.5	1.5
Вероятность ошибки $P_e$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$
Вид модуляции	ЧТ	ДОФТ	ДОФТ	ОФТ	ЧТ	ОФТ	ЧТ	ОФТ	ДОФТ	ЧТ
Избирательность по всем Каналам приёма $\sigma_{зк}, \sigma_{пр}, \sigma_{ск}$ , дБ	60	50	46	55	66	52	66	46	66	46
Расстройка соседнего канала $\Delta f_{ск}$ , кГц	5	8	8	2	1	1	1	3	8	1
Скорость телеграфирования V, Бод	1000	2400	1200	600	125	250	50	1200	2400	125
Индекс частотной модуляции $\psi$	3	–	–	–	2	–	4	–	–	4
Относительная нестабильность Частоты передатчика $\delta$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5}$
Сопротивление антенны $R_A$ , Ом	50	50	75	50	33	50	50	33	50	50
Сопротивление нагрузки $R_H$ , Ом	1	0.2	0.04	0.5	0.5	0.04	0.04	1	0.04	0.8
Мощность в нагрузке $P_H$ , Вт	0.1	1.0	1.0	0.2	0.7	0.6	1.0	1.0	0.5	0.8

Таблица 4 – Задания на расчет связанных приемников дискретных сигналов

Исходные данные	Вариант №									
	03	13	23	33	43	53	63	73	83	93
Диапазон частот $f_{0 \min} - f_{0 \max}$ , МГц	1.5-6	9.9-11.5	18-24	44-46	1.6-8	2-18	1.5-12	15.7-17.6	45-48.5	12-24
Чувствительность $E_A$ , мкВ	12.0	3.0	2.0	2.0	5.0	4.0	6.0	1.0	1.0	5.0
Отнош. С/Ш на вых. детектора $\gamma_{\text{вых}}$ , дБ	20	14	20	20	26	26	20	26	14	26
Вид модуляции	АМ	АМ	ОМ	ОМ	ОМ	ОМ	АМ	АМ	ОМ	ОМ
Избирательность $\sigma_{\text{СК}}$ , дБ при $\Delta f_{\text{СК}} = 10 \text{ кГц}$	60	70	70	50	46	60	55	46	46	60
Избирательность $\sigma_{\text{ЭК}}, \sigma_{\text{ПР}}$ , дБ	50	60	50	60	46	55	60	60	60	60
Полоса частот модуляции $F_H - F_B$ , кГц	0.3-3.4	0.3-3.2	0.3-4.0	0.3-4.0	0.3-3.4	0.3-4.5	0.3-3.2	0.3-3.4	0.2-3.8	0.3-3.6
Остаток несущей в сигнале ОМ	–	–	15%	0%	0%	10%	–	–	15%	0%
Относительная нестабильность Частоты передатчика $\delta$	$10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Сопротивление антенны $R_A$ , Ом	40	200	75	75	200	300	300	30	120	75
Емкость антенны $C_A$ , пФ	90	-	-	30	40	-	-	-	35	-
Коэффициент регулирования АРУ	$10^3/3$	$10^3/4$	$10^3/2$	$10^4/4$	$10^5/2$	$10^5/2.5$	$10^4/1.5$	$10^5/1.5$	$10^5/4$	$10^4/2$
Сопротивление нагрузки $R_H$ , Ом	8	120	64	6.5	4	16	8	10	6.5	8
Мощность в нагрузке $P_H$ , Вт	0.2	0.1	0.05	0.15	1.0	0.8	0.4	0.6	0.35	0.8

Таблица 5 – Задания на расчет связанных приемников дискретных сигналов

Исходные данные	Вариант №									
	04	14	24	34	44	54	64	74	84	94
Диапазон частот $f_{0 \min} - f_{0 \max}$ , МГц	0.5-3.0	0.5-1.5	2.0-8.0	73.5-77	77-83	62-65	136-152	152-160	143-152	118-136
Чувствительность $E_A$ , мкВ	3.0	5.0	10.0	7.0	7.0	1.0	15.0	2.5	12.0	2.5
Отнош. С/Ш на вых. детектора $\gamma_{\text{вых}}$ , дБ	20	20	14	26	40	12	40	20	40	32
Избирательность $\sigma_{\text{СК}}$ , дБ	40	60	70	54	66	70	52	70	70	46
Расстройка соседнего канала $\Delta f_{\text{СК}}$ , кГц	10	10	10	50	10	10	100	10	300	80
Избирательность $\sigma_{\text{ЭК}}, \sigma_{\text{ПР}}$ , дБ	60	70	70	60	66	70	60	60	70	46
Полоса частот модуляции $F_H - F_B$ , кГц	0.2-3.6	0.2-3.2	0.2-3.4	0.2-5.0	0.3-3.4	0.3-4.4	0.2-5.5	0.2-4.0	0.3-6.0	0.3-4.5
Вид модуляции	АМ	АМ	ОМ	ЧМ	ОМ	ОМ	ЧМ	АМ	ЧМ	ЧМ
Индекс модуляции $\psi$ , остаток несущей	–	–	0%	2	15%	10%	3	–	15	5
Относительная нестабильность Частоты передатчика $\delta$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Сопrotивление антенны $R_A$ , Ом	10	30•	300	300	50	300	75	50	300	50
Емкость антенны $C_A$ , пФ	90	45	–	–	–	–	–	–	–	–
Коэффициент регулирования АРУ	$10^5/2.5$	$10^4/1.5$	$10^5/2$	$10^3/1.5$	$10^5/1.5$	$10^4/2$	$10^5/3$	$10^4/2$	–	$10^5/2$
Сопrotивление нагрузки $R_H$ , Ом	6.5	4	12	10	16	6	4	8	12	3
Мощность в нагрузке $P_H$ , Вт	1.0	0.8	0.4	1.2	0.6	1.0	2.0	1.8	0.8	1.0

Таблица 6 – Задания на расчет связанных приемников дискретных сигналов

Исходные данные	Вариант №									
	05	15	25	35	45	55	65	75	85	95
Рабочая частота $f_c$ , Гц	$3 \cdot 10^9$	$10^{10}$	$3 \cdot 10^9$	$10^{10}$	$3 \cdot 10^9$	$10^{10}$	$3 \cdot 10^9$	$9.6 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	$2.5 \cdot 10^9$
Чувствительность $P_A$ , Вт	$10^{-13}$	$10^{-13}$	$10^{-14}$	$10^{-13}$	$10^{-13}$	$10^{-13}$	$10^{-13}$	$10^{-13}$	$10^{-14}$	$10^{-14}$
Длительность импульса $\tau_{И}$ , мкс	3	2	10	1	3	1	2	1	2	3
Частота повторения импульсов $F_{П}$ , кГц	0.5	0.75	0.4	2	0.5	2	0.75	1	0.5	0.5
Скорость полета цели $V$ , м/с	–	–	–	–	–	–	–	150	300	600
Количество импульсов, отраженных от цели	10	15	10	5	20	15	7	10	15	20
Вероятность правильного обнаружения $P_D$	0.7	0.9	0.6	0.7	0.95	0.9	0.95	0.95	0.97	0.9
Вероятность ложной тревоги $P_F$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
Вид выходного устройства	ЭЛТ	ЭЛТ	ЭЛТ	ИМ	ИМ	ЭВМ	ЭВМ	ИМ	ИМ	ЭЛТ
Выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ , В	50	40	30	5	5	3	3	5	5	50
Сопrotивление нагрузки $R_H$ , кОм	0.07	0,07	0.07	5	5	1	1	5	5	0.07
Емкость нагрузки $C_H$ , пФ	50	50	50	15	15	20	25	15	15	50

Примечания:

- ✓ избирательность по зеркальному каналу  $\sigma_{зк} \geq 40\text{дБ}$
- ✓ коэффициент прямоугольности  $K_{П} \leq 2$  при  $\sigma_{СК} \geq 40\text{дБ}$ .

Таблица 7 – Задания на расчет связанных приемников дискретных сигналов

Исходные данные	Вариант №									
	06	16	26	36	46	56	66	76	86	96
Рабочая частота $f_C$ , Гц	$3 \cdot 10^9$	$9.6 \cdot 10^9$	$2.5 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	$10^{10}$	$9.6 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	$10^{10}$	$9.6 \cdot 10^9$
Чувствительность $P_A$ , Вт	$10^{-13}$	$10^{-13}$	$10^{-14}$	$10^{-13}$	$10^{-14}$	$10^{-15}$	$10^{-15}$	$10^{-15}$	$10^{-16}$	$10^{-15}$
Длительность импульса $\tau_{И}$ , мкс	0.5	0.5	2	1	5	50	400	75	500	200
База сигнала В	–	–	–	–	5	10	20	15	10	20
Частота повторения импульсов $F_{П}$ , кГц	2	1	0.5	0.5	0.5	1	2	0.5	1	2
Скорость полета цели V, м/с	150	300	600	500	–	–	–	–	–	–
Количество импульсов, отраженных от цели	10	15	20	10	10	15	10	10	15	5
Вероятность правильного обнаружения $P_D$	0.95	0.97	0.9	0.95	0.95	0.99	0.9	0.95	0.99	0.9
Вероятность ложной тревоги $P_F$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
Вид выходного устройства	ЭЛТ	ЭЛТ	ЭВМ	ЭВМ	ЭЛТ	ЭЛТ	ИМ	ИМ	ЭВМ	ЭВМ
Выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ , В	45	30	3	3	30	45	5	5	3	3
Сопrotивление нагрузки $R_H$ , кОм	0.07	0.07	1	1	0.07	0.07	5	5	1	1
Емкость нагрузки $C_H$ , пФ	50	50	25	25	50	50	15	15	25	25

Примечания:

- ✓ избирательность по зеркальному каналу  $\sigma_{зк} \geq 40\text{дБ}$
- ✓ коэффициент прямоугольности  $K_{П} \leq 2$  при  $\sigma_{ск} \geq 40\text{дБ}$ .

Таблица 8 – Задания на расчет связанных приемников дискретных сигналов

Исходные данные	Вариант №									
	07	17	27	37	47	57	67	77	87	97
Рабочая частота $f_C$ , Гц	$9 \cdot 10^9$	$10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$	$10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$	$10^{10}$
Чувствительность $P_A$ , Вт	$10^{-13}$	$10^{-14}$	$10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-14}$
Длительность импульса $\tau_{И}$ , мкс	0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2	0.5
Частота повторения импульсов $F_{П}$ , кГц	1	0.5	0.75	1	2	1	0.5	0.75	1	2
Скорость полета цели $V$ , м/с	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600
Количество импульсов, отраженных от цели	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30
Вероятность правильного обнаружения $P_D$	0.9	0.85	0.99	0.8	0.9	0.95	0.8	0.95	0.9	0.99
Вероятность ложной тревоги $P_F$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$
Вид выходного устройства	ЭЛП	ЭВМ	ИМ	ЭЛТ	ЭВМ	ИМ	ЭЛТ	ЭВМ	ИМ	ЭВМ
Выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ , В	45	3	5	35	3	10	40	5	15	3
Сопrotивление нагрузки $R_H$ , кОм	0.07	1	5	0.07	1	1	0.07	2	3	1
Емкость нагрузки $C_H$ , пФ	50	25	15	50	25	10	50	50	15	25

Примечания:

- ✓ избирательность по зеркальному каналу  $\sigma_{зк} \geq 40\text{дБ}$
- ✓ коэффициент прямоугольности  $K_{П} \leq 2$  при  $\sigma_{СК} \geq 40\text{дБ}$ .

Таблица 9 – Задания на расчет связанных приемников дискретных сигналов

Исходные данные	Вариант №									
	08	18	28	38	48	58	68	78	88	98
Назначение приемника	Глиссадный					Курсовой				
Рабочая частота $f_c$ , МГц	300	300	300	300	300	100	100	100	100	100
Чувствительность $E_A$ , мкВ	2.0	3.0	2.0	5.0	2.0	3.0	5.0	8.0	2.0	3
Ошибка пеленгования $\sigma_0$ , град	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Первая частота модуляции $F_1$ , Гц	100	100	100	100	100	90	90	90	90	90
Вторая частота модуляции $F_2$ , Гц	200	200	200	200	200	150	150	150	150	150
Избирательность по всем побочным каналам $\sigma_{зк}, \sigma_{пр}$ , дБ при $\Delta f_{ск} = 10\text{кГц}$	40	50	60	65	40	45	50	55	60	60
Относительная нестабильность Частоты передатчика $\delta$	$2 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5}$
Сопротивление антенны $R_A$ , Ом	50	75	50	150	50	75	150	300	33	50
Сопротивление нагрузки $R_H$ , кОм	1	2	1.5	2.4	1.2	2	2.7	1.3	2.2	1.6
Выходное напряжение $U_{вых}$ , В	0.25	0.5	0.7	1.0	0.5	1.0	1.5	0.8	1.4	0.9

Таблица 10 – Задания на расчет связанных приемников дискретных сигналов

Исходные данные	Вариант №									
	09	19	29	39	49	59	69	79	89	99
Вид модуляции	АМ		АМ		АМ		ЧМ		ЧМ	
Диапазон частот $f_{0\ min} - f_{0\ max}$ , МГц	0.148-0.285		0.525-1.607		3.95-12.1		65.8-74.0		100-108	
Полоса частот модуляции $F_H - F_B$ , Гц	31.5-6300	80-4000	50-4000	125-4000	80-4000	200-3500	20-15000	31.5-15000	20-15000	31.5-15000
Чувствительность $E_A$ , мкВ при отношении с/ш на выходе детектора $\gamma_{\text{ВЫХ}} = 20\text{дБ}$ (АМ) или $\gamma_{\text{ВЫХ}} = 26\text{дБ}$ (ЧМ)	50.0	100.0	100.0	150.0	150.0	200.0	40.0	30.0	40.0	30.0
Избирательность по соседнему каналу $\sigma_{\text{СК}}$ , дБ	56	56	40	40	36	36	20	20	20	20
Расстройка соседнего канала $\Delta f_{\text{СК}}$ , кГц	9	9	9	9	9	9	120	120	120	120
Избирательность по зеркальному каналу $\sigma_{\text{ЗК}}$ , дБ	66	60	36	36	12	12	60	50	42	50
Избирательность по каналу промежуточной частоты $\sigma_{\text{пр}}$ , дБ	40	34	34	30	34	26	60	60	50	60
Коэффициент регулирования АРУ, дБ/дБ	60/10	60/10	46/10	40/10	40/10	40/10	–	–	–	–
Выходная мощность $P_H$ , Вт	0.2	0.1	0.05	1.2	1.0	0.8	0.4	2.0	0.8	0.8



## 2. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ РАДИОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

Задача эскизного расчета состоит в выборе наиболее простой структурной схемы радиоприемного устройства, реализующей требования технического задания. Исходные данные (табл.1-10) выбраны таким образом, что все приемники могут быть выполнены по супергетеродинной схеме с однократным или двойным преобразованием частоты.

Эскизный расчет РПУ включает в себя следующие этапы:

1. Разбивка диапазона рабочих частот на поддиапазоны и выбор элементов настройки избирательных цепей приемника.
2. Расчет необходимой полосы пропускания линейного тракта приемника.
3. Выбор промежуточной частоты (ряд стандартных значений промежуточной частоты: 0,11; 0,465; 0,9; 1,6; 6,5; 8,4; 10,7; 30,0; 35,0; 60,0; 100,0 МГц).
4. Выбор структур преселектора и УПЧ с точки зрения обеспечения требуемой избирательности.
5. Выбор усилительных приборов и вычисление их  $Y$ -параметров
6. Определение типа детектора (когерентный или некогерентный).
7. Нахождение максимально допустимого коэффициента шума.
8. Определение структуры преселектора с точки зрения обеспечения необходимого коэффициента шума.
9. Расчет коэффициента усиления приемника по трактам высокой, промежуточной и низкой частот и определение числа каскадов в этих трактах.
10. Выбор схем ручных и автоматических регулировок.
11. Определение числа каскадов, охватываемых системой АРУ.

В процессе эскизного расчета должны быть определены исходные требования к отдельным каскадам приемника, необходимые и достаточные для их электрического расчета. Такими исходными требованиями, общими для всех каскадов приемника, являются:

- вид избирательных систем, их конструктивные и эквивалентные затухания для ВУ, УРЧ и УПЧ;
- тип усилительных приборов и схемы построения каскадов УРЧ, ПЧ, УПЧ и УНЧ;
- коэффициент шума ВУ, УРЧ, ПЧ;
- коэффициент передачи (усиления) ВУ, УРЧ, ПЧ, УПЧ; УНЧ;
- избирательность по зеркальному каналу и каналу прямого прохождения промежуточной частоты ВУ, УРЧ;
- избирательность по соседнему каналу УПЧ.

Расчет структурной схемы РПУ целесообразно вести в соответствии

с методикой, приведенной в [1,2]. Ниже рассмотрены особенности расчета РПУ, дополняющие материал, изложенный в [1,2].

## 2.1. Особенности расчета связных РПУ дискретных сигналов

Полоса пропускания линейного тракта  $\Pi = \Pi_C + \Pi_{HC}$  определяется шириной спектра радиосигнала  $\Pi_C$  и запасом  $\Pi_{HC}$  на нестабильности частот сигнала и гетеродинов приемника, на несопряжение настроек контуров преселектора и гетеродина, на доплеровский сдвиг частоты и т.д.

Ширина спектра сигнала зависит от вида дискретного сигнала и вычисляется следующим образом:

$$\begin{cases} 3V & \text{— для сигналов АТ, ОФТ, ДОФТ} \\ (\psi + 3/2)V & \text{— для сигналов ЧТ.} \end{cases} \quad (1)$$

Запас полосы  $\Pi_{HC}$  определяется в соответствии с [1,2]. Нахождение максимально допустимого коэффициента шума приемника производится по формуле

$$Ш \leq E_A^2 / (4\gamma_{BX}^2 kT_0 \Pi_{Ш} R_A) \quad (2)$$

где  $\gamma_{BX}$  — отношение сигнал-шум на входе детектора, определяемое заданной вероятностью ошибки и схемой детектора (когерентный или некогерентный). Необходимо учесть, что при приеме сигналов АТ и ЧТ когерентное детектирование практически не используется, а при приеме сигналов ОФТ и ДОФТ нашли применение как когерентные, так и некогерентные (автокорреляционные) детекторы.

Отношение сигнал-шум  $\gamma_{BX}$  может быть получено из зависимости  $P_B = P_B(\gamma_{BX})$ , представленной на рисунке 1, или вычислено в соответствии с выражениями (3-8), полученными при условии, что символы, поступающие на вход РПУ, равновероятны и независимы.

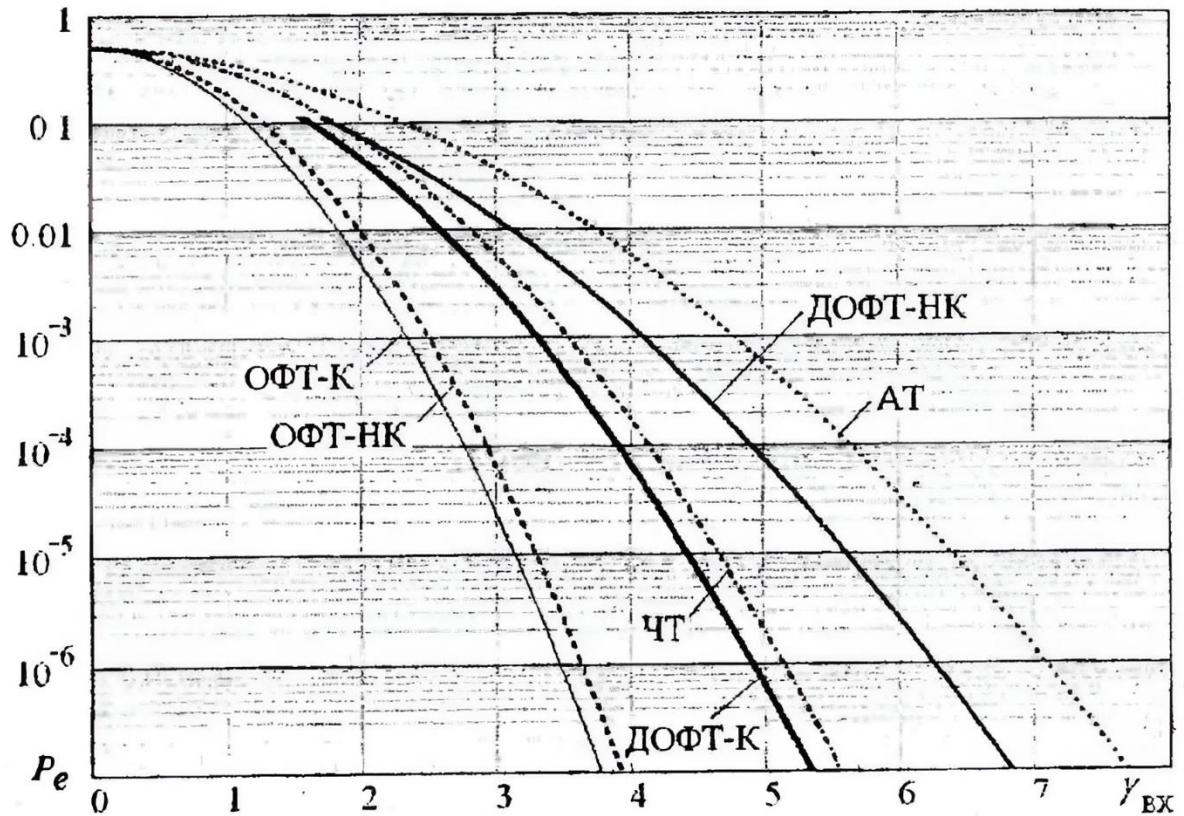


Рисунок 1 – Отношение сигнал-шум  $\gamma_{BX}$  из зависимости  $P_B = P_B(\gamma_{BX})$

Аналитические выражения, описывающие зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал-шум на входе детектора для различного вида дискретных сигналов, следующие [8]:

– для сигналов АТ при некогерентном приеме

$$P_{eAT} = 0,5 \left[ 1 - Q(\sqrt{2}\gamma_{BX}, b_0) \right] + 0,5 \exp(-b_0^2 / 2), \quad (3)$$

где  $b_0 = \sqrt{2 + \gamma_{BX}^2} / 2$ ,  $Q(\alpha, \beta) = \int_{\beta}^{\infty} t I_0(\alpha t) \exp[-(t^2 + \alpha^2) / 2] \cdot dt$  – функция,

представляющая собой дополнение до 1 интегральной функции распределения Райса,  $I_0(\cdot)$  – модифицированная функция Бесселя [8];

для сигналов ЧТ при некогерентном приеме

$$P_{eЧТ} = 0,5 \exp(-\gamma_{BX}^2 / 2), \quad (4)$$

– для сигналов ОФТ:

а) при некогерентном приеме по методу “сравнения фаз”

$$P_{eОФТ_{НК}} = 0,5 \exp(-\gamma_{BX}^2), \quad (5)$$

б) при когерентном приеме по методу “сравнения полярностей”

$$P_{eОФТ_{К}} = 2 \left[ 0,25 - \Phi^2(\sqrt{2}\gamma_{BX}) \right], \quad (6)$$

– для сигналов ДОФТ:

а) при некогерентном приеме

$$P_{eДОФТ_{нк}} = Q\left(\gamma_{ВХ} \sqrt{1-1/\sqrt{2}}; \gamma_{ВХ} \sqrt{1-1/\sqrt{2}}\right) - 0,5 \exp(-\gamma_{ВХ}^2) I_0(\gamma_{ВХ}^2 / \sqrt{2}); \quad (7)$$

б) при когерентном приеме

$$P_{eДОФТ_{к}} = 2\left[0,25 - \Phi^2(\gamma_{ВХ})\right], \quad (8)$$

Структурные схемы некогерентных детекторов сигналов АТ и ЧТ очевидны – это "обычный" АД (например, диодный или на других нелинейных элементах) и ЧД (с настроенными или расстроенными контурами и т.д.) [1,2]. Структурные схемы когерентного (а) и некогерентного (б) детекторов сигналов ОФТ приведены на рисунке 2. На этом рисунке ПУ – пороговое устройство с нулевым порогом. В схемы входят также переключатель и линия задержки на время  $T = 1/V$ .

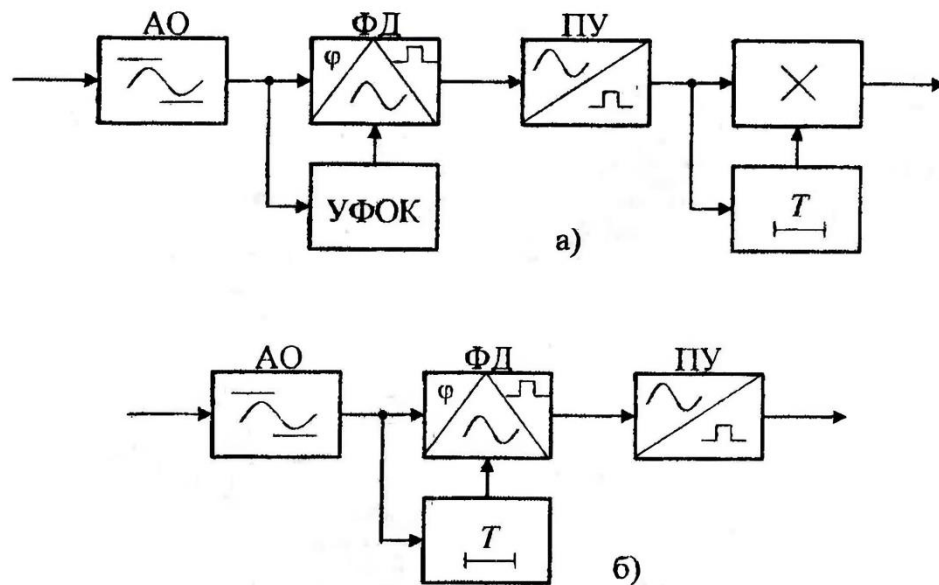


Рис.2

Рисунок 2 – Структурные схемы когерентного (а) и некогерентного (б) детекторов сигналов ОФТ.

В некогерентном детекторе (рисунок 2б) линия задержки и перемножитель (ФД) должны работать на промежуточной частоте. При проектировании следует иметь в виду, что этот детектор будет работать лишь при правильном выборе промежуточной частоты: на длительности элементарной посылки должно укладываться целое число периодов этой частоты, т.е.  $T = K / f_{пр}$ .

В когерентном детекторе (схема "сравнения полярностей" – рисунок 2а) –промежуточная частота и длительность элементарной посылки не связаны. В когерентном детекторе линия задержки и перемножитель легко реализуется с помощью логических микро- схем (D-триггер и схема "И").

Построение структурных схем детекторов сигналов ДОФТ зависит от вида, применяемого в системе манипуляционного кода. При курсовом проектировании будем использовать код, заданный табл. 11.

Таблица 11 – Манипуляционный код.

Передаваемые пары символов	Разность фаз на соседних тактовых интервалах
00	$\pi/4$
01	$3\pi/4$
10	$5\pi/4$
11	$7\pi/4$

Структурные схемы когерентного и некогерентного демодуляторов сигналов ДОФТ приведены на рисунке 3а) и рисунке 3б) соответственно. Эти демодуляторы строятся из тех же элементов, что и демодуляторы сигналов ОФТ (рисунок 2), кроме них в схемы входят фазовращатели на угол  $\pi/2$ . Для правильной работы демодуляторов, изображенных на рисунке 2 б) и рисунке 3 б), на длительности элементарной посылки должно укладываться целое число периодов промежуточной частоты.

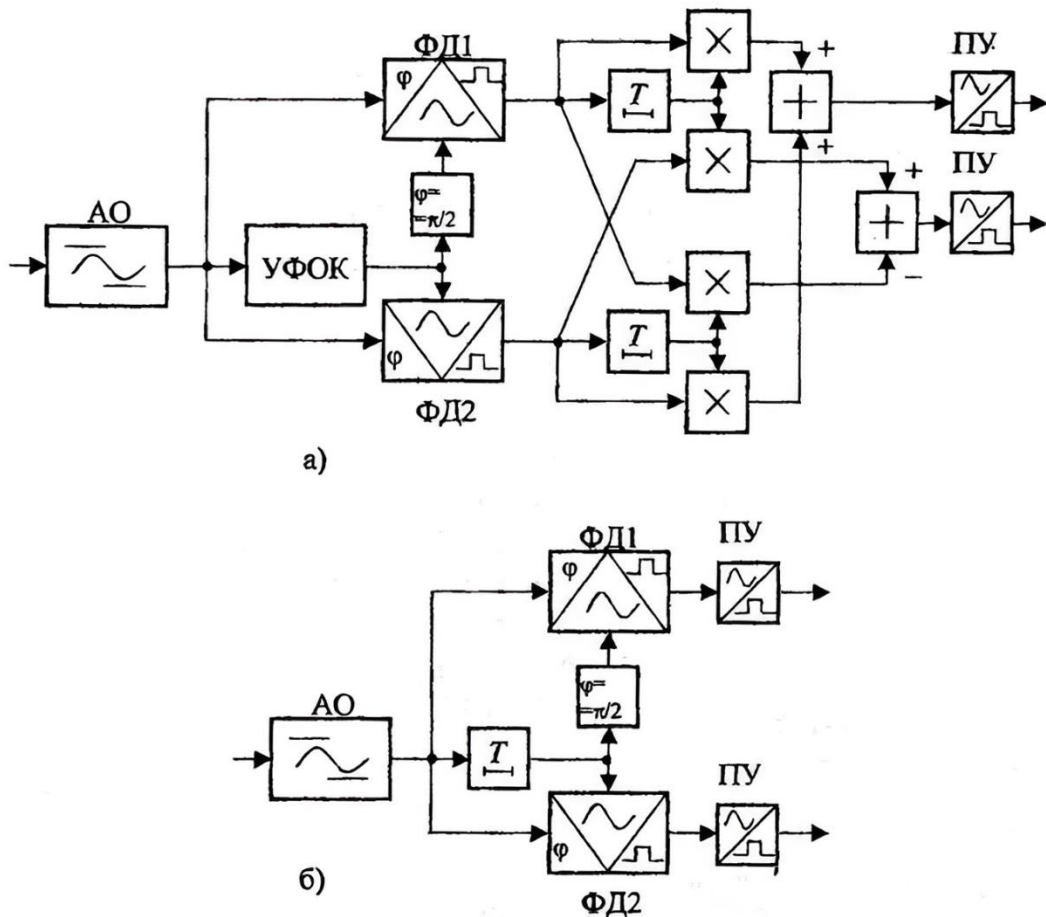


Рисунок 3 - Структурные схемы когерентного (а) и некогерентного (б) демодуляторов сигналов ДОФТ

## 2.2 Особенности расчета связных РПУ непрерывных сигналов

Проектирование РПУ сигналов АМ подробно изложено в [1,2]. Ниже рассмотрены некоторые специальные вопросы, возникающие при проектировании приемников с однополосной (ОМ) и частотной (ЧМ) модуляцией.

При проектировании РПУ с ОМ следует иметь в виду, что нестабильность частот передатчика и гетеродина (или гетеродинов) приемника влияет не только на полосу пропускания линейного тракта, но и на разборчивость принимаемых речевых сообщений. Экспериментально установлено, что при больших отношениях сигнал-шум на входе детектора (например,  $\gamma_{ВХ} \geq 20\text{дБ}$ )

удовлетворительное качество приема обеспечивается, если суммарная нестабильность частот не превышает 150...200 Гц; при отношении сигнал-шум порядка 12 дБ допускается расстройка не более 50...100 Гц. Поэтому при работе по радиоканалам с большими нестабильностями частоты используются

сигналы ОМ с не полностью подавленной несущей; по остатку несущей работает система ФАПЧ (для компенсации уходов частоты). Одна из возможных схем приемников сигналов ОМ с не полностью подавленной несущей приведена на рисунке 4, где ФОН – фильтр остатка несущей, ФБП – фильтр боковой полосы.

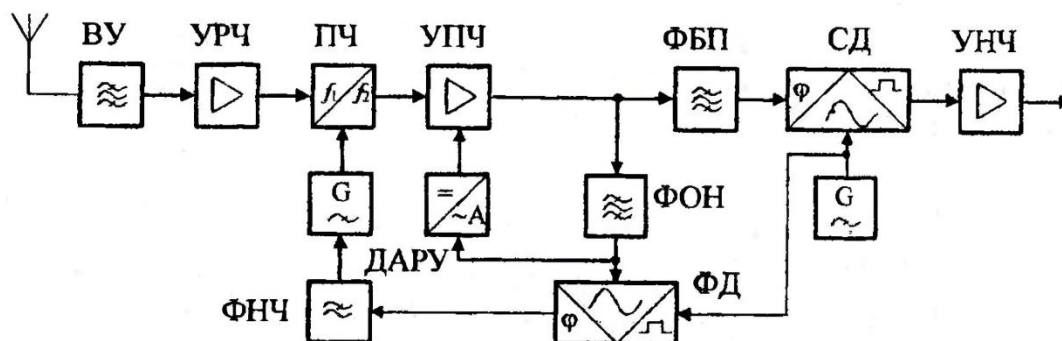


Рис.4

Рисунок 4 - Схема приемника сигналов ОМ с не полностью подавленной несущей.

Детектирование сигнала ОМ осуществляется в синхронном детекторе, состоящем из перемножителя и ФНЧ. Функцию синхронного детектора в схеме выполняет ФД, не имеющий ограничителя на входе и, таким образом, реагирующий как на амплитуду, так и на фазу проходящего на него колебания боковой полосы. Опорное колебание для работы СД создается отдельным генератором, а для того, чтобы расхождение частот сигнала и этого генератора не выходило за указанные выше пределы, в схеме присутствует система ФАПЧ, подстраивающая частоту гетеродина.

В связи с тем, что боковая полоса частот сигнала ОМ не излучается в паузах речи, целесообразно автоматическую регулировку усиления (АРУ) осуществлять по остатку несущей (он излучается постоянно), как это отражено на рисунке 4.

В том случае, если взаимные уходы частот передатчика и гетеродинов приемника невелики и не превышают 150-200 Гц, используются сигналы ОМ с полностью подавленной несущей. При детектировании таких сигналов в качестве опорного генератора в приемнике можно использовать высокостабильный генератор без подстройки его частоты. Типовая структурная схема подобного приемника приведена на рисунке 5, где ЭГ - автономный высокостабильный эталонный генератор, от которого синхронизируется гетеродин приемника и опорный генератор синхронного детектора.



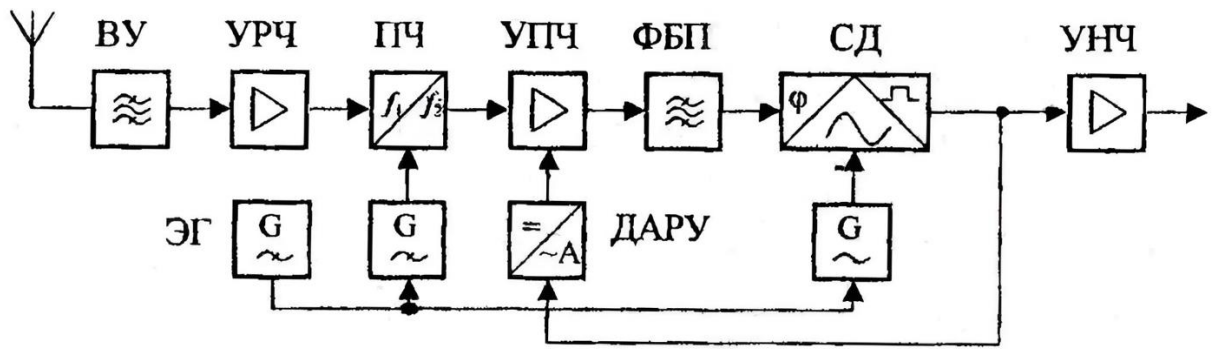


Рисунок 5 - Типовая структурная схема приемника

Система АРУ в этой схеме приемника работает по сигналу. Поскольку в паузах речи сигнал не излучается, для сохранения коэффициента усиления линейного тракта постоянная времени разряда фильтра АРУ должна быть большой ( $\tau_{разр} \geq 10c$ ), а постоянная времени заряда – маленькой ( $\tau_{зар} \leq 0,1c$ ).

При расчете полосы пропускания РПУ следует учесть, что ширина спектра сигнала составляет:

– при приеме сигналов с ОМ с остатком несущей

$$P_C \cong F_B, \quad (9)$$

– при приеме сигналов с ОМ с полностью подавленной несущей

$$P_C \cong F_B - F_H, \quad (10)$$

Вычисляя коэффициент шума приемника сигналов ОМ (2), необходимо иметь в виду следующее. При построении приемника по схеме рисунка 4 (с точным фазированием опорного колебания с принимаемым сигналом)  $\gamma_{ВХ} = \gamma_{ВЫХ} / 2$ . При автономном генерировании опорного колебания (схема рисунок 5)  $\gamma_{ВХ} = \gamma_{ВЫХ}$ .

При расчете приемников сигналов ЧМ следует обратить внимание на вычисление допустимого коэффициента шума (2), предварительно рассчитав по формуле [1]

$$\gamma_{ВХ} = \gamma_{ВЫХ} k_{П} \sqrt{P_{УНЧ} / P_{Ш}} / \sqrt{3\psi} \quad (11)$$

Где  $k_{П} = \sqrt{2}$  – пик-фактор сигнала ЧМ. Формула (11) верна при  $\gamma_{ВЫХ} \geq 10дБ$ .

При расчете по формуле (11) величина  $\gamma_{ВХ}$  может оказаться слишком большой, а допустимый коэффициент шума приемника (2) - недостижимо малым. Преодолеть эту трудность позволяет применение следящих модуляторов. Их положительный эффект обусловлен тем, что они следят за текущим спектром сигнала ЧМ, который оказывается весьма узким. Это позволяет выполнить линейный тракт РПУ узкополосным и, следовательно, работать при более низких отношениях сигнал-шум на входе демодулятора, т.е. понизить порог помехоустойчивости. Можно считать, что применение следящего демодулятора позволяет уменьшить величину  $\gamma_{ВХ}$  в  $\sqrt{\psi}$  раз при



одной и той же величине  $\gamma_{\text{ВЫХ}}$  [1].

Наибольшее распространение нашли демодуляторы с обратной связью по частоте (рисунок 6) и синхронно-фазовые детекторы (рисунок 7).

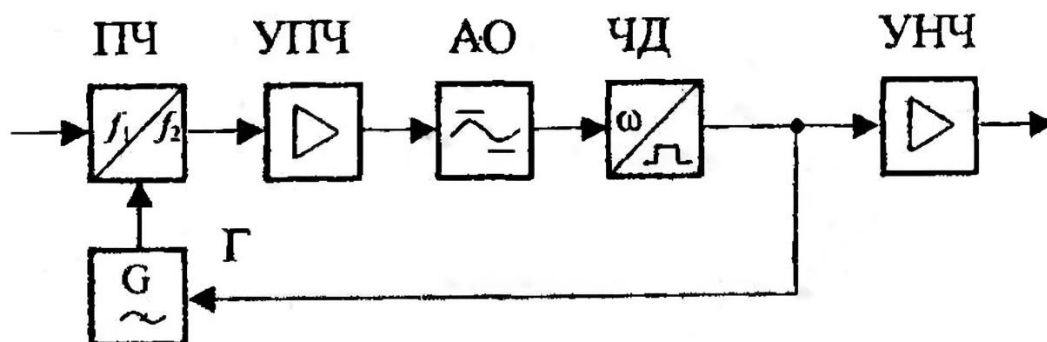


Рисунок 6 – Демодуляторы с обратной связью по частоте.

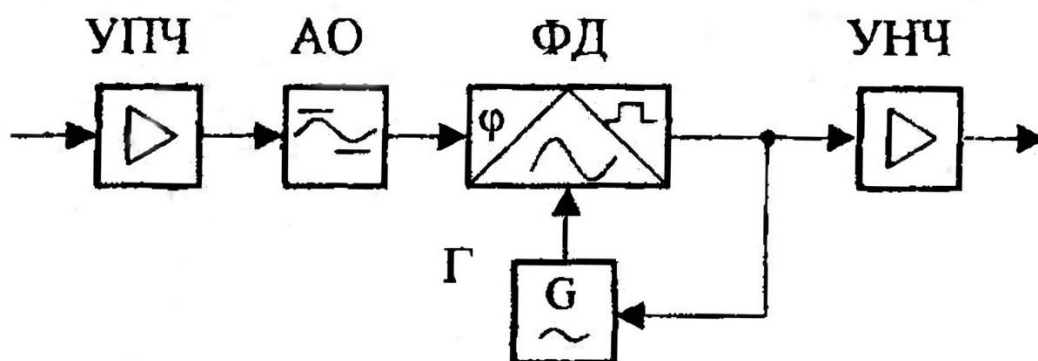


Рисунок 7 – Синхронно-фазовые детекторы.

Эти демодуляторы построены на основе ЧАП (рисунок 6) и ФАП (рисунок 7) с той лишь особенностью, что в цепи обратной связи отсутствует фильтр. Именно это позволяет демодуляторам следить за мгновенной частотой сигнала ЧМ. Методика расчета систем ЧАП и ФАП приведена в [1,2].

### 2.3. Особенности расчета радиолокационных приемников

Задания на проектирование радиолокационных приемников (таблицы 6-8) разработаны для импульсных РЛС обнаружения. Такие РЛС имеют широкое распространение и характеризуются относительной простотой технических решений.

При импульсном режиме работы облучение цели производится не одним импульсом, а последовательностью из  $n$  импульсов, т.е. пачкой. Пачка излучаемых (зондирующих) импульсов может быть когерентной или некогерентной.

В некогерентной РЛС излучение производится пачкой некогерентных зондирующих импульсов, то есть импульсов, значения начальных фаз которых случайны и взаимонезависимы. По отраженному от цели сигналу в некогерентном приемнике РЛС возможно оценить только дальность и угловое положение цели, определить ее скорость невозможно. Если в техническом задании на курсовой проект не задана скорость цели, следует проектировать некогерентный радиолокационный приемник:

Упрощенная структурная схема одного канала некогерентного приемника изображена на рисунке 8 [3,5].

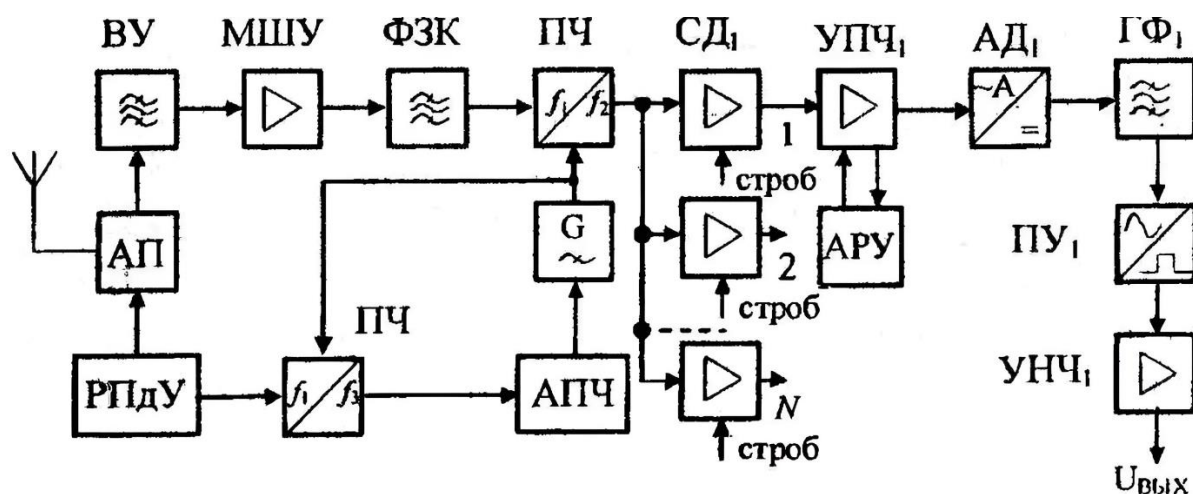


Рисунок 8 - Упрощенная структурная схема одного канала некогерентного приемника

Отраженные от цели сигналы поступают на вход приемника от антенного переключателя (АП), позволяющего использовать одну антенну для совместной работы передатчика и приемника. Входное устройство (ВУ) включает устройство защиты приемника от мощных зондирующих импульсов передатчика и полосовой фильтр, который производит предварительную фильтрацию сигнала от помех. В качестве малошумящих усилителей (МШУ) обычно используются транзисторные, параметрические усилители, а также усилители на ЛБВ и туннельных диодах.

Широкое распространение в РЛС получили балансные диодные преобразователи частоты (ПЧ) [3,5].

Определение дальности до цели выполняется на основе измерения задержки отраженного импульса. С этой целью на выходе ПЧ сигнал разветвляется на  $N$  ветвей (каналов дальности):

$$N = T_{II} / \tau_{СТР} = T_{II} / \tau_{II} = 1 / F_{II} \tau_{II}, \quad (12)$$

где  $\tau_{СТР} \cong \tau_{II}$  – длительность стробирующего и зондирующего импульсов соответственно.

Селектор дальности (СД) – аналоговый ключ, пропускающий отраженный сигнал, попадающий во временной интервал (строб), пока СД открыт. Стробы каналов сдвинуты друг относительно друга и перекрывают все дальности до цели. По номеру канала определяется дальность до цели. СД может быть выполнен как обычный каскад УПЧ, у которого стробирующим импульсом включается питание на длительность строба.

Для получения на входе АД максимального отношения сигнал-шум в УПЧ должен быть включен согласованный с одиночным импульсом фильтр (СФ) [3,5], однако с целью упрощения приемника на практике чаще используется не СФ, а квазиоптимальный фильтр, в качестве которого выступает избирательный каскад УПЧ с полосой пропускания  $P = 1/\tau_{II}$ .

Поскольку фаза отраженных импульсов при обработке не учитывается, в АД выделяется огибающая этих импульсов с последующим накоплением их в гребенчатом фильтре (ГФ). ГФ в простейшем случае представляет собой интегратор [3,5].

При превышении уровня сигнала на входе порогового устройства (ПУ) некоторого порога на выходе ПУ формируется сигнал, говорящий о наличии цели.

Из-за различных дальностей до цели динамический диапазон сигналов на входе приемника велик, поэтому применение АРУ в виде ВАРУ или БАРУ становится необходимым.

Повышение разрешающей способности и точности измерений в РЛС становится возможным при переходе от простых импульсных к сложным сигналам, например, с внутриимпульсной линейной частотной модуляцией.

Обработка сложных сигналов в большинстве случаев производится некогерентно. Структурная схема приемника такая же, как для простых импульсных сигналов (рисунок 8). Отличие состоит только в том, что использование квазиоптимального фильтра в этом случае неприемлемо. В тракте УПЧ обязательно устанавливается СФ для одного сложного импульса пачки. На выходе СФ импульсы сложной формы сжимаются в  $K_{СЖ}$  раз, снимается их внутриимпульсная модуляция и увеличивается амплитуда. В качестве примера на рисунке 9 изображен сложный импульс с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и сигнал на выходе СФ. Амплитуда сигнала ЛЧМ на входе СФ –  $U_{ВХ}$ , длительность импульса –  $\tau_{II}$ . В результате обработки импульса в СФ он сжался во времени в  $K_{СЖ}$  раз (длительность выходного импульса определена по уровню 0,637 от максимального значения). Амплитуда сжатого импульса на выходе СФ составляет  $U_{ВЫХ} = \sqrt{K_{СЖ}} U_{ВХ}$ , т.е. значительно возрастает при больших коэффициентах сжатия  $K_{СЖ} = B = \tau_{II} \Delta f_{ДЕВ}$  [4]. Выходной сигнал СФ имеет высокочастотное заполнение, которое на рисунке 9 условно не показано.

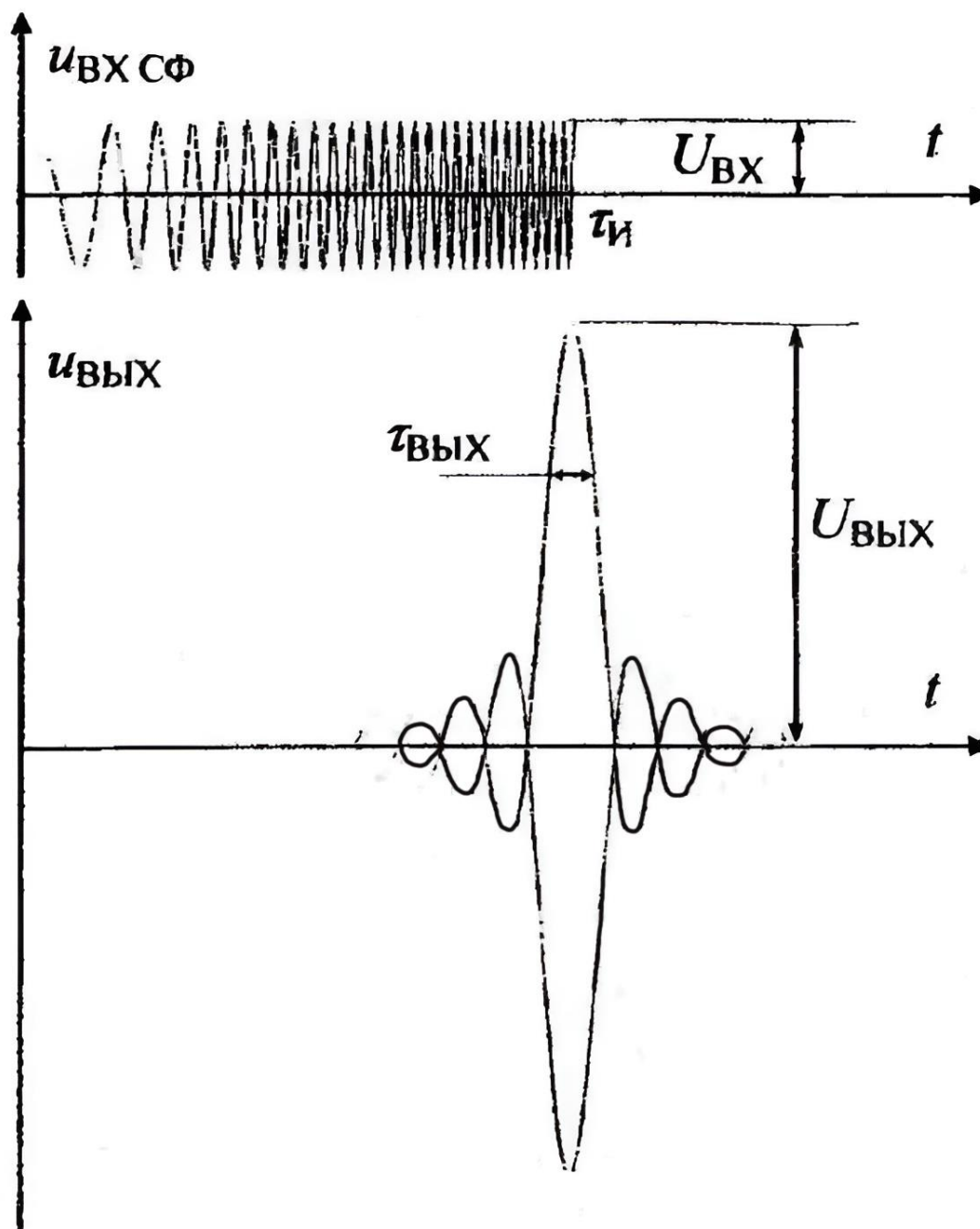


Рисунок 9 - сложный импульс с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и сигнал на выходе СФ.

В качестве СФ для сигнала ЛЧМ применяется фильтр с постоянной АЧХ в полосе частот, занимаемой спектром сигнала, и с параболической ФЧХ (с линейно изменяющимся в полосе групповым временем запаздывания).

Последовательность операций обработки и назначение отдельных каскадов в когерентном и некогерентном приемниках во многом совпадает.

Отличие в следующем. В когерентном приемнике требуется формировать напряжение гетеродина и опорное колебание для фазового детектора, жестко связанные с фазой излучаемого сигнала. Поэтому напряжение гетеродина формируется из колебаний передатчика РЛС (рисунок 10).

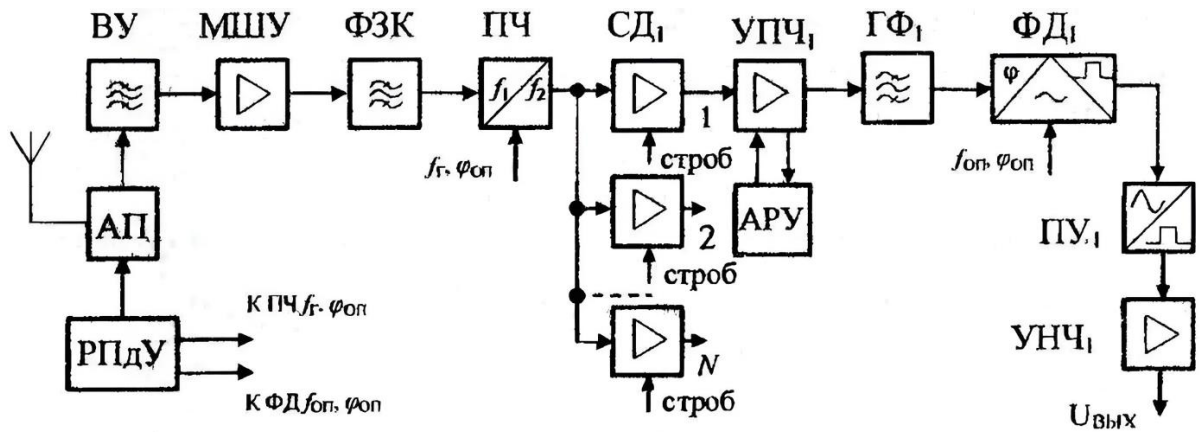


Рисунок 20 – Структурная схема радиолокационного приёмника

В когерентной импульсной РЛС излучается пачка когерентных импульсов, то есть импульсов, значения начальных фаз которых известны. Когерентный приемник необходим тогда, когда требуется определить не только дальность и угловые координаты, но и скорость цели. Если в техническом задании на курсовой проект задана скорость цели, следует проектировать когерентный радиолокационный приемник [3,5].

ФД служит для получения информации о скорости цели. Если цель неподвижна, фаза отраженного сигнала постоянна  $\varphi_c = const$ , так же, как и разность фаз сигналов на входах ФД  $\Delta\varphi = \varphi_c - \varphi_{оп} = const$ . При этом огибающая последовательности видеоимпульсов на выходе ФД будет постоянна.

При отражении от движущейся цели фаза отраженного сигнала изменяется из-за доплеровского смещения частоты и на выходе ФД, огибающая последовательности видеоимпульсов, будет изменяться с частотой Доплера. Для сохранения информации о фазе отраженного сигнала накопление импульсов производится в ГФ, включенном перед ФД.

Расчет радиолокационных приемников имеет ряд особенностей. Ширина спектра сигнала определяется выражением:

$$П_C = B / \tau_{И}, \quad (13)$$

где  $B \cong 1$  для простых импульсных сигналов,  $B = \tau_{И} \Delta f_{ДЕВ} \gg 1$ , для сигналов с внутриимпульсной модуляцией.

Допустимый коэффициент шума приемника равен

$$Ш \leq P_A / (\gamma_{ВХ}^2 k T_0 П_{Ш}). \quad (14)$$

Отношение сигнал-шум на входе когерентного и релеевского приемников  $\gamma_{ВХ}^2$  рассчитывается по формулам:

$$\begin{aligned} \gamma_{ВХ-К}^2 &= \gamma_{ВЫХ-К}^2 / nB \\ \gamma_{ВХ-НК}^2 &= \gamma_{ВЫХ-НК}^2 / \sqrt{nB} \end{aligned} \quad (15)$$

Отношения сигнал-шум на выходе приемников  $\gamma_{ВЫХ-К}^2$  и  $\gamma_{ВЫХ-НК}^2$  определяются по характеристикам обнаружения [3,5] (рисунки 11-12) при заданной вероятности правильного обнаружения  $P_D$  и ложной тревоги  $P_F$ .

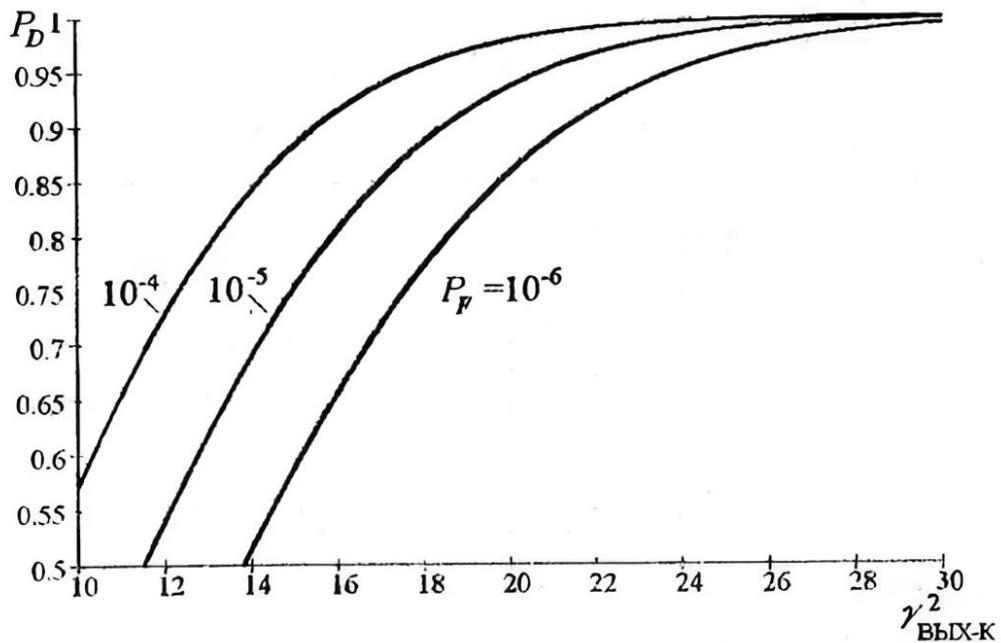


Рисунок 31 – График ОСШ

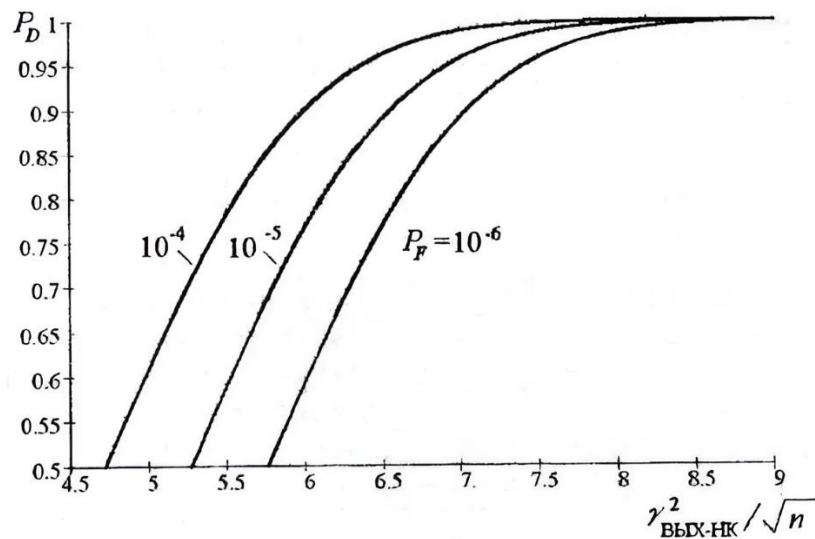


Рисунок 42 – График ОСШ

На этих графиках для некогерентного приема аргументом является величина  $\gamma_{ВЫХ-НК}^2 / \sqrt{n}$ , а для когерентного –  $\gamma_{ВЫХ-К}^2$ .

Динамический диапазон входных сигналов приемника равен

$$D_{BX} = (R_{\max} / R_{\min})^4, \quad (16)$$

где  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$  выбираются из условий:

$$R_{\max} = (0,3 - 0,4)c / F_{\Pi}, \quad (17)$$

$$R_{\min} = c(\tau_{\Pi} - \tau_B) / 2. \quad (18)$$

Здесь  $c$  – скорость света,  $\tau_{\Pi}$  и  $F_{\Pi}$  – длительность и частота повторения зондирующих импульсов,  $\tau_B = (1-2)$  мкс – время восстановления АП РЛС.



Динамический диапазон выходных сигналов  $D_{ВЫХ}$  определяет режим работы выходных устройств и обычно составляет  $D_{ВЫХ} = 10\text{дБ}$  таким образом, диапазон регулировки усиления системой АРУ:

$$D_{АРУ} = D_{ВХ} - D_{ВЫХ}. \quad (19)$$

## 2.4. Особенности расчета радионавигационных приемников

Бортовые радионавигационные приемники, представленные в заданиях, являются составной частью систем посадки самолетов и работают по сигналам наземных курсового и глиссадного радиомаяков. Курсовой радиомаяк служит для указания горизонтальной линии посадки ЛА, глиссадный - вертикальной.

Широкое распространение получили радиомаяки, образующие равносигнальную линию путем использования двухлепестковой пересекающейся диаграммы направленности антенны (рисунок 13) [5,6].

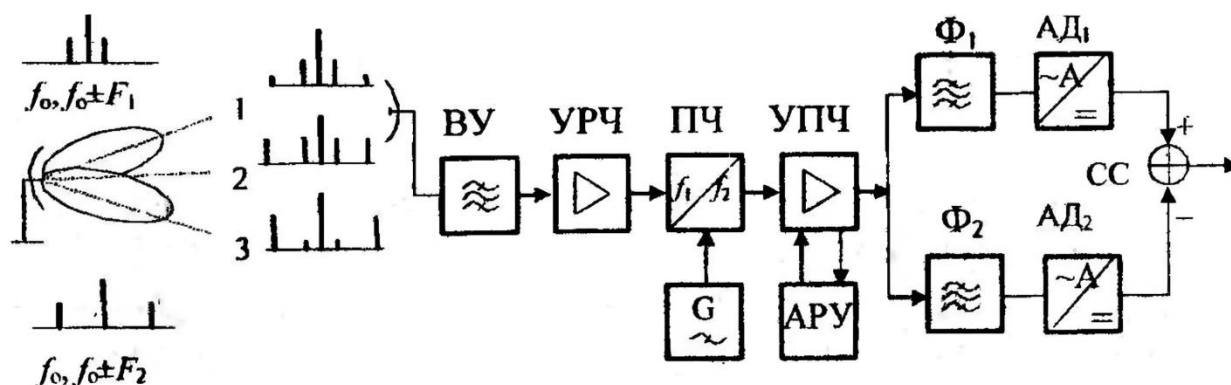


Рисунок 53 - Радиомаяк, образующий равносигнальную линию путем использования двухлепестковой пересекающейся диаграммы направленности антенны

Антенна передающего устройства радиомаяка одновременно излучает АМ сигналы на постоянной несущей частоте, но с разными модулирующими частотами:  $F_1$  по одному лепестку,  $F_2$  – по другому. Сигналы, принимаемые на борту, содержат модуляцию этими двумя частотами (рисунок 13).

Схемы построения курсового и глиссадного навигационных приемников идентичны. Фильтры  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  (рисунок 13) выделяют колебания модулирующих частот  $F_1$  и  $F_2$  соответственно, которые затем детектируются в амплитудных детекторах. На выходе схемы сравнения (СС) формируется разность выходных напряжений детекторов, которая несет информацию об угловом отклонении ЛА от равносигнальной линии, задающей траекторию захода

на посадку ЛА. При нахождении ЛА на равносигнальной линии амплитуды сигналов каждого из каналов будут равны, а сигнал на выходе СС равен нулю.

Поскольку уровень сигнала, принимаемого на борту, зависит от дальности до радиомаяка и изменяется в процессе приближения ЛА к взлетно-посадочной полосе, в РПУ необходимо предусмотреть систему АРУ.

Среднеквадратическая ошибка пеленгования радионавигационных приемников  $\sigma_\theta$  зависит от отношения сигнал-шум на входе детектора  $\gamma_{BX}^2$  [5,6]:

$$\sigma_\theta \cong 1,5\varphi_A / \sqrt{\gamma_{BX}^2}, \quad (20)$$

где  $\sigma_\theta = \pm 15^\circ$  – для курсового,  $\sigma_\theta = \pm 22^\circ$  – для глиссадного приемников соответственно [3,5],  $\varphi_A$  – ширина диаграммы направленности антенны, равная  $\varphi_A \approx 3^\circ$ .

Из выражения (20) определяется величина  $\gamma_{BX}^2$ , необходимая для расчета допустимого коэффициента шума РПУ.

Динамический диапазон регулировки усиления системой АРУ радионавигационных приемников рассчитывается по формуле (19) по аналогии с расчетом для радиолокационных приемников. Необходимо только учесть, что динамический диапазон входных сигналов в навигационных приемниках равен

$$D_{BX} = (R_{\max} / R_{\min})^2, \quad (21)$$

Минимальная дальность работы радиомаяков составляет (20-30) м, а максимальная для курсового приемника – 45км, для глиссадного - 20 км [5,6].

## 2.5. Особенности расчета радиовещательных приемников

Радиовещательные приемники предназначены для приема программ звукового вещания в диапазонах ДВ (148-285 кГц), СВ (525-1607 кГц) и КВ (3,95-12,1 МГц) при амплитудной модуляции сигнала, а в диапазоне УКВ (65,8-108 МГц) при частотной модуляции сигнала [1,7].

Ширина спектра полезного сигнала при амплитудной модуляции:

$$П_C \cong 2F_B, \quad (22)$$

при частотной модуляции:

$$П_C \cong 2F_B(1 + \psi + \sqrt{\psi}), \quad (23)$$

где  $\psi = \Delta f_{ДЕВ} / F_B = 3,3$ ;  $\Delta f_{ДЕВ}$  – девиация частоты сигнала.

Обычно в радиовещательных приемниках. используются следующие стандартные значения промежуточных частот: 465 кГц для диапазонов ДВ, СВ и КВ и 10,7 МГц - для диапазона УКВ.

Допустимый коэффициент шума приемников диапазона УКВ рассчитывается в соответствии с выражением (2). В диапазонах ДВ, СВ и КВ при расчете максимально допустимого коэффициента шума приемника следует учитывать внешние помехи:



$$Ш = \left[ \frac{E_A^2}{\gamma_{BX}^2} - \varepsilon_{II}^2 h_0^2 \Pi_{Ш} \right] / 4kT_0 \Pi_{Ш} R_A. \quad (24)$$

Для АМ-сигнала зависимость сигнал-шум на входе и выходе детектора:

$$\gamma_{BX} = \gamma_{ВЫХ} \sqrt{(k_{II}^2 + m_{\max}^2) \Pi_{УНЧ} / m_{\max}^2 \Pi_{Ш}}, \quad (25)$$

где  $k_{II} \approx 3$  – пик-фактор,  $m_{\max} \approx 0,8-0,9$  – максимальный коэффициент модуляции речевого сигнала.

Для ЧМ-сигнала связь между отношениями сигнал-шум на входе и выходе детектора описывается выражением (11).

Входящая в (24) напряженность поля внешних помех  $\varepsilon_{II}$  составляет: для СВ, ДБ 7-10 мкВ/м, а для КВ – 0,5-5 мкВ/м. Действующую высоту антенны следует выбирать порядка  $h_0 \approx 1$  м.

В радиовещательных приемниках используют как электрические (дипольные, штыревые), так и магнитные (ферритовые) антенны, причем ферритовые антенны - в основном на ДВ и СВ. В заданиях на курсовое проектирование радиовещательных приемников предполагается использование только электрических антенн.

Ненастроенные штыревые антенны могут применяться во всех диапазонах волн. В диапазонах ДВ, СВ и КВ сопротивление антенн имеет реактивный характер: емкость  $C_A = 3-10$  нФ, активное сопротивление - единицы Ом. В диапазоне УКВ сопротивление антенн чисто активное:  $R_A = 500-400$  Ом.

При использовании штыревых антенн в выражениях (2) и (24) сопротивление антенн берется равным 1-2 кОм.

Ненастроенные дипольные антенны получили наиболее широкое применение в УКВ диапазоне, где  $R_A = 75$  Ом.

Напряжение питания в приемниках с автономным источником следует выбирать из ряда: 3В, 4,5В, 6В, 9В, 12В.

Основные требования, предъявляемые к преселектору вещательного приемника: обеспечение приема сигнала в заданном диапазоне частот, подавление зеркального канала и канала прямого прохождения, обеспечение требуемой чувствительности (коэффициента шума) приемника.

В качестве элементов настройки на частоту входного сигнала во всех диапазонах в основном используются варикапы, реже - конденсаторы переменной емкости.

Типовые схемные решения, использующиеся при построении тракта высокой частоты приемников, приведены в [1,7]. УРЧ в приемниках диапазонов ДВ, СВ и КВ обычно строятся по схеме с общим эмиттером или по каскадной схеме. В приемниках УКВ-диапазона широко используются схемы с общей базой и каскадные схемы.

Основные требования, предъявляемые к тракту промежуточной частоты – обеспечение необходимого усиления полезного сигнала и требуемой избирательности по соседнему каналу. Тракт промежуточной частоты

строится по принципу распределенной или сосредоточенной избирательности. Типовые схемы тракта промежуточной частоты приведены в [1,7].

Выбор активных элементов вещательного приемника - (транзисторов, диодов, интегральных микросхем) производится по их функциональному назначению и электрическим параметрам [7,11-12].

### **3 КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

#### **Критерии оценивания:**

**100-85 баллов** (или оценка «отлично») выставляется обучающемуся, если тема курсового проекта раскрыта полно и глубоко, при этом убедительно и аргументированно изложена собственная позиция автора по рассматриваемому вопросу; корректно выполнены необходимые расчеты и сделаны аргументируемые выводы по результатам расчетов; построены необходимые схемы и графики, проведен анализ полученных результатов; курсовой проект демонстрирует способность автора к сопоставлению, анализу и обобщению; структура курсового проекта четкая и логичная; изучено большое количество актуальных источников, включая дополнительные источники, корректно сделаны ссылки на источники; основные положения доказаны; сделан обоснованный и убедительный вывод; сформулированы мотивированные рекомендации; выполнены требования к оформлению курсового проекта.

**84-70 баллов** (или оценка «хорошо») выставляется обучающемуся, если тема курсового проекта раскрыта, сделана попытка самостоятельного осмысления темы; структура курсового проекта логична; корректно выполнены расчеты; построены схемы и графики, изучены основные источники, правильно оформлены ссылки на источники; основные положения и вывод носят доказательный характер; сделаны рекомендации; имеются незначительные погрешности в содержании и (или) оформлении курсового проекта.

**69-50 баллов** (или оценка «удовлетворительно») выставляется обучающемуся, если тема курсового проекта раскрыта неполно и (или) в изложении темы имеются недочеты и ошибки; отмечаются отступления от рекомендованной структуры курсового проекта; выполнены основные расчеты; количество изученных источников менее рекомендуемого, сделаны ссылки на источники; вывод сделан, но имеет признаки неполноты и неточности; рекомендации носят формальный характер; имеются недочеты в содержании и (или) оформлении курсового проекта.

**49 и менее баллов** (или оценка «неудовлетворительно») выставляется обучающемуся, если тема курсового проекта не раскрыта и (или) в изложении темы имеются грубые ошибки; структура курсового проекта нечеткая или не определяется вообще; расчеты не выполнены или выполнены с грубыми ошибками, количество изученных источников значительно менее рекомендуемого, неправильно сделаны ссылки на источники или они отсутствуют; отсутствует вывод или автор испытывает

затруднения с выводами; не соблюдаются требования к оформлению курсового проекта.

### **Библиографический список**

1. Справочник по учебному проектированию приемно-усилительных устройств. / Под ред. М.К. Белкина. – Киев.: Высшая школа, 2018. – 452 с.
2. Проектирование радиоприемных устройств. /Под ред. А.П. Сиверса. - М.: Радиотехника, 2016. – 488 с.
3. Проектирование радиолокационных приемных устройств. /Под ред. М.А. Соколова. -М.: Высшая школа, 2014. – 335 с.
4. Многофункциональные радиолокационные системы /под ред. Б.Г. Татарского. Учебное пособие для вузов. - М.: Дрофа, 2017. - 283с.
5. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. - М.: Радиотехника, 2014. - 320с.
6. Бакулев П.А., Сосновский А.А. Радионавигационные системы. Учебник для вузов. - М.: Радиотехника, 2015. - 224с,
7. Куликов Г.В., Парамонов А.А. Радиовещательные приемники. Учебное пособие. - М.: МИЭА, 2019. – 120 с.
8. Коржик В.И., Финк Л.М., Щелкунов К.Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справочник. - М.: Радио и связь, 2021. – 332с.
9. Аксенов А.И., Нефедов А.В. Отечественные полупроводниковые приборы/ 4-е изд., перераб. и доп.. -М.: Солон Пресс, 2022. – 544с.
10. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник. / Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. - М.: Энергоатм издат; 2016. – 904с.
11. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: Справочник. /Под ред. Б.Л. Перельмана. - М.: Радио и связь, 2021, - 656с.
12. Нефедов А.В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги: Справочник. Т.4. – М. ИП РадиоСофт, 2017. - 576с.