

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 06.08.2023 13:04:17

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf754943df4a4851fda56d089

## 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.



### ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОГЕРЕНТНЫХ АМ, ЧМ, ФМ И ОФМ ДЕМОДУЛЯТОРОВ

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
по дисциплине «Общая теория связи»

Курск 2023

УДК 621.391 (075)

Составители: Д.С. Коптев

Рецензент

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи  
*В. Г. Андронов*

**Исследование оптимальных когерентных АМ, ЧМ, ФМ и  
ОФМ демодуляторов:** методические указания по выполнению ла-  
бораторной работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Д.С. Коптев. Курск,  
2023. – 12 с.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содер-  
жат краткие теоретические сведения о принципах работы оптимальных коге-  
рентных демодуляторов сигналов с различными видами модуляции, лабора-  
торной установке и порядке выполнения лабораторной работы.

Методические указания соответствуют учебному плану по направле-  
нию подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы  
связи», а также рабочей программе дисциплины «Общая теория связи».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подго-  
товки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» очной  
и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 08.08.2023. Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,63. Тираж 100 экз. Заказ 703. Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## 1 Цель работы

- экспериментальное исследование оптимальных когерентных демодуляторов АМ, ЧМ и ФМ сигналов.

## 2 Краткая характеристика исследуемых цепей и сигналов

В работе используется универсальный стенд со сменным блоком «МОДУЛЯТОР – ДЕМОДУЛЯТОР», функциональная схема которого приведена на рисунке 1.

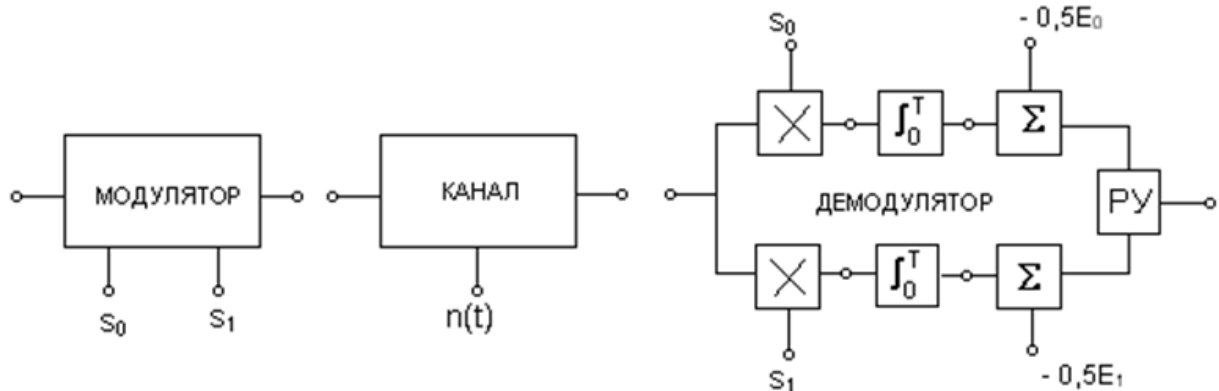


Рисунок 1 – Функциональная схема сменного блока «МОДУЛЯТОР – ДЕМОДУЛЯТОР»

Источником цифрового сигнала является КОДЕР-1, который выдает периодическую последовательность из пяти символов. С помощью тумблеров можно установить любую пятиэлементную кодовую комбинацию, которая индицируется линейкой из пяти светодиодных индикаторов с надписью «ПЕРЕДАНО». В блоке МОДУЛЯТОР происходит модуляция (манипуляция) двоичными символами «высокочастотных» колебаний по амплитуде, частоте или фазе, в зависимости от положения переключателя «ВИД МОДУЛЯЦИИ» – АМ, ЧМ, ФМ или ОФМ. При «нулевом» положении переключателя выход модулятора соединен с его входом (модуляция отсутствует).

КАНАЛ связи представляет собой сумматор сигнала с выхода модулятора и шума, генератор которого (ГШ) расположен в блоке ИСТОЧНИКИ СИГНАЛОВ. Внутренний генератор квазизеленого шума, имитирующий шум канала связи, работает в той же полосе частот, в которой расположены спектры модулированных сигналов (12÷28 кГц).

ДЕМОДУЛЯТОР выполнен по когерентной схеме с двумя ветвями; коммутация видов модуляции – общая с модулятором. Поэтому эталонные сигналы  $s_0$  и  $s_1$  и пороговые напряжения в контрольных точках стенда изменяются автоматически при смене вида модуляции.

Знаками ( $\times$ ) на функциональной схеме обозначены аналоговые перемножители сигналов, выполненные на специализированных ИМС. Блоки интеграторов выполнены на операционных усилителях. Электронные ключи (на схеме не показаны) разряжают конденсаторы интеграторов перед началом каждого символа.

Сумматоры ( $\Sigma$ ) предназначены для введения пороговых значений напряжений, зависящих от энергии эталонных сигналов  $s_1$  и  $s_0$ .

Блок «РУ» – решающее устройство – представляет собой компаратор, то есть устройство, сравнивающее напряжения на выходах сумматоров. Само «решение», т. е. сигнал «0» или «1» подается на выход демодулятора в момент перед окончанием каждого символа и сохраняется до принятия следующего «решения». Моменты принятия «решения» и последующего разряда конденсаторов в интеграторах задаются специальной логической схемой, управляющей электронными коммутаторами.

Для демодуляции сигналов с ОФМ к схеме демодулятора ФМ добавляются блоки (на схеме не показаны), которые сравнивают предыдущее и последующее решения демодулятора ФМ, что позволяет сделать заключение о скачке фазы (или его отсутствии) в принимаемом символе. При наличии такого скачка на выход демодулятора подается сигнал «1», в противном случае – «0». В сменном блоке предусмотрен тумблер, переключающий начальную фазу ( $\varphi$ ) опорного колебания (0 или  $\pi$ ) – только для ФМ и ОФМ. Для нормальной работы демодулятора тумблер должен быть в нулевом положении.

При амплитудной манипуляции предусмотрена возможность ручной установки порога с целью изучения его влияния на вероятность ошибки в приёме символа. Оценка вероятности ошибки производится в ПК путем подсчёта числа ошибок за определенное время анализа. Сами сигналы ошибки (в символе или «букве») формируются в специальном блоке стенда («КОНТРОЛЬ ОШИБОК»), расположенном ниже блока ЦАП. Для визуального контроля ошибок в стенде имеются светодиодные индикаторы.

В качестве измерительных приборов используются двухканальный осциллограф, встроенный вольтметр и ПК, работающий в режиме подсчета ошибок.

### 3 Домашнее задание

3.1 Изучите основные вопросы по конспекту лекций и литературе:

- Бабанин И.Г., Коптев Д.С., Мухин Общая теория связи. Цифровые системы передачи данных: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2019. – 106 с.

- Коптев Д.С., Бабанин И.Г., Довбня В.Г. Теория радиотехнических сигналов: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2019. – 240 с.

3.2 Оформите заготовку отчета. Выполните необходимые расчёты.

### 4 Основы теории

Задачей приёмного устройства является принятие решения о том, какое из возможных сообщений действительно передавалось источником. Для этого принятый сигнал подвергается различным преобразованиям, которые называют обработкой сигнала. В результате анализа определяются условные (апостериорные) вероятности возможных гипотез и на основании этих вероятностей принимается решение о принимаемом сообщении. Часть приёмного устройства, которая осуществляет анализ приходящего сигнала и принимает решение о переданном сообщении, называется решающим устройством.

Действие приёмника дискретных сигналов (ДС) можно представить как разбиение пространства наблюдений  $Z$  на неперекрывающиеся подпространства по числу символов  $m$  и отождествление принятого сигнала  $z(t) = s_i(t) + n(t)$  с тем символом  $b_k$ , в область которого он попадает. Разбиение, соответствующее некоторому критерию оптимальности, называется оптимальным разбиением, а приёмник, работающий в соответствии с таким критерием, называется оп-

тимальным. Всякому критерию оптимальности соответствует правило (алгоритм), руководствуясь которым приёмник выносит решение. Это правило определяет функциональную схему приёмника.

При передаче дискретных сигналов широко используется критерий идеального наблюдателя, впервые введённый В.А. Котельниковым в 1946 г., который часто называют критерием Котельникова, согласно которому приёмник считается оптимальным, если он обеспечивает минимум полной вероятности ошибки. При передаче первичных сигналов  $s_i$  полная вероятность ошибки  $p_{\text{ош}}$  определяется как математическое ожидание вероятности ошибки  $p_{\text{ош}}(s_i)$  каждого из них:

$$p_{\text{ош}} = M[p_{\text{ош}}(s_i)] = \sum_{i=1}^m p(s_i) p_{\text{ош}}(s_i),$$

где  $p(s_i)$  – вероятность передачи сигнала  $s_i$ ,  $m$  – общее число первичных сигналов.

Тогда критерий Котельникова (критерий идеального наблюдателя) записывается в виде:

$$\min p_{\text{ош}} = \min \sum_{i=1}^m p(s_i) p_{\text{ош}}(s_i),$$

то есть критерий идеального наблюдателя реализует так называемое правило максимума правдоподобия, когда все символы передаются равновероятно.

Алгоритмы работы оптимального приёмника для часто встречающегося на практике случая передачи двоичных первичных сигналов  $b_1$  и  $b_2$  длительностью  $t_s$  сигналами  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ , сформированными методами амплитудной, частотной и фазовой дискретной (цифровой) модуляции (манипуляции), в канале с аддитивным гауссовским шумом приведены в таблице 1. Оптимальный приёмник реализует поэлементный приём, когда решение о переданном сигнале принимается отдельно для каждого сигнала, независимо от принятого ранее. Все алгоритмы таблицы 1 представляют собой неравенства, указывающие последовательность операций, которые необходимо выполнить с суммой сигнала и помехи  $z(t) = s(t) + n(t)$  и правило определения переданного первичного сигнала  $b_i$ .

Таблица 1 – Алгоритмы оптимального приёма

Вид манипуляции	Алгоритм
АМн	$\int_0^{t_s} z(t)s_1(t)dt \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} b_1 \\ b_2 \end{matrix} \quad E_s - \text{энергия сигнала } s_1(t)$
ЧМн	$\int_0^{t_s} z(t)s_1(t)dt \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} b_1 \\ b_2 \end{matrix} \int_0^{t_s} z(t)s_2(t)dt$
ФМн	$\int_0^{t_s} z(t)s_1(t)dt \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} b_1 \\ b_2 \end{matrix} 0$

При ЧМн принятый сигнал с помехой  $z(t)$  необходимо умножить отдельно на копии передаваемых сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ , произведения проинтегрировать на интервале длительности сигнала  $t_s$  и далее сравнить результаты интегрирования. Решение какой первичный сигнал передавался выносится по большему из них.

Для сигналов с АМн и ФМн в алгоритмах производятся такие же операции, но сравнение результатов интегрирования проводится с величиной, равной половине энергии сигнала  $s_1(t)$  для АМн сигналов и с нулем – для ФМн сигналов.

Устройство, непосредственной вычисляющее скалярное произведение или корреляционный интеграл вида  $\int_0^T z(t)s(t)dt$  называют активным фильтром или коррелятором. Поэтому приёмник, реализующий алгоритмы таблицы 1 называют корреляционным.

Структурные схемы оптимальных приёмников, построенные по алгоритмам таблицы 1, показаны на рисунке 2.

Расчётные формулы вероятности ошибки при оптимальном приёме равновероятных сигналов с АМн, ЧМн и ФМн в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (БГШ), полученные в теории потенциальной помехоустойчивости, приведены в таблице 2, где использованы следующие обозначения:  $\Phi_0(z)$  – табулированный интеграл вероятности:

$$\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp(-y^2/2) dy.$$

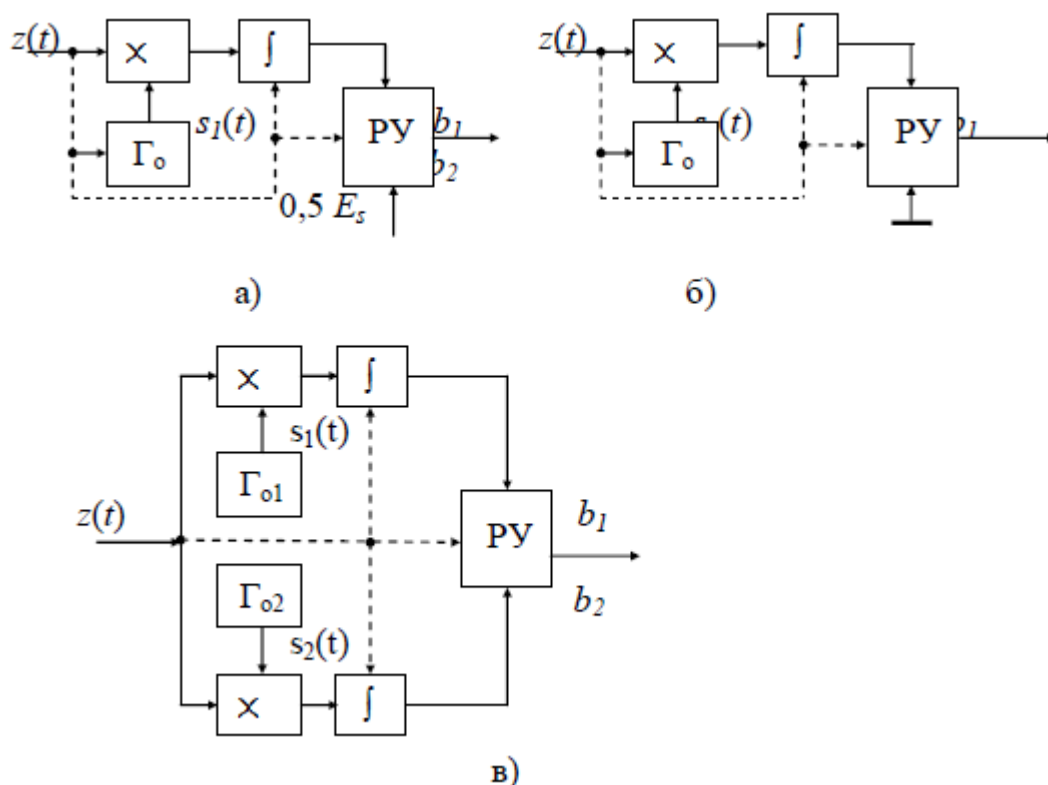


Рисунок 2 – Структурные схемы оптимальных когерентных приёмников (демодуляторов):

а – АМн сигналов, б – ФМн сигналов, в – ЧМн сигналов  
 $\times$  – перемножители,  $\int$  – интеграторы,  $\Gamma_0$  – генераторы опорных сигналов, РУ – решающее устройство, ..... синхронизация

Таблица 2 – Вероятность ошибки при оптимальном приёме

Вид манипуляции	Тип приёма	
	Когерентный	Некогерентный
АМн	$0,5 - \Phi_0(h/\sqrt{2})$	$0,5 \exp(-h^2/4)$
ЧМн	$0,5 - \Phi_0(h)$	$0,5 \exp(-h^2/2)$
ФМн	$0,5 - \Phi_0(\sqrt{2}h)$	.....
ОФМн	$\approx 1 - 2\Phi_0(\sqrt{2}h)$	$0,5 \exp(-h^2)$

$h^2 = E_s/N_0$  – отношении энергии сигнала на входе демодулятора к спектральной плотности мощности шума.

Из формул таблицы 2 следует, что вероятность ошибки при оптимальном приёме зависит от вида дискретных сигналов, их энергии, способа приёма, спектральной плотности мощности шума.



Вероятность ошибки при когерентном приёме для АМн, ЧМн и ФМн сигналов в практических приложениях можно рассчитать, используя более удобную приближительную формулу (с точностью 1...2%):

$$p_{\text{ош}} \approx 0,65 \exp[-0,44(\gamma h + 0,75)^2],$$

где  $\gamma = 1/\sqrt{2\pi}$  – для АМн;  $\gamma = 1$  – для ЧМн;  $\gamma = \sqrt{2}$  – для ФМн.

## 5 Лабораторное задание

5.1 Наблюдайте осциллограммы сигналов в различных точках схемы демодулятора при отсутствии шума в канале.

5.2 Наблюдайте появление ошибок в работе демодулятора при наличии шума в канале. Оцените вероятность ошибки для АМн, ЧМн и ФМн при фиксированном значении отношения сигнал/шум.

5.3 Получите зависимость вероятности ошибок при АМн от порогового напряжения.

## 6 Методические указания

### 6.1 Работа демодулятора в условиях отсутствия помех

6.1.1 Соберите схему измерений согласно рисунку 3.

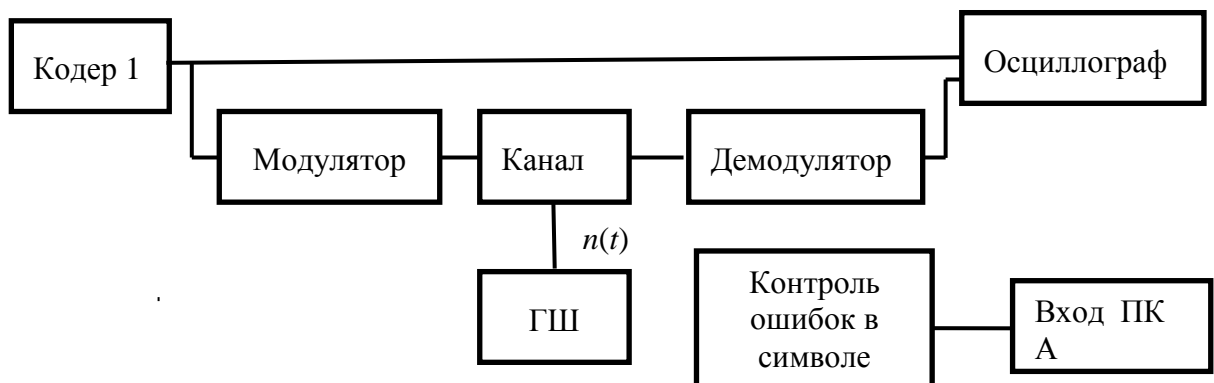


Рисунок 3 – Структурная схема измерений

Тумблерами КОДЕРА - 1 наберите любую двоичную комбинацию из 5 элементов. Ручку регулятора «ПОРОГ АМ» установите в крайнее левое положение. При этом регулятор выключен и порог устанавливается автоматически при смене вида модуляции. Тумблер

фазировки опорного колебания ДЕМОДУЛЯТОРА установите в положение «0<sup>0</sup>». Соедините выход генератора шума (ГШ) в блоке ИСТОЧНИКИ СИГНАЛОВ со входом  $n(t)$  КАНАЛА связи. Потенциометр выхода генератора шума установите в крайнее левое положение (напряжение шума отсутствует). Вход внешней синхронизации осциллографа соедините с гнездом С2 в блоке ИСТОЧНИКИ, а усилители вертикального отклонения лучей переведите в режим с открытым входом.

6.1.2 Кнопкой переключения видов модуляции установите вариант «0», соответствующий сигналу на входе МОДУЛЯТОРА. Снимите осциллограмму этого сигнала и, не меняя режим развёртки осциллографа, установите амплитудную манипуляцию (АМн). Зарисуйте осциллограммы в контрольных точках демодулятора:

- на входе демодулятора;
- на выходах перемножителей (в одном масштабе по вертикальной оси);
- на выходах интеграторов (также в одном масштабе);
- на выходе демодулятора.

На всех полученных осциллограммах отметьте положение оси времени (т.е. положение нулевого уровня сигнала). Для этого зафиксируйте положение линии развёртки при замыкании входных зажимов осциллографа.

6.1.3 Повторите п. 6.1.2 для ЧМ.

6.1.4 Повторите п. 6.1.2 для ФМ.

## 6.2 Работа демодулятора в условиях помех

6.2.1 Переключателем «ВИД МОДУЛЯЦИИ» установите ФМн. Подключите один из входов двухлучевого осциллографа ко входу модулятора, а второй – к выходу демодулятора. Получите неподвижные осциллограммы этих сигналов.

6.2.2 Плавно увеличивая уровень шума (потенциометром ГШ) добейтесь появления редких «сбоев» на выходной осциллограмме или на входном табло «ПРИНЯТО».

6.2.3 С помощью осциллографа измерьте установленное отношение сигнал/шум. Для этого, последовательно отключая источник шума, измерьте на входе демодулятора размах сигнала (в делениях на экране) –  $2a$  (т. е. двойная амплитуда сигнала), а отключив источ-

ник сигнала от входа канала и восстановив шумовой сигнал – измерьте размах шума (также в делениях) –  $6\sigma$ . Найденное отношение  $a/\sigma$  внести в таблицу 3.

6.2.4 Переключателем «ВИД МОДУЛЯЦИИ» установите последовательно АМн, ЧМн, ФМн и ОФМн, наблюдая по вспышкам светодиода «ОШИБКА» или по осциллограмме выходного сигнала демодулятора частоту появления ошибок. Результаты наблюдений внесите в отчет.

6.2.5 Не изменяя уровень шума в канале, измерьте вероятность ошибки демодулятора в приёме символа за конечное время анализа (т.е. оценку вероятности ошибки). Для этого переведите ПК в режим измерения вероятности ошибки и установите время анализа  $10 \div 30$  с. Начиная с ФМн, (а затем – ЧМн и АМн) определите число ошибок за время анализа и оценку вероятности ошибки. Полученные данные внести в таблицу 3.

Таблица 3 – Зависимость вероятности ошибок от вида манипуляции

Время анализа - ...с		$a/\sigma =$	
Вид модуляции	ФМ	ЧМ	АМ
Оценка вероятности ошибки			

### 6.3 Зависимость вероятности ошибки от порогового напряжения в демодуляторе при АМн

6.3.1 Переключателем «ВИД МОДУЛЯЦИИ» установите АМн. Потенциометр выхода генератора шума установите на минимум. С помощью осциллографа, подключенного к выходу нижнего интегратора, измерьте размах пилообразного напряжения по вертикали в вольтах –  $U_{\max}$ .

6.3.2 Заготовьте таблицу 4.

Таблица 4 – Оценка вероятности ошибки в зависимости от порога

Время анализа – ...с							
$U_{\text{пор}}$	0			$0,5U_{\max}$			$U_{\max}$
$p_{\text{ош}}$							

6.3.3 Потенциометром «ПОРОГ АМ» установите значение порога  $U_{\max}/2$  (измеряя напряжение « $E_1/2$ » в контрольной точке демодулятора с помощью вольтметра постоянного напряжения). Увеличьте уровень шума в канале до появления редких сбоев. Не меняя уровень шума, измерьте оценку вероятности ошибки для этого порога ( $U_{\max}/2$ ), а затем и для всех остальных значений  $U_{\text{пор}}$ . Постройте график зависимости  $p_{\text{ош}} = \varphi(U_{\text{пор}})$ .

## 7 Контрольные вопросы

- 1) Назначение демодулятора в цифровой системе связи. В чем его основное отличие от демодулятора аналоговой системы?
- 2) Что такое скалярное произведение сигналов? Как оно используется в алгоритме работы демодулятора?
- 3) Можно ли в оптимальном демодуляторе применять согласованные фильтры?
- 4) Поясните критерий идеального наблюдателя?
- 5) Поясните правило максимума правдоподобия?
- 6) Как выбирается порог решающего устройства? Что происходит при его изменении?
- 7) Поясните алгоритм принятия решения в РУ?
- 8) Объясните назначение каждого блока демодулятора.
- 9) Как можно рассчитать  $p_{\text{ош}}$  теоретически и измерить экспериментально?
- 10) Алгоритм оптимального демодулятора и его функциональная схема для АМн, ЧМн и ФМн.
- 11) Объясните разницу в помехоустойчивости систем связи с разными видами модуляции.
- 12) Объясните осциллограммы, полученные в разных контрольных точках демодулятора (для одного из видов модуляции).