

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ»

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ТЕОРИИ СВЯЗИ

**УЧЕБНО - МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ

для студентов 3-го курса заочного факультета (5 семестр)

направление 11.03.02

«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Москва - 2018 г.

Учебно - методическое пособие

по дисциплине

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ

«Модуляция и демодуляция в аналоговых системах связи»

для студентов 3-го курса заочного факультета (5 семестр)

направление 11.03.02

«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Составители: А. С. Сухоруков, к.т.н., доцент

А.Н. Терехов, к.т.н., доцент

Издание содержит методические указания и контрольные вопросы по курсу "Общая теория связи" (часть 1), контрольное задание и методические рекомендации по его выполнению. Предназначено для студентов заочной формы обучения по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Рецензент В. Г. Санников, к.т.н., профессор

Издание переработанное. Утверждено на заседании кафедры ОТС 30.09.18.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Общая теория связи» (ОТС) является одной из фундаментальных дисциплин, которые формируют теоретическую базу для подготовки современного специалиста в области телекоммуникации. Изучение курса ОТС позволяет специалисту овладеть единой методикой решения задач электросвязи на основе вероятностных представлений.

Курс ОТС изучается в течение двух семестров (пятого и шестого). Содержание первой части курса ОТС составляют следующие разделы:

- общие сведения о системах электросвязи;
- математические модели сообщений, сигналов и помех;
- основы теории модуляции и демодуляции;
- математические модели каналов связи и преобразование сигналов в каналах связи.

Курс ОТС базируется на таких дисциплинах, как высшая математика, физика, теория электрических цепей, электроника, вычислительная техника и программирование, теория вероятностей и математическая статистика.

Курс ОТС является теоретической базой для изучения техники связи в последующих инженерных дисциплинах.

Курс ОТС предназначен для подготовки специалистов в области телекоммуникации по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» профили: «Сети связи и системы коммутации», «Многоканальные телекоммуникационные системы», «Системы радиосвязи и радиодоступа» и «Системы мобильной связи».

В данной работе содержатся методические указания и контрольное задание по первой части курса, что соответствует программе дисциплины ОТС, утвержденной учебно-методическим объединением.

Контрольное задание состоит из задач средней сложности, по каждой из которых приведены методические рекомендации с примерами.

Изучение указанных выше разделов курса ОТС необходимо выполнить по литературе, список которой приведен ниже.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ.

[1] с. 11-18; [2] с. 10-27; [3] с. 6-7;

Структурная схема оптимальной системы связи.

Современный этап развития телекоммуникационной техники характеризуется интенсивным внедрением оптимальных способов обработки сигналов. Успехи микропроцессорной техники сделали возможной реализацию самых сложных алгоритмов. Пожалуй, наиболее впечатляющие результаты получены в области кодирования и оптимальной обработки принятых сигналов, что позволило вплотную приблизиться к параметрам идеальной системы связи.

На рис. 1 показана обобщенная структурная схема цифровой системы связи.



Рис. 1. Обобщенная структурная схема цифровой системы связи

Назначение отдельных блоков будет рассматриваться по мере изучения очередного преобразования сигнала. Сокращенные обозначения на схеме расшифровываются так:

ИИ - источник информации,

ФНЧ – фильтр низких частот с верхней частотой пропускания F_v ,

АЦП — аналогово-цифровой преобразователь,

БЭК – блок эффективного кодирования,

БПК – блок помехоустойчивого кодирования,

Мод – модулятор несущей,

Вых У – выходное устройство (выходные усилитель и фильтр),

ИП – источник помех $\zeta(t)$,

ЛС – линия (канал) связи,

Вх У – входное устройство (входной фильтр и усилитель приемника),

Демод – демодулятор входного сигнала,

БПД - блок декодирования помехоустойчивого кода,

БЭД - блок декодирования эффективного кода,

ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь,

ПИ - приемник информации.

Системы электросвязи предназначены для передачи сообщений от источника сообщений к получателю.

Сообщения - это сведения, информация, отражающие объективную реальность. В системах электросвязи сообщение передается с помощью электрических сигналов, которые представляют собой электрическую копию сообщения. Обобщенная структурная схема системы электросвязи содержит следующие блоки.

- Источник информации - человек, автомат, ЭВМ, датчик. Сообщениями могут быть: речь (системы телефонной связи); текст (системы телеграфной связи); неподвижные изображения (фототелеграфные системы связи); подвижные изображения (телевизионные системы связи); параметры каких-либо устройств (системы телеизмерения); команды управления какими-либо устройствами (системы телеуправления); данные (системы передачи данных).

- ФНЧ ограничивает полосу частот передаваемого сообщения (телефония: 0.3 – 3.4 КГц, аудиосигнал: 16 – 15000 Гц, видеосигнал ТВ 0 – 6 МГц).

- Кодирующее устройство (кодер) - в общем случае осуществляет:

- преобразование сообщения, поступающего от источника сообщения в электрический сигнал;

- преобразование в случае необходимости непрерывного сигнала в дискретный;

- статистическое (эффективное) кодирование с целью увеличения скорости передачи информации и устранения избыточности;

- помехоустойчивое кодирование с целью повышения помехоустойчивости связи (обнаружение и исправление ошибок).

- Модулятор - изменяет один из параметров несущей в соответствии с модулирующим сообщением, поступающим от кодера. Несущей обычно служит гармоническое колебание, либо периодическая последовательность импульсов, либо шумоподобный сигнал. В процессе модуляции могут изменяться амплитуда, частота или фаза гармонической несущей; амплитуда, частота следования, фаза, длительность импульсного переносчика; тип используемого шумоподобного сигнала.

- Выходное устройство - ограничивает спектр частот передаваемого сигнала для устранения помех соседним по частоте системам связи и увеличения эффективности использования полосы частот, выходной усилитель увеличивает мощность передаваемого сигнала для обеспечения требуемой помехоустойчивости приема информации, передает сигнал в среду распространения. Таким образом, выходное устройство содержит полосовые фильтры, усилитель мощности и излучатель сигнала.

Таким образом, кодирующее устройство, модулятор, генератор несущего колебания и выходное устройство образуют передатчик.

- Линия связи - совокупность технических средств (оптический или электрический кабель и т.п.), либо окружающая среда, через которую сигнал поступает от передатчика к приемнику. В линии связи сигнал претерпевает изменения из-за затухания, воздействия помех и искажений.

- Помехи - это флюктуационный тепловой шум, атмосферные помехи, помехи от других передатчиков и т.п.

- Входное устройство - выделяет из линии связи сигнал нужного (требуемого) передатчика и усиливает его до необходимого уровня. Таким образом, входное устройство содержит полосовые фильтры и усилители.

- Демодулятор (детектор) - преобразует принятый сигнал в модулирующий сигнал, содержащий переданную информацию.

- Декодер - осуществляет обратное преобразование принятых кодовых сигналов (комбинаций) в исходное сообщение.

- Получатель сообщения - человек, ЭВМ, автомат и т.п.

Таким образом, входное устройство, демодулятор и декодер образуют приемник.

В процессе работы над данным разделом необходимо изучить и запомнить определения основных понятий теории связи (сообщение, сигнал, система связи, канал связи, сети связи); название и назначение блоков по структурной схеме; основные характеристики сигналов и систем связи.

Основные характеристики сигнала: длительность, ширина спектра и динамический диапазон; основные характеристики системы связи: помехоустойчивость и скорость передачи).

Вопросы для самопроверки

1. Что такое сообщение?
2. Что такое система электросвязи?
3. Нарисуйте обобщенную структурную схему системы связи и назовите функции каждого блока.
4. Что такое электрический сигнал?
5. Каковы основные характеристики сигнала?
6. Каковы основные характеристики системы связи ?
7. Что такое канал связи?

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СООБЩЕНИЙ, СИГНАЛОВ И ПОМЕХ.

[1] с. 18-41, 49-54, 76-91; [2] с. 29-79; [3] с. 8-17, 45-59]

В процессе изучения данного раздела необходимо понять и запомнить следующие определения и соотношения.

- Все процессы можно разделить на определенные точно (детерминированные) и предсказуемые только в вероятностном смысле (случайные).

- Непрерывные процессы (сигналы) могут принимать любые, сколь угодно близкие друг к другу значения в произвольные моменты времени.

- Дискретные или цифровые процессы (сигналы) могут принимать в определенные моменты времени только вполне определенные значения, отличающиеся друг от друга на конечную величину.

- Непрерывная функция $x(t)$, интегрируемая в квадрате, может быть представлена в виде обобщенного ряда Фурье, каждое слагаемое которого есть произведение коэффициента разложения C_k на соответствующую ортонормированную функцию $\varphi_k(t)$.

- Если в качестве ортонормированных функций выбрать $\sin(k\omega t)$ и $\cos(k\omega t)$, то получим ряд Фурье, коэффициенты которого представляют собой спектр сигнала. **Спектр сигнала $s(j\omega)$ - это зависимость комплексных амплитуд составляющих спектра от частоты. Спектр периодического сигнала с периодом T – дискретный, содержит частоты $k\Omega = \frac{2\pi k}{T}$:**

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\Omega t + b_k \sin k\Omega t)$$

Для периодической последовательности прямоугольных импульсов, показанной на рис.2, спектр имеет вид рис.3.

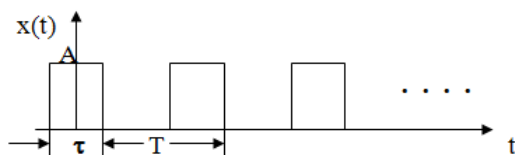


Рис.2. Временная диаграмма периодической последовательности прямоугольных импульсов

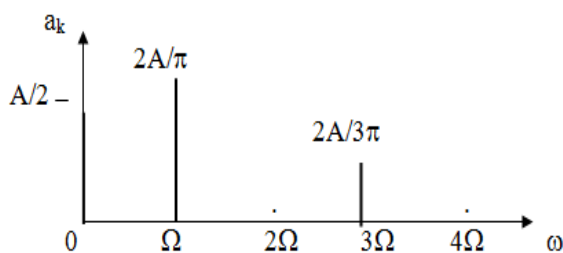


Рис.3. Спектральная диаграмма периодической последовательности прямоугольных импульсов

Спектр непериодического сигнала – сплошной. На рис.4 показан одиночный прямоугольный импульс и его спектр.

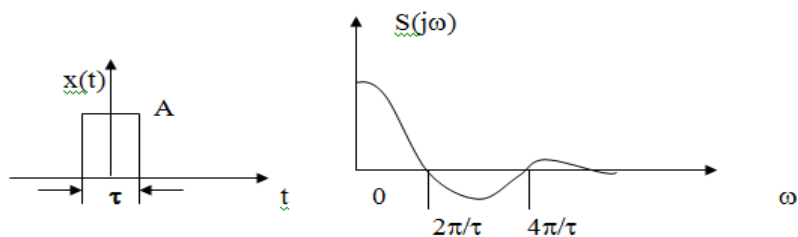


Рис.4. Временная и спектральная диаграммы одиночного прямоугольного импульса

Ширина спектра Π сигнала – это полоса частот, в которой заключена основная доля, т.е. 95% -99% энергии сигнала. Если длительность сигнала τ , то ширина его спектра равна $\Pi = \frac{2\pi}{\tau}$.

• Если в качестве ортонормированных функций выбрать функции отсчетов:
 $\varphi_k(t) = \frac{\sin \omega_s t}{\omega_s t}$, то получим ряд Котельникова.

Теорема Котельникова: любая непрерывная функция $x(t)$, спектр которой ограничен частотой $\omega_b = 2\pi f_b$, полностью определяется своими отсчетами, взятыми через интервал времени $\Delta t = \frac{\pi}{\omega_s} = \frac{1}{2f_s}$;

($\omega_b = 2\pi f_b$ - максимальная частота в спектре функции);

Дискретизация непрерывного процесса – это первая операция, которую мы должны выполнить при преобразовании непрерывного сигнала в цифровой. На рис.5 показаны исходный непрерывный сигнал $x(t)$ и дискретизированный сигнал $x_d(t)$.

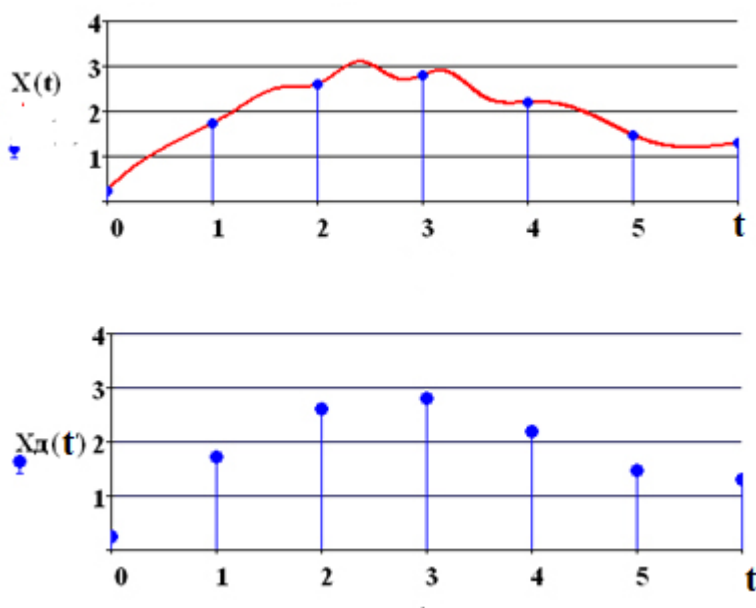


Рис.5 Временные диаграммы непрерывного и дискретизированного сигналов

Для восстановления из импульсов–отсчетов $x_d(t)$ исходного непрерывного сигнала необходимо эти импульсы-отсчеты подать на вход идеального фильтра нижних частот. На выходе этого фильтра получим исходный непрерывный процесс $x(t)$.

Следует запомнить, что теорема Котельникова справедлива точно только для функций с конечным (финитным) спектром, не содержащим частот выше ω_B . Реальные информационные сигналы имеют бесконечные спектры, как это показано на рис.6.

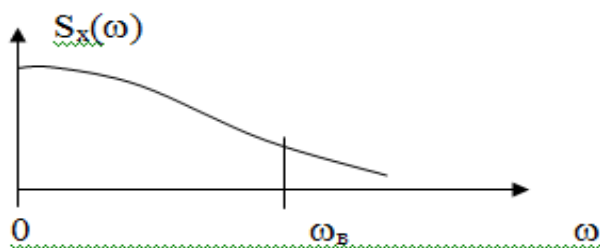


Рис.6 Типичный спектр информационного сигнала

Для сигналов с бесконечным спектром теорема Котельникова справедлива с погрешностью. Верхней частотой для таких сигналов мы называем ширину энергетического спектра $\omega_B = \Pi$. Среднеквадратическая погрешность дискретизации для сигналов с бесконечным спектром равна энергии составляющих спектра сигнала, лежащих за пределами частоты ω_B . Среднеквадратическая погрешность дискретизации вычисляется по формуле:

$$\overline{\varepsilon^2} = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_B}^{\infty} |S_x(j\omega)|^2 d\omega;$$

- Случайный процесс может быть описан:
 - своими реализациями,
 - своими функциями распределения вероятностей $F(x)$ и функциями плотности вероятностей $W(x)$. Эти функции связаны между собой:

$$W(x) = \frac{\partial}{\partial x} F(x); \quad F(x) = \int_{-\infty}^x W(x) dx ;$$

Необходимо запомнить условие нормировки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(x) dx = 1;$$

С геометрической точки зрения это означает, что площадь под кривой $W(x)$ всегда равна 1.

• **Случайный процесс называется нормальным, если его функция плотности вероятностей $W(x)$ описывается гауссовским распределением, т.е.**

$$W(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_1)^2}{2\sigma^2}};$$

m_1 – среднее значение (постоянная составляющая) процесса,
 σ^2 – дисперсия (средняя мощность переменной составляющей) процесса.
 Числовые характеристики случайного процесса определяются так:

$$m_1 = \int_{-\infty}^{\infty} xW(x)dx; \quad \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x-m_1)^2 W(x)dx; \quad m_2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 W(x)dx;$$

m_2 – полная средняя мощность процесса.

Следует запомнить, что при изменении среднего значения график ФПВ нормального процесса не меняет своей формы, но сдвигается вдоль оси x . При изменении дисперсии график ФПВ нормального процесса изменяет свою форму. При увеличении дисперсии кривая становится шире, но ниже. При уменьшении дисперсии кривая становится уже, но выше.

• Функция корреляции $B(t_1, t_2)$ – это второй смешанный центральный момент распределения. Функция корреляции характеризует степень статистической взаимосвязи двух значений случайного процесса, разделенных интервалом времени τ . Для стационарного эргодического процесса она зависит только от разности $(t_2 - t_1) = \tau$ и определяется по формуле:

$$B(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau)dt;$$

• Энергетический спектр $G(\omega)$ характеризует распределение энергии случайного процесса по частоте.

• Процесс, энергетический спектр $G(\omega)$ которого постоянен, равномерен в бесконечной полосе частот (рис. 7), называется белым шумом.

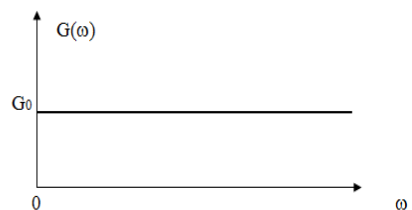


Рис.7. Энергетический спектр белого шума.

- Функция корреляции и энергетический спектр связаны между собой преобразованиями Винера-Хинчина:

$$B(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} G(\omega) \cos \omega \tau d\omega; \quad G(\omega) = 4 \int_0^{\infty} B(\tau) \cos \omega \tau d\tau;$$

- Если на входе линейной цепи действует нормальный случайный процесс, то процесс на выходе линейной цепи также будет нормальным, изменятся только его параметры.

Энергетический спектр процесса на выходе линейной цепи равен:

$$G(\omega)_{\text{ВЫХ}} = G(\omega)_{\text{ВХ}} K^2(\omega),$$

где $K(\omega)$ - амплитудно-частотная характеристика линейной цепи.

- Функция корреляции процесса на выходе линейной цепи $B(\tau)_{\text{ВЫХ}}$ находится как преобразование Винера-Хинчина от выходного спектра:

$$B(\tau)_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega)_{\text{ВЫХ}} e^{j\omega\tau} d\omega$$

Дисперсия выходного процесса равна $B(0)_{\text{ВЫХ}}$.

- Функция плотности вероятностей (ФПВ) процесса y на выходе линейного или нелинейного безынерционного элемента находится по формуле

$$W(y) = \frac{W(x)}{\frac{dy}{dx}};$$

где $y(x)$ - характеристика нелинейного элемента, (необходимо уметь рассчитывать ФПВ выходного процесса для типовых нелинейных элементов).

Вопросы для самопроверки

1. Что такое ансамбль сообщений?
2. Почему сигнал является детерминированным процессом для человека, передающего сообщение, и случайным для человека, принимающего сообщение?
3. Каково различие между случайной величиной и случайной функцией?
4. Что такое реализация случайного процесса и что такое ансамбль реализации случайного процесса?
5. Что такое одномерное и многомерное распределение случайного процесса?
6. Дайте определение числовым характеристикам случайного процесса.
7. Какой случайный процесс является стационарным?
8. Дайте определение эргодического случайного процесса.
9. Как вычисляется функция корреляции случайного процесса?
10. Почему для случайных функций вводится понятие энергетический спектр?
11. Какова связь между функцией корреляции и энергетическим спектром?
12. Что такое белый шум?

13. Как ведет себя случайный процесс, подчиняющийся закону Гаусса, при линейных и нелинейных преобразованиях?

3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ МОДУЛЯЦИИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

[1] с. 96-105; [2] с. 82-124; [3] с. 17-45;

В процессе работы над материалом данного раздела курса следует понять и запомнить следующие определения, зависимости и соотношения.

- Электрические цепи можно разделить на линейные (описываются дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами), нелинейные (описываются дифференциальными уравнениями с коэффициентами, зависящими от токов или напряжений) и параметрические (описываются дифференциальными уравнениями с коэффициентами, зависящими от времени).

- **Принцип суперпозиции (реакция цепи на суммарное воздействие равна сумме реакций на каждое воздействие в отдельности).** Этот принцип справедлив только для линейных и параметрических цепей. Новые частоты могут образовываться только в нелинейных и параметрических цепях.

- Аппроксимация - это замена истинной характеристики аналитическим выражением (степенным полиномом при полиномиальной аппроксимации, либо отрезками прямых при линейно-ломаной аппроксимации).

- Спектр тока на выходе нелинейного безынерционного элемента может быть найден методом "кратных дуг" при полиномиальной аппроксимации вольт-амперной характеристики (ВАХ) нелинейного элемента (НЭ), либо методом "угла отсечки" при линейно-ломаной аппроксимации ВАХ, либо методом "трех ординат" и "пяти ординат".

- **При амплитудной модуляции (АМ) амплитуда несущей изменяется в соответствии с низкочастотным модулирующим сигналом** (необходимо уметь нарисовать временную и спектральную диаграммы АМ для гармонического модулирующего сигнала, а также принципиальную схему амплитудного модулятора).

Если модулирующий сигнал гармонический:

$$U_{н.ч.}(t) = \cos \Omega t ;$$

где Ω - модулирующая, низкая частота,

ω_0 - несущая, высокая частота,

то АМ сигнал принимает вид:

$$U_{AM}(t) = U_m (1 + M_A \cos \Omega t) \cos \omega_0 t$$

U_m - средняя амплитуда АМ сигнала.

$M_A = \frac{\Delta U}{U_m}$ - глубина (коэффициент) АМ.

ΔU – максимальное изменение амплитуды АМ сигнала.

$$0 \leq M_A \leq 1$$

На рис.8 показаны временные диаграммы модулирующего сигнала $U_{нч}(t)$ и амплитудно-модулированного сигнала $U_{AM}(t)$.

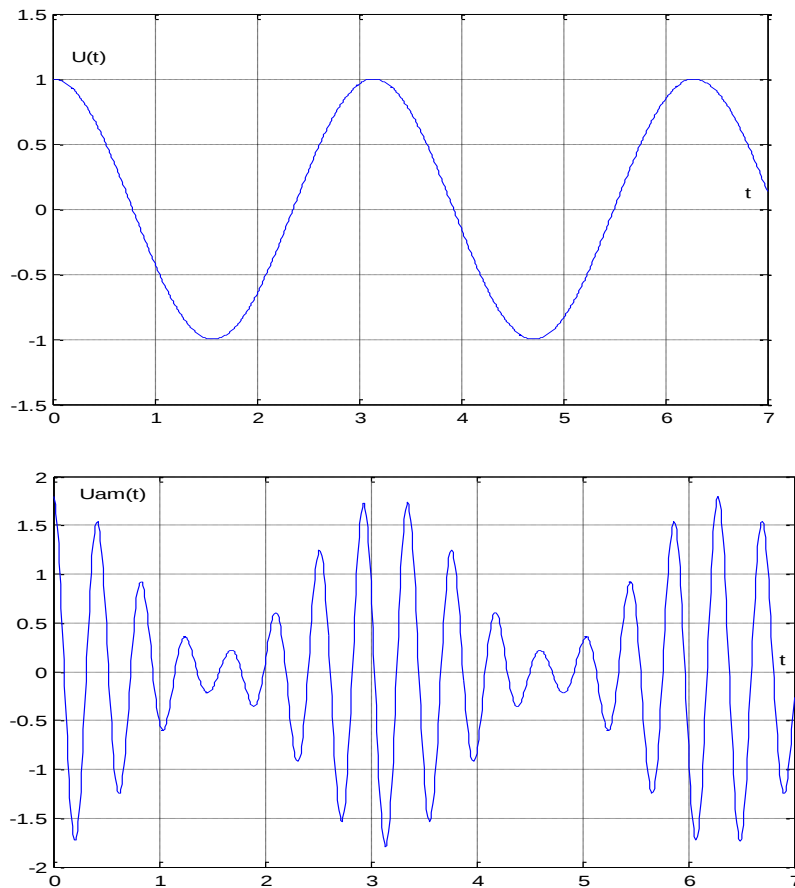


Рис.8. Временные диаграммы модулирующего и амплитудно-модулированного сигналов.

Спектр АМ сигнала (см. рис 9) содержит несущую с частотой ω_0 , нижнюю боковую с частотой $(\omega_0 - \Omega)$ и верхнюю боковую с частотой $(\omega_0 + \Omega)$:

$$U_{AM}(t) = U_m (1 + M_A \cos \Omega t) \cos \omega_0 t = U_m \cos \omega_0 t + \frac{M_A U_m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{M_A U_m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t$$

Спектр АМ сигнала.

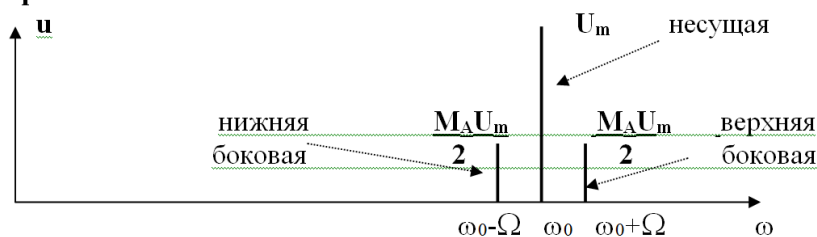


Рис.9 Спектр АМ сигнала.

Статическая модуляционная характеристика (СМХ) амплитудного модулятора - это зависимость амплитуды первой гармоники выходного тока (напряжения) модулятора от напряжения смещения при постоянной амплитуде несущей на входе модулятора (амплитуда модулирующего сигнала равна нулю).

Рабочий участок СМХ - это линейный участок, в середине которого выбирается рабочая точка. Необходимо уметь рассчитывать СМХ и определять параметры модулированного сигнала.

- Недостатком АМ является низкая энергетическая эффективность (несущая содержит больше 66% мощности всего сигнала) и полоса частот АМ сигнала в два раза больше полосы частот передаваемого сообщения. Наиболее эффективной является однополосная модуляция (ОМ). С помощью ОМ передается видеосигнал ТВ. Однополосная модуляция позволяет в два раза уменьшить ширину спектра модулированного сигнала (следует изучить способы формирования и детектирования однополосных сигналов, их преимущества и недостатки).

- Частота и фаза несущей взаимосвязанные величины $\omega = d\varphi/dt$ и $\varphi = \int \omega dt$. Поэтому частотная и фазовая модуляции взаимосвязанные процессы. **Если передаваемое сообщение $U_{нч}(t)$, то при частотной модуляции (ЧМ) частота несущей изменяется в соответствии с низкочастотным модулирующим сигналом:**

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega U_{нч}(t);$$

Здесь $\Delta\omega$ – девиация частоты. Фаза ЧМ сигнала будет также изменяться: $\varphi(t) = \omega_0 t + \Delta\omega \int U_{нч}(t) dt$. ЧМ сигнал можно записать при гармонической модуляции так:

$$u_{чм}(t) = U_m \cos(\omega_0 t + M_q \sin \Omega t); \quad M_q = \Delta\omega / \Omega - \text{индекс ЧМ.}$$

При фазовой модуляции (ФМ) фаза несущей изменяется в соответствии с низкочастотным модулирующим сигналом:

$$\varphi = \omega_0 t + M_\phi U_{нч}(t);$$

(M_ϕ - индекс фазовой модуляции). Мгновенная частота ФМ сигнала:

$$\omega = d\varphi/dt = \omega_0 + M_\phi dU_{нч}(t)/dt.$$

Поэтому ЧМ и ФМ можно рассматривать как единый вид модуляции – угловая модуляция (УМ) с параметрами $\Delta\omega$ и M .

Однако схема ЧМ существенно проще и она чаще используется на практике (УКВ ЧМ вещание, звуковая составляющая ТВ сигнала).

- На рис.10 показаны временные диаграммы модулирующего сигнала $U_{нч}(t)$ и частотно-модулированного сигнала $U_{чм}(t)$. Необходимо уметь нарисовать временную и спектральную диаграммы ЧМ для гармонического модулирующего сигнала, а также принципиальную схему частотного модулятора.

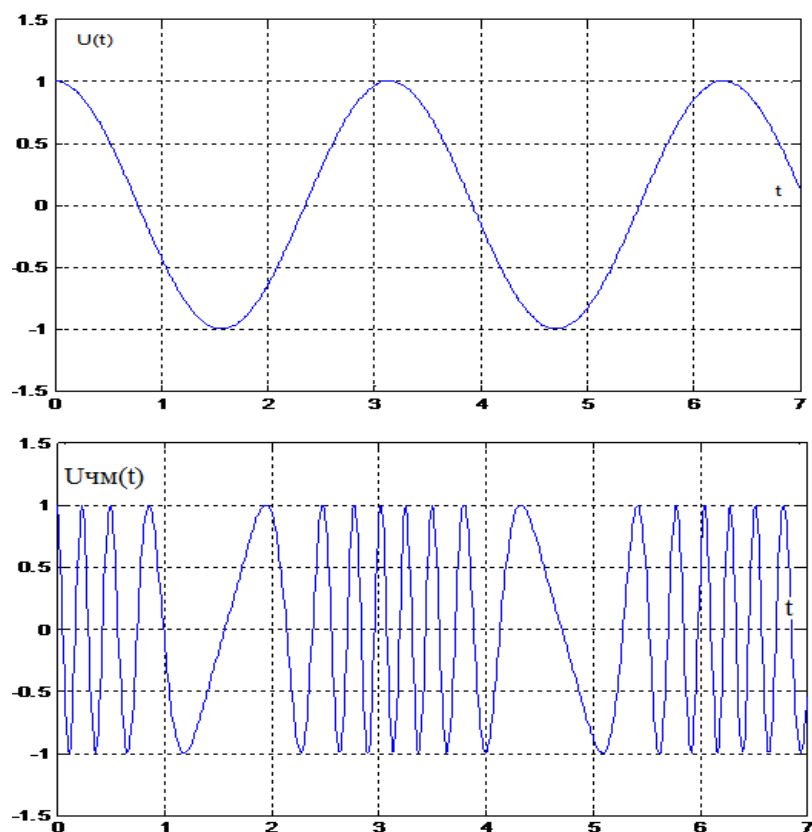


Рис.10 Временные диаграммы модулирующего и частотно-модулированного сигналов.

- **Статическая модуляционная характеристика (СМХ) частотного модулятора** – это зависимость частоты, генерируемой модулятором, от напряжения смещения. Рабочий участок выбирается на линейной части СМХ, в середине которого выбирается рабочая точка. Необходимо уметь рассчитывать СМХ и определять параметры модулированного сигнала $\Delta\omega$ и M).

- Демодуляция (детектирование) - операция обратная модуляции. **Назначение детектора состоит в том, чтобы из модулированного сигнала получить низкочастотный модулирующий сигнал**, Схема некогерентного амплитудного диодного детектора показана на рис.11.

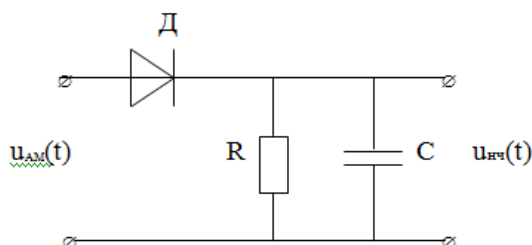


Рис.11. Амплитудный детектор.

Для маленьких напряжений ВАХ диода хорошо [аппроксимируется полиномом](#) 2-ой степени ($i=aU^2$), поэтому детектор для маленьких напряжений называется

“квадратичным”. Рабочий участок ВАХ для квадратичного детектора А-А (рис.12).

Для больших напряжений ВАХ диода [аппроксимируется отрезками прямых \(линейно-ломанная аппроксимация\)](#).

Для сигналов с большой амплитудой детектор называется "линейным". Рабочий участок Б-Б не линейный, а линейно-ломанный.

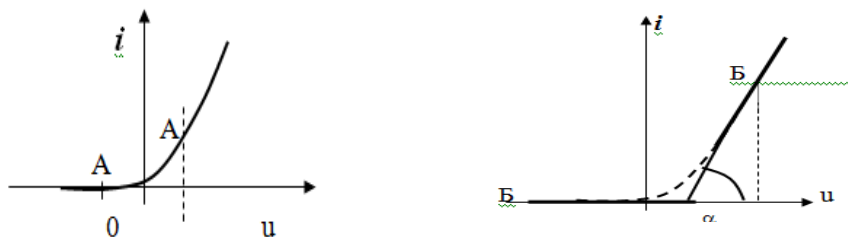


Рис.12. ВАХ диода для слабых и сильных сигналов.

Необходимо уметь рассчитывать спектр тока на выходе амплитудного некогерентного детектора для случаев квадратичного (рис.13) и линейного детекторов (рис.14).

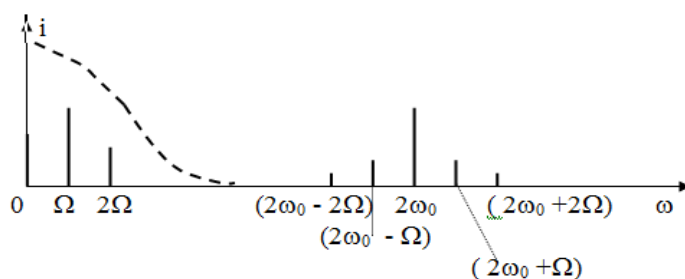


Рис.13. Спектр тока для квадратичного детектора.

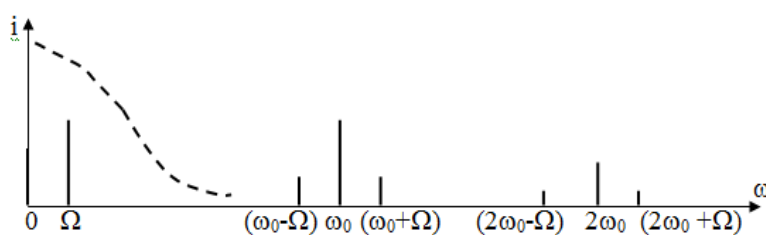


Рис.14. Спектр тока для линейного детектора.

Наилучшим детектором является когерентный детектор. Когерентный детектор перемножает принятый модулированный сигнал, например $U_{AM}(t)$, на опорное напряжение $U_{оп}(t)$, которое имеет частоту, совпадающую с частотой несущей ω_0 , и фазу, совпадающую с начальной фазой несущей. Произведение напряжений подается на интегратор. Таким образом, напряжение на выходе когерентного детектора равно:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{AM}}(t) U_{\text{он}}(t) dt$$

Когерентный детектор без искажений детектирует и слабые, и сильные сигналы.

Вопросы для самопроверки

1. Какие способы аппроксимации характеристик Вы знаете?
2. Каким методом можно рассчитать спектр тока на выходе нелинейного безынерционного элемента, если его ВАХ аппроксимирована полиномом?
3. Каким методом можно рассчитать спектр тока на выходе нелинейного безынерционного элемента, если его ВАХ аппроксимирована отрезками прямых?
4. Как можно рассчитать спектр тока на выходе нелинейного безынерционного элемента методами "трех ординат" и "пяти ординат"?
5. Запишите аналитическое выражение для сигнала АМ при гармонической модуляции.
6. Нарисуйте временную и спектральную диаграммы сигнала АМ при гармонической модуляции.
7. Нарисуйте принципиальную схему амплитудного модулятора и поясните назначение ее элементов.
8. Что такое СМХ для амплитудного модулятора и как по ней выбирается рабочий режим?
9. Запишите аналитическое выражение для сигнала ЧМ при гармонической модуляции.
10. Нарисуйте временную и спектральную диаграммы сигнала ЧМ при гармонической модуляции.
11. Нарисуйте принципиальную схему частотного модулятора и поясните назначение ее элементов.
12. Что такое СМХ для частотного модулятора и как по ней выбирается рабочий режим?
13. Нарисуйте принципиальную схему диодного амплитудного детектора.
14. Рассчитайте спектр тока на выходе квадратичного и линейного амплитудных детекторов.
15. Нарисуйте принципиальную схему частотного детектора.
16. Нарисуйте спектр сигнала однополосной АМ и поясните принципы когерентного детектирования такого сигнала.

4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАНАЛОВ СВЯЗИ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ В КАНАЛАХ СВЯЗИ

[1] с. 123-140; [2] с.126-157; [3] с. 60;

В процессе работы над материалом данного раздела курса следует понять и запомнить следующие определения, зависимости и соотношения.

- Канал связи - это совокупность средств, предназначенных для передачи сигналов между различными точками системы связи.

- Каналы подразделяются на непрерывные (на входе и выходе - непрерывные сигналы), дискретные (на входе и выходе - дискретные сигналы) и дискретно – непрерывные.
- Модель канала связи - это математическое упрощенное описание реального канала, отражающее наиболее существенные для передачи сигнала свойства канала.
- Если для заданного канала справедлив принцип суперпозиции, то канал является линейным, в противном случае, канал - нелинейный.
- Математическая модель дискретного канала связи включает в себя задание числа всех возможных входных и выходных сигналов и указание условных вероятностей выходных сигналов при заданных входных (необходимо уяснить, что такое канал с памятью и без памяти, канал симметричный и несимметричный, канал со стиранием и без стирания).
- Для непрерывных каналов используются следующие модели:
идеальный канал без помех, канал с аддитивным гауссовским шумом, канал с неопределенной фазой сигнала и аддитивным шумом, канал с межсимвольной интерференцией и аддитивным шумом, канал без замираний и с замираниями.

Вопросы для самопроверки

1. Что мы называем каналом связи?
2. Что такое математическая модель канала связи?
3. Какие параметры определяют модель дискретного канала?
4. Какие модели дискретных каналов используются в теории связи?
5. Какие каналы называются дискретными и какие называются непрерывными?
6. Какие модели непрерывных каналов используются в теории связи?
7. Какие типы помех могут действовать в каналах связи?

5. КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

(В тексте контрольного задания:

m - предпоследняя цифра номера студенческого билета;

n - последняя цифра номера студенческого билета)

1. Разработайте и нарисуйте обобщенную структурную схему системы связи. Кратко опишите назначение отдельных блоков и операций над сигналами в системе связи. Нарисуйте качественно временные диаграммы сигналов на выходе основных блоков структурной схемы.

Методические указания

Обобщенная структурная схема системы связи должна содержать блоки, перечисленные в разделе 1. Целесообразно нарисовать временные диаграммы после завершения всей контрольной работы, когда Вы получите более полное представление о преобразованиях сигналов в различных блоках системы связи.

2. Нарисуйте принципиальную схему амплитудного модулятора и постройте вольт-амперную характеристику (ВАХ) нелинейного элемента модулятора, которая аппроксимирована линейно-ломаной функцией:

$$i = S(u - E_0) \quad \text{при } u > E_0;$$

$$i = 0 \quad \text{при } u < E_0$$

$$E_0 = (m - n) - \text{напряжение отсечки (в вольтах);}$$

$$S = (m + 1) - \text{крутизна наклона ВАХ (в мА/В).}$$

Рассчитайте статическую модуляционную характеристику (СМХ) амплитудного модулятора. Выберите рабочий участок на СМХ и рабочую точку. Определите параметры АМ сигнала на выходе модулятора и запишите аналитическое выражение сигнала АМ для определенных числовых значений параметров модуляции.

Амплитуда несущего колебания на входе модулятора равна $V_m = 1$ В,

частота несущей равна $f_0 = (200 + n)$ кГц,

частота модулирующего сигнала равна $F = (m + 3)$ кГц,

сопротивление контура равно $R = (m+2)$ кОм.

Определите добротность колебательного контура модулятора.

Методические указания

Изучите разделы [1] с. 96-100 ; [2] с. 88-95; [3] с. 20-22, 25-30]

Принципиальная схема амплитудного модулятора приведена в [2] на с. 94, рис. 3.14; в [3] на с. 26 рис.7.5.

Расчет СМХ выполняется в следующей последовательности:

- определяем пределы изменения напряжения смещения E

$$E_0 - V_m \leq E \leq E_0 + V_m$$

- выбираем значением напряжения смещения E' из определенного выше диапазона с шагом 0,2 В;

- определяем угол отсечки θ : $\theta = \arccos[(E_0 - E')/U_m]$

- определяем амплитуду первой гармоники выходного тока модулятора;

$I_1 = S U_m \gamma_1(\theta)$, где $\gamma_1(\theta)$ - коэффициент Берга для расчета первой гармоники, который может быть найден рис. П.1 на с. 62 в [3].

- используя рассчитанные значения I_1 строим СМХ;

- выбираем линейный участок на СМХ (это будет рабочий участок), в середине линейного участка - рабочая точка;

- определяем границы рабочего участка по напряжению смещения $E_{\max}$ и $E_{\min}$, по току $I_{\max}$ и $I_{\min}$; и ток в рабочей точке $I_{\text{рт}}$;

- определяем среднюю, максимальную и минимальную амплитуду несущей

$$U_m = I_{\text{рт}} R, U_{\max} = I_{\max} R, U_{\min} = I_{\min} R;$$

- определяем глубину модуляции $M_a = (U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min})$.

Записываем аналитическое выражение для сигнала АМ, и подставляем вычисленные значения параметров:

$$u_{\text{ам}}(t) = U_m(1 + M_a \cos \Omega t) \cos \omega_0 t.$$

3. Нарисуйте принципиальную схему частотного модулятора и рассчитайте статическую модуляционную характеристику (СМХ) частотного модулятора, если емкость варикапа, подключенного параллельно емкости резонансного контура частотно-модулируемого генератора, зависит от напряжения смещения

$$C_v = (n + 2)/E \text{ пФ, при } 1 \text{ В} \leq E \leq 2 \text{ В.}$$

$$\text{Емкость контура генератора равна: } C = (100 + m) \text{ пФ,}$$

$$\text{индуктивность } L = (100 - n) \text{ мкГн.}$$

Выберите рабочий участок на СМХ и рабочую точку, определите параметры ЧМ сигнала на выходе модулятора, запишите аналитическое выражение для ЧМ сигнала.

$$\text{Амплитуда ЧМ колебания на выходе модулятора } U_m = (m + 1) \text{ В,}$$
$$\text{частота модулирующего сигнала равна } F = (n + 1) \text{ кГц.}$$

Методические указания

Изучите разделы [1] с.100-105; [2] с. 96-102; [3] с. 37-40].

Принципиальная схема частотного модулятора приведена в [2] на с. 100 рис. 3.25.

Статическая модуляционная характеристика (СМХ) частотного модулятора представляет зависимость частоты сигнала управляемого генератора от величины напряжения смещения на варикапе. Расчет СМХ проводите с шагом 0,2 В.

На СМХ выберите линейный (рабочий) участок, в середине которого - рабочую точку.

Определите границы рабочего участка по напряжению смещения $E_{\max}$ и $E_{\min}$, по частоте $f_{\max}$ и $f_{\min}$ и частоту в рабочей точке f_0 ;

Рассчитайте девиацию частоты $f_d = f_{\max} - f_0 = f_0 - f_{\min}$ и индекс частотной модуляции: $M_q = f_d / F$;

Аналитическое выражение для ЧМ сигнала равно

$$u_{\text{чм}}(t) = U_m \cos(\omega_0 t + M_q \sin \Omega t).$$

4. В соответствии с выполненными в п. 1 и 2 расчетами постройте в масштабе:

- три временные диаграммы (модулирующий сигнал, АМ сигнал и ЧМ сигнал), укажите числовые значения параметров сигналов;

- три спектральные диаграммы (спектр модулирующего гармонического сигнала, спектр АМ сигнала и спектр ЧМ сигнала). На графиках спектров укажите значения амплитуд и частот гармоник и параметры АМ и ЧМ сигналов.

Сравните энергетические и спектральные характеристики АМ и ЧМ сигналов.

Методические указания

Изучите разделы: [1] с. 96-105; [2] с. 88-98; [3] с. 25-26, 31, 37-38;

На диаграммах следует указать максимальные, минимальные и средние значения амплитуд или частот, ширину спектра сигналов АМ и ЧМ, амплитуды и частоты составляющих спектра.

Для расчета спектра ЧМ сигнала используйте графики функций Бесселя:[1] с.104, рис.4.7; [2] с.98, рис. 3.21; [3] рис. П.3 с. 63 или таблицы функций Бесселя в математических справочниках и программах компьютерного расчета Matlab или Mathcad.

5. Модулированный сигнал поступает на вход приемного устройства в сумме с аддитивным нормальным белым шумом со спектральной плотностью энергии $G_0 = (m + n + 1) \cdot 10^{-6} \text{ В}^2/\text{Гц}$.

Рассчитайте функцию корреляции белого шума на выходе идеального полосового фильтра с полосой пропускания, соответствующей ширине спектра и несущей сигнала АМ, определенной Вами в п. 2.

Запишите выражение для функции плотности вероятностей (ФПВ) шума на выходе идеального полосового фильтра, определите дисперсию шума и постройте график ФПВ.

Рассчитайте вероятность того, что значения шума превысят 0 В, σ В и 1 В.

Методические указания

Изучите разделы: [1] с. 86-91; [2] 57-60; [3] с.56-59;

Функция корреляции шума на выходе полосового фильтра может быть найдена следующим образом:

- определяем энергетический спектр шума на выходе идеального полосового фильтра:

$$G_{\text{вых}}(\omega) = G_0 K_0^2 \quad \text{при } \omega_0 - \Omega < \omega < \omega_0 + \Omega,$$

Ω - модулирующая частота в п.2 задания,

- определяем функцию корреляции выходного шума $B_{\text{вых}}(\tau)$, используя преобразование Винера-Хинчина (см. указанные выше разделы учебников или данных МУ);

- вычисляем дисперсию шума на выходе фильтра $\sigma^2 = B_{\text{вых}}(0)$

(σ - среднеквадратическое значение шума);

- процесс на выходе фильтра является нормальным со средним значением равным нулю, и определенной выше дисперсией.

При расчете вероятностей используйте функцию Лапласа $F(x)$.

Значения функции Лапласа $F(x)$ найдите в математических справочниках и программах компьютерного расчета Matlab или Mathcad.

6. Модулированные сигналы АМ и ЧМ поступают на вход соответственно амплитудного детектора и частотного детектора.

Начертите принципиальные схемы амплитудного диодного детектора и частотного детектора на расстроенных контурах. Поясните принципы работы амплитудного и частотного детекторов.

Рассчитайте спектр тока через диод для АМ детектора.

ВАХ диода аппроксимирована отрезками прямых:

$$i = 0 \quad \text{при } u < 0;$$

$$i = Su \quad \text{при } u > 0.$$

$$S = (m+5) \text{ [mA/V]}.$$

Сопротивление нагрузки детектора $R = (m + 100) \text{ [Ом]}$.

Емкость нагрузки детектора $C = (0.1 + 0.0n) \text{ [мкФ]}$

Параметры входного АМ сигнала следует взять в п. 2.

Рассчитайте спектр напряжения на выходе RC-фильтра детектора.

Постройте графики спектров тока и напряжения на выходе детектора, на которых укажите значения амплитуд и частот гармоник спектров.

Методические указания

Изучите разделы: [2] с. 88-102; [3] с. 32-36, 40-42;

Принципиальные схемы амплитудного и частотного детекторов приведены на рисунках в учебниках [2] с. 95; [3] с. 32 и 41.

Расчет спектра тока через диод осуществляется в следующем порядке:

- представляем ток через диод в виде ряда Фурье:

$$i = I_0 + I_1 \cos \omega_0 t + I_2 \cos 2\omega_0 t + \dots ;$$

- рассчитываем амплитуды гармоник тока I_0, I_1, I_2 :

$$I_k = SU_m (1 + M_a \cos \Omega t) \gamma_k(\theta) .$$

Коэффициенты Берга $\gamma_k(\theta)$ определяются по [3] рис. П.1, с. 62. Угол отсечки θ принять равным 90° .

Расчет спектра напряжений следует выполнить только для составляющих с частотами $0, \Omega, \omega_0 - \Omega, \omega_0, \omega_0 + \Omega$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. А.С. Аджемов, В.Г. Санников. Общая теория связи.- Москва.: Горячая линия-Телеком, 2018, 624 с.

Дополнительная

2. А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров Теория электрической связи.- М.: Радио и связь, 1999, 433 с.

3. А.С. Сухоруков Теория электрической связи (часть 1),
конспект лекций.- МТУСИ.: ЦЕНТР ДО , 2018, 65 с .

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
1. Общие сведения о системах электросвязи.....	4
2. Математические модели сообщений, сигналов и помех	6
3. Основы теории модуляции и детектирования	11
4. Математические модели каналов связи и преобразования сигналов в каналах связи.....	17
5. Контрольное задание и методические указания по его выполнению	14
Список литературы	22