

Содержание

Введение	4
Лабораторная работа №1. Формирование сигналов с амплитудной и угловой модуляцией.....	5
Лабораторная работа №2. Преобразование частоты радиосигналов.....	13
Лабораторная работа №3. Исследование амплитудного модулятора.....	18
Лабораторная работа №4. Исследование амплитудного, частотного и фазового детекторов	24
Лабораторная работа №5. Исследование сигналов и их спектров.....	43
Лабораторная работа №6. Исследование процессов дискретизации и квантования сигналов	51
Лабораторная работа №7. Исследование аналого-цифрового преобразования сигналов.....	60
Лабораторная работа №8. Исследование ковариационных функций прямоугольных сигналов и дискретных сигналов.....	67
Лабораторная работа №9. Исследование стационарных случайных процессов	76
Литература	86

Введение

Несомненным представляется тот факт, что уровень профессиональной подготовленности специалистов в области информационной безопасности телекоммуникационных систем предполагает обязательное и полное знание особенностей построения и принципов действия систем передачи информации (СПИ), в частности, систем электросвязи (ЭС).

Электрическая связь является одной из самых динамичных отраслей мировой экономики. В системах ЭС воплощены практически все достижения науки, современные информационные технологии.

Соответственно, знания общих принципов и основных методов формирования, преобразования и передачи информационных сообщений по каналам электросвязи, принципов реализации оптимального приёма становятся в данном случае доминантными.

Настоящий лабораторный практикум направлен на закрепление у обучающихся необходимых знаний, умений и навыков по данной дисциплине.

Необходимо отметить, что для успешного выполнения всего цикла лабораторных работ по дисциплине студенты должны владеть навыками работы с аппаратными средствами – измерительной аппаратурой общего и специального назначения наряду с умением использовать различные программные средства, позволяющие проводить моделирование элементов и узлов систем ЭС.

Лабораторная работа №1 (4 часа)

Формирование сигналов с амплитудной и угловой модуляцией

Цель работы: изучение характеристик сигналов с амплитудной и угловой модуляцией и способов их формирования.

1. Домашнее задание.

1.1. Изучите содержание работы и краткие теоретические сведения.

1.2. Составьте алгоритм расчёта необходимых характеристик и соответствующее ПМО.

1.3. Ознакомьтесь с индивидуальным заданием на выполнение лабораторной работы.

2. Основные теоретические сведения.

Для передачи информации на расстояние применяются радиосигналы, эффективно излучаемые с помощью антенных устройств и обладающие способностью распространяться в виде свободных электромагнитных волн в среде, разделяющей отправителя и получателя информации. Такими радиосигналами являются модулированные колебания.

Используем в качестве несущей (переносчика сообщений) гармонический сигнал

$$u_{\omega_0}(t) = U_{M_0} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.1)$$

Он характеризуется тремя параметрами: амплитудой U_0 , фазой φ_0 и частотой ω_0 . Меняя эти параметры во времени по закону первичного сигнала $b(t)$, получаем соответственно сигналы амплитудной (АМ), фазовой (ФМ) и частотной (ЧМ) модуляций. Зависимость меняющихся параметров несущей от первичного сигнала называют модуляционной характеристикой.

Линейную амплитудную модуляцию можно записать

$$u_{AM}(t) = U_M(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = [U_{M_0} + K_{AM} b(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.2)$$

где $U_M \geq 0$ - огибающая (амплитуда) АМ сигнала, K_{AM} - крутизна характеристики модулятора. Сигнал (1.2) можно записать в виде

$$U_{AM}(t) = U_{M_0} [1 + Mx(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.3)$$

где $M = \frac{K_{AM}|b(t)|_{max}}{U_{M_0}}$ - коэффициент глубины амплитудной модуляции,

$x(t) = \frac{b(t)}{|b(t)|_{max}}$ - нормированный модулирующий сигнал, $|x(t)| \leq 1$.

Величина $\Delta U = MU_{M_0}$ определяет девиацию (максимальное отклонение) амплитуды в ходе модуляции.

При тональной модуляции $b(t) = U_{M\Omega} \cos(\Omega t + \varphi_\Omega)$ получаем

$$u_{AM}(t) = [U_{M0} + K_{AM}U_{M\Omega} \cos(\Omega t + \varphi_{\Omega})] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_{M0}[1 + M \cos(\Omega t + \varphi_{\Omega})] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.4)$$

Сигнал (1.4) можно представить

$$u_{AM}(t) = U_{M0} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{MU_{M0}}{2} \cos((\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0 + \varphi_{\Omega}) + \frac{MU_{M0}}{2} \cos((\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0 - \varphi_{\Omega}) \quad (1.5)$$

Этот сигнал содержит компоненты на частоте несущей (f_0) и на боковых частотах: верхней (f_0+F) и нижней (f_0-F), $F=\Omega/(2\pi)$ и АЧС имеет вид:

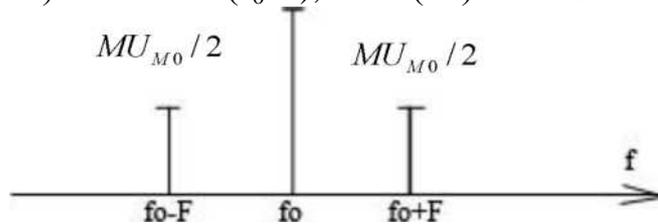


Рис. 1.1. АЧС модулированного сигнала

Из (1.5) видно, что средняя мощность несущей в АМ сигнале $P_H = \frac{U_{M0}^2}{2}$, в то время как средняя мощность двух боковых компонент составляет

$$P_6 = \frac{2M^2U_{M0}^2}{8} = P_H \frac{M^2}{2}. \quad (1.6)$$

Суммарная средняя мощность

$$P_{\Sigma} = P_H + P_6 = P_H \left(1 + \frac{M^2}{2}\right). \quad (1.7)$$

Таким образом, полезная мощность АМ сигнала (определяемая боковыми составляющими, дающими информацию о частоте первичного сигнала и его интенсивности) составляет лишь $\left(\frac{M^2}{2} \cdot 100\right)\%$ от мощности несущей и $\left(\frac{M^2}{2+M^2} \cdot 100\right)\%$ от общей средней мощности. При $M = 1$ эти доли составляют соответственно 50 и 33 %.

На практике (во избежание перемодуляции и для уменьшения искажений при модуляции и детектировании) M берут не более 0,5.. 0,7. Отсюда видно, что АМ является неэкономичным видом модуляции, т.к. основная мощность сигнала приходится на центральную спектральную составляющую, не несущую информацию о сообщении.

В транзисторном каскаде модуляция амплитуды колебаний может осуществляться вариацией режима работы каскада путем изменения напряжения на коллекторе и появлением амплитудной модуляции, вследствие изменения коэффициента усиления каскада по первой гармонике тока I_{k1} . При этом напряжение на коллекторе транзистора (рис.1.2) рассматривается как сумма высокочастотного колебания, действующего на контуре, постоянного напряжения коллекторного питания E_k и напряжения источника модулирующего сигнала. Для получения неискаженной модуляции требуется,

чтобы амплитуда I_{k1} изменялась пропорционально изменению модулирующего напряжения.

Зависимость I_{k1} от постоянного напряжения на коллекторе U_k , получаемая при постоянной амплитуде входного базового высокочастотного напряжения несущей U_{M0} , называется статической модуляционной характеристикой.

При коллекторной модуляции (рис. 1.2) заметное влияние оказывает нелинейная зависимость емкостей переходов (эмиттерного и коллекторного) от модулирующего напряжения, приводящая к расстройке выходного контура и искажениям модулированного сигнала. В данной работе это явление не учитывается.

Из схемы видно, что напряжение несущего колебания $U_{\omega_0}(t)$ подается на базу транзистора через разделительную емкость C_p и дроссель ДР1.

Напряжение смещения на базу поступает с цепочки R_3C_3 , включенной в эмиттер. Модулирующий сигнал подается последовательно с напряжением коллекторного питания E_k через НЧ трансформатор T_p . Фильтр, составленный из ДР2 и C_6 препятствует прохождению тока высокой частоты I_{k1} в модулирующий трансформатор (развязка по высокой частоте).

Таким образом, на коллекторе VT1 относительно земли действует три напряжения: ВЧ напряжение на контуре, НЧ модулирующий сигнал, напряжение питания коллектора.

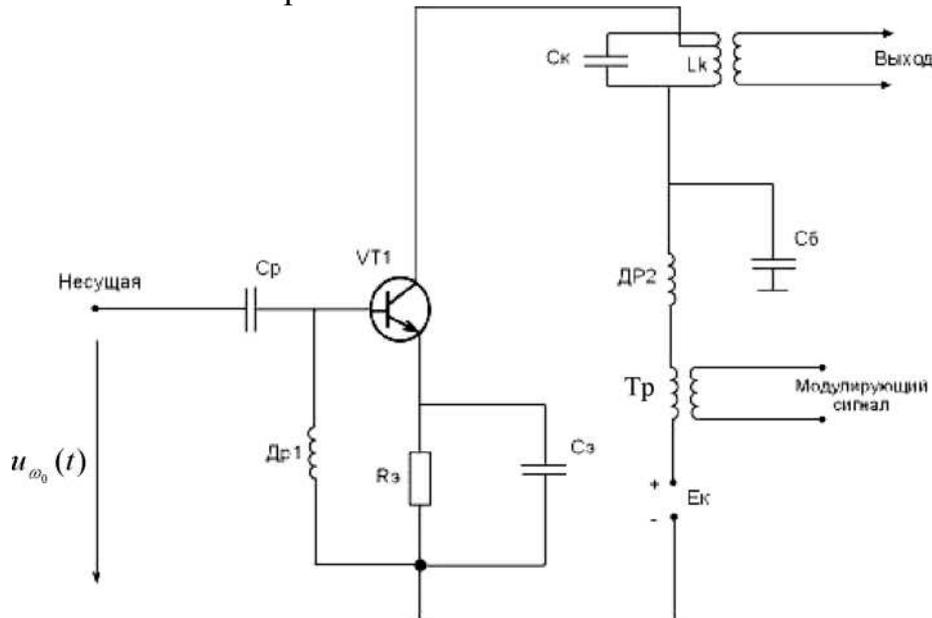


Рис. 1.2. Схема осуществления амплитудной модуляции за счет изменения напряжения на коллекторе транзистора

Сигнал угловой модуляции (УМ) при гармонической несущей можно представить так

$$u_{\text{УМ}}(t) = U_{M0} \cos(\psi(t)) = U_{M0} \cos(\omega_0 t + \varphi(t)), \quad (1.8)$$

где $\psi(t) = \omega_0 t + \varphi(t)$ – полная мгновенная фаза сигнала; $\varphi(t)$ – фаза, которая несёт в себе информацию о первичном сигнале $b(t)$. Амплитуда сигнала УМ, а

следовательно, и его средняя мощность неизменны, что облегчает режим работы выходных каскадов передатчика.

На практике различают два вида УМ: фазовая модуляция и частотная модуляция. При ФМ изменения фазы $\varphi(t)$ прямо пропорциональны первичному сигналу

$$\varphi_{\text{ФМ}}(t) = K_{\text{ФМ}}b(t) + \varphi_0, \quad (1.9)$$

где φ_0 – начальная фаза,

$K_{\text{ФМ}}$ – коэффициент пропорциональности между изменением фазы и управляющим (модулирующим) сигналом с размерностью рад/В.

При ЧМ мгновенная частота сигнала прямо пропорциональна первичному сигналу

$$\omega_{\text{ЧМ}}(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = \omega_0 + K_{\text{ЧМ}}b(t) \quad (1.10)$$

Аналогично сказанному выше $K_{\text{ЧМ}}$ имеет размерность рад/В·с.

Мгновенной частоте $\omega_{\text{ЧМ}}(t)$ соответствует полная фаза

$$\psi(t) = \int \omega_{\text{ЧМ}}(t)dt = \omega_0 t + K_{\text{ЧМ}} \int b(t) dt \quad (1.11)$$

Формы сигналов ФМ и ЧМ не отличаются друг от друга, если производная первичного сигнала во времени имеет тот же вид, что и сам первичный сигнал. Это, в частности, выполняется при синусоидальном первичном сигнале

$$b(t) = U_{\text{М}\Omega} \sin \Omega t \quad (1.12)$$

Сигнал УМ в этом случае можно записать в виде

$$u_{\text{УМ}}(t) = U_{\text{М}0} \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t), \quad (1.13)$$

где m – так называемый индекс модуляции, который имеет смысл максимального приращения (девиации) фазы $\Delta\varphi$ (амплитуда изменения фазы, выраженная в радианах). С учётом (1.9) и (1.12) индекс фазовой модуляции

$$m_{\text{ФМ}} = \Delta\varphi = K_{\text{ФМ}}U_{\text{М}\Omega} \quad (1.14)$$

С учётом (1.10) и (1.12) индекс частотной модуляции

$$m_{\text{ЧМ}} = \Delta\varphi = \frac{K_{\text{ЧМ}}U_{\text{М}\Omega}}{\Omega}, \quad (1.15)$$

причём девиация частоты

$$\Delta\omega = K_{\text{ЧМ}}U_{\text{М}\Omega}. \quad (1.16)$$

следовательно, индекс частотной модуляции

$$m_{\text{ЧМ}} = \frac{\Delta\omega}{\Omega} = \frac{\Delta f}{F}. \quad (1.17)$$

Спектр при угловой модуляции осуществляется одним тоном. Представим сигнал при угловой модуляции, осуществляемый одним тоном (1.13), выражением

$$u_{\text{УМ}}(t) = U_{\text{М}0} \text{Re}[e^{j\omega_0 t} e^{jm \sin \Omega t}]. \quad (1.18)$$

Известно разложение

$$e^{jm \sin x} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(m) e^{jkx}, \quad (1.19)$$

где $J_k(m)$ – функция Бесселя k – го порядка от аргумента m (m – любое вещественное число).

Справедливо соотношение

$$J_{-k}(m) = (-1)^k J_k(m) \quad (1.20)$$

Подставляя (1.19) в (1.18), получим

$$\begin{aligned} u_{\text{УМ}}(t) &= U_{\text{М0}} \operatorname{Re} \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(m) e^{j(\omega_0 + k\Omega)t} \right] = \\ &= U_{\text{М0}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(m) \cos(\omega_0 + k\Omega)t \end{aligned} \quad (1.21)$$

Из свойств функции Бесселя известно, что чем больше порядок функции Бесселя, тем протяжнее область значений аргумента, при которых модуль этой функции очень мал [2,3]. Обычно считают, что можно пренебречь спектральными составляющими с номером $k > (m + 1)$. Таким образом, практически ширину полосы частот при тональной угловой модуляции находят приблизительно из соотношения

$$\Delta\omega_{\text{УМ}} = 2\Omega(1 + m), \quad (1.22)$$

считая, что можно пренебречь спектральными составляющими, имеющими номера $k > m + 1$.

Надо помнить, что спектр УМ сигнала не ограничен. Или

$$\Delta f_{\text{УМ}} = 2F(1 + m), \quad (1.23)$$

Практическая ширина полосы частот при УМ шире, чем при АМ, в $(m + 1)$ раз.

Если $m \ll 1$, то $\Delta f_{\text{УМ}} = 2F$, т.е., в амплитудно-частотном спектре сигнала УМ доминируют только несущая и две боковые составляющие (как при АМ), остальными можно пренебречь в силу малости. Этот результат следует из общей формулы (1.19) при $m \ll 1$. Действительно, из свойств функции Бесселя известно, что при малых индексах $J_0(m) \approx 1$, $J_1(m) \approx m/2$, $J_k(m) = 0$, при $k \geq 2$. Но тогда из (1.20) и (1.21) следует

$$u_{\text{УМ}}(t) = U_{\text{М0}} \cos \omega_0 t + \frac{m}{2} U_{\text{М0}} \cos(\omega_0 + \Omega)t - \frac{m}{2} U_{\text{М0}} \cos(\omega_0 - \Omega)t \quad (1.24)$$

Если $m \gg 1$ (этот случай представляет основной практический интерес, так как при больших m помехоустойчивость УМ существенно выше, чем АМ), то из (1.23) имеем приближенное соотношение

$$\Delta f_{\text{УМ}} \approx 2Fm \quad (1.25)$$

Поскольку при частотной модуляции $m_{\text{ЧМ}} = \Delta f / F$, то из (1.25) получаем, что при больших индексах модуляции

$$\Delta f_{\text{ЧМ}} \approx 2\Delta f \quad (1.26)$$

т.е. ширина полосы частот при ЧМ равна удвоенной величине девиации частоты и не зависит от частоты модуляции F .

Одна из возможных схем реализации сигнала с УМ приведена ниже. Рассмотрим нелинейную схему, содержащую перемножители.

Используя формулу

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos\alpha \cos\beta - \sin\alpha \sin\beta, \quad (1.27)$$

представим (1.8) в виде

$$u_{\text{УМ}}(t) = U_{M0} \cos\varphi(b(t)) \cos\omega_0 t - U_{M0} \sin\varphi(b(t)) \sin\omega_0 t \quad (1.28)$$

На рис. 1.3 представлена структурная схема, реализующая УМ согласно формуле (1.28). На схеме первый нелинейный блок реализует преобразование сигнала $b(t)$ в сигнал $\sin\varphi(b(t))$. В блоке Γ_{ω_0} генерируется несущая $U_{M0} \cos(\omega_0 t)$. В блоке фазовращателя осуществляется поворот фазы на $-\pi/2$.

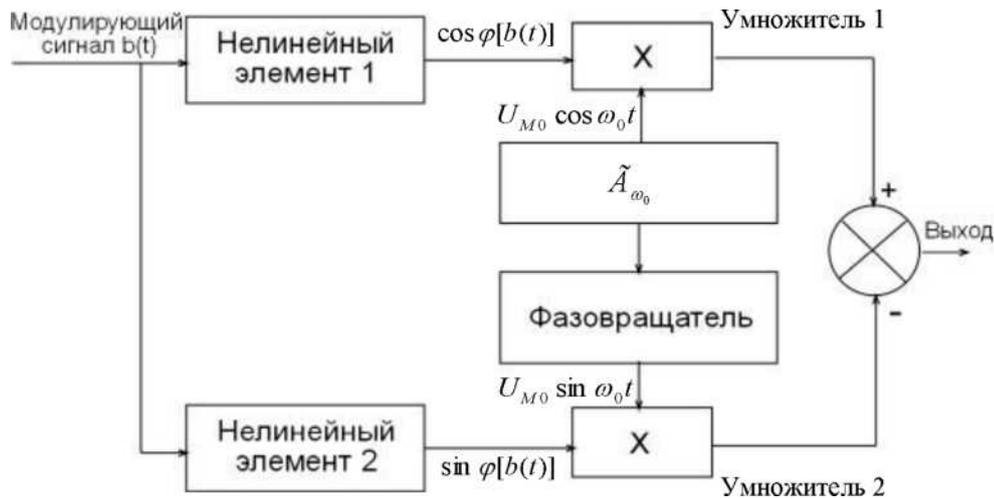


Рис. 1.3. Схема угловой модуляции с нелинейными блоками и умножителями

3. Проведение лабораторного исследования.

В соответствии с разработанной программой студентам предлагается исследовать приведённые схемы по формированию сигналов с амплитудной и угловой модуляцией. В программе должно быть предусмотрено изменение параметров, выбор модулирующего сигнала, вывод графиков и расчётных значений на монитор, а также удаление графиков и масштабирование по осям. Вариант выполнения работы выдаётся студентам преподавателем. Выполняя работу, следует зарисовать исследуемую схему и графики сигналов, вывод которых на экран должен быть предусмотрен в алгоритме, разработанном студентом при подготовке к выполнению работы.

Таблица 1.1

Формирование сигналов с амплитудной модуляцией

Параметры	Варианты						
	1	2	3	4	5	6	7
Длительность процесса, с	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Амплитуда несущей, В	1.7	1.2	1	0.8	0.8	1	1.5
Частота несущей, Гц	20	25	30	35	40	45	50
Период модулирующего сигнала, с	0.4	0.5	0.6	1	0.9	0.8	0.7
Амплитуда модулирующего сигнала, В	1.2	1.4	0.7	0.8	1	1.2	1.6
Коэффициент затухания контура	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	0.2
Крутизна характеристики, мА/В	0.8	0.85	0.9	0.95	1	1.05	1.1
Кривизна характеристики, мА/В ²	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3

Кривизной вольтамперной характеристики называется вторая производная в рабочей точки характеристики или первая производная от крутизны в той же точки. Например, если ВАХ прямой передачи транзистора параболична $i_k = aU_{бэ}^2$, то крутизна линейно зависит от положения рабочей точки на ВАХ, $S = \frac{di_k}{dU_{бэ}} = 2aU_{бэ}$, а кривизна постоянна $\frac{dS}{dU_{бэ}} = 2a$.

Таблица 1.2

Формирование сигналов с угловой модуляцией

Параметры	Варианты						
	1	2	3	4	5	6	7
Длительность процесса, с	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2
Амплитуда несущей, В	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
Частота несущей, Гц	75	80	85	90	95	100	105

Период модулирующего сигнала, с	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Амплитуда модулирующего сигнала, В	7	6	5	4	7	6	5
Сдвиг фазы в фазовращателе	0	-30	-60	-90	-120	-150	-180
Коэффициент передачи НЭ1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
Коэффициент передачи НЭ2	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1

4. Отчёт должен содержать.

- 4.1. Краткие теоретические сведения.
- 4.2. Иллюстрационные материалы.
- 4.3. Выводы по работе.

5. Контрольные вопросы.

- 5.1. Что такое модуляция? Какие виды модуляции вы знаете?
- 5.2. Дайте определение модуляционной характеристике для АМ и УМ.
- 5.3. Укажите, как соотносятся мощности спектральных составляющих в спектре однотоновой АМ.
- 5.4. Поясните работу схемы АМ-модулятора.
- 5.5. В чем отличие фазовой модуляции от частотной?
- 5.6. Во сколько раз отличается практическая ширина полосы частот при УМ от полосы частот при АМ, если известно, что $F=1$ кГц, а индекс угловой модуляции $m=10$?
- 5.7. Изобразите схему УМ с нелинейными блоками и умножителями и поясните ее работу. Какой сигнал формируется на выходе, если модулирующий сигнал гармонический? Индекс угловой модуляции $m=10$. Запишите его математическую модель, если модулирующий сигнал гармонический.
- 5.8. Зарисуйте АЧС сигнала ЧМ с девиацией частоты $\Delta f = 10$ кГц, частотой модуляции $F = 2$ кГц, амплитудой $U_{M0} = 1$ В. Какова ширина спектра?
- 5.9. Зарисуйте АЧС сигнала ЧМ с девиацией $\Delta f = 80$ кГц, $F=2$ кГц, $U_{M0}=1$ В. Какова ширина спектра?
- 5.10. Поясните взаимосвязь эффективной ширины спектра и изменяющегося расстоянием между спектральными составляющими спектра для ЧМ и ФМ сигналами.
- 5.11. Зарисуйте спектры широкополосной угловой модуляции при следующих индексах модуляции: а) $M = 0.5$; б) $M = 1$.
- 5.12. Поясните принципы и зарисуйте схемы косвенных методов получения ЧМ из ФМ.

Литература [1,2,3].

Лабораторная работа №2 (4 часа)

Формирование сигналов с амплитудной и угловой модуляцией

Цель работы: изучение характеристик сигналов с амплитудной и угловой модуляцией и способов их формирования.

1. Домашнее задание.

1.1. Изучите содержание работы и краткие теоретические сведения.

1.2. Составьте алгоритм расчёта необходимых характеристик и соответствующее ПМО.

1.3. Ознакомьтесь с индивидуальным заданием на выполнение лабораторной работы.

2. Основные теоретические сведения.

Под преобразованием частоты радиосигнала понимают такое нелинейное преобразование его, в результате которого спектр сигнала без изменения структуры переносится обычно из области высоких частот в область более низких частот. Новая частота, на которой теперь расположен спектр сигнала, называется промежуточной частотой.

Очевидно, что сигнал на промежуточной частоте может быть получен только как комбинационное колебание в результате взаимодействия в нелинейном элементе двух колебаний с отличающимися частотами.

Отсюда следует, что в состав преобразователя частоты (смесителя) должны входить три устройства (рис. 2.1): перестраиваемый гетеродин – местный источник высокочастотных гармонических колебаний с частотой ω_r , отличной от частоты входного сигнала на $\omega_{пр}$; нелинейный элемент (НЭ), спектр выходного тока которого содержит полезную комбинационную составляющую, и селективный фильтр, выделяющий требуемую комбинационную составляющую на промежуточной частоте. Обычно это $\omega_{пр} = \omega_c - \omega_r$.

Вход: $U_{MC} \cos \omega_c t$. Выход: $\frac{KU_{MC}U_{MГ}}{2} \cos(\omega_c - \omega_r)t$

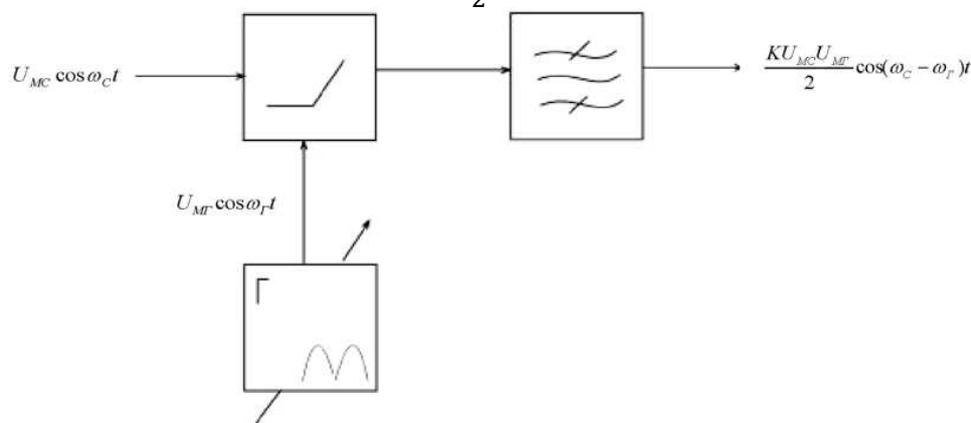


Рис. 2.1. Структурная схема преобразователя частоты

В полиноме, описывающем ВАХ НЭ, должно обязательно находиться квадратичное слагаемое $a_2 U^2$. Действительно, пусть ВАХ описывается полиномом второй степени $i = a_0 + a_1 U + a_2 U^2$, a_1 - крутизна в рабочей точке, a_2 - кривизна,

$$\begin{aligned} i(t) &= a_0 + a_1(U_{MC} \cos \omega_c t + U_{MG} \cos \omega_r t) + a_2(U_{MC} \cos \omega_c t + U_{MG} \cos \omega_r t)^2 \\ &= \\ &= a_0 + a_1(U_{MC} \cos \omega_c t + U_{MG} \cos \omega_r t) + a_2 U_{MC}^2 \cos^2 \omega_c t + a_2 U_{MG}^2 \cos^2 \omega_r t + \\ &\quad + a_2 2 U_{MC} U_{MG} \cos \omega_c t \cos \omega_r t \end{aligned} \quad (2.1)$$

Последнее слагаемое в (2.1) является полезным продуктом преобразования напряжений сигнала и гетеродина

$$\begin{aligned} i_{\text{пол}}(t) &= a_2 2 U_{MC} U_{MG} \cos \omega_c t \cos \omega_r t \\ &= a_2 U_{MC} U_{MG} \cos(\omega_c - \omega_r) t + \\ &\quad + a_2 U_{MC} U_{MG} \cos(\omega_c + \omega_r) t \end{aligned} \quad (2.2)$$

Первое слагаемое - перенос частоты сигнала «вниз», а второе - «вверх». Выделяя узкополосным фильтром первое слагаемое, получим ток на промежуточной частоте

$$i_{\text{пр}}(t) = a_2 U_{MC} U_{MG} \cos(\omega_c - \omega_r) t \quad (2.3)$$

Если входное напряжение амплитудно-модулировано

$$u_c(t) = U_{MC}(1 + M \cos 2\pi F t) \cos \omega_c t \quad (2.4)$$

то, подставляя меняющуюся амплитуду из (2.4) в (2.3), получим выражение для тока полезной составляющей на частоте $\omega_c - \omega_r$

$$\begin{aligned} i_{\text{пр}}(t) &= a_2 U_{MC} U_{MG} (1 + M \cos 2\pi F t) \cos(\omega_c - \omega_r) t = \\ &= a_2 U_{MC} U_{MG} (1 + M \cos 2\pi F t \cos \omega_{\text{пр}} t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Используя (2.1) и формулы преобразования тригонометрических функций, приведенные в приложении к работе, можно получить приближенную картину спектра тока на выходе НЭ.

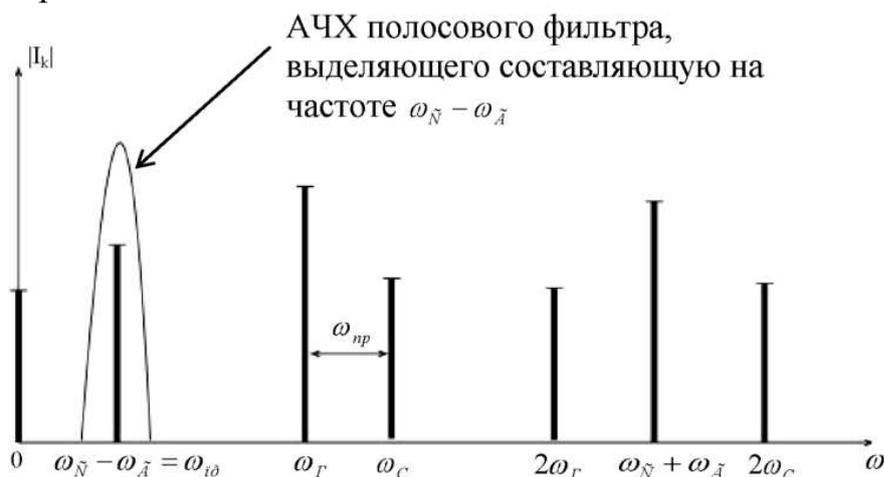


Рис. 2.2. Спектр тока на выходе НЭ преобразователя частоты

Наибольшее значение составляющей тока на промежуточной частоте получается тогда, когда побочные составляющие минимальны.

Для реализации преобразователя частоты в качестве нелинейного элемента целесообразно использовать полевой транзистор, у которого стокзатворная характеристика по форме близка к параболе.

В качестве нагрузки нелинейного элемента (транзистора) используется параллельный колебательный контур (рис. 2.3), для параллельного колебательного контура входное сопротивление

$$\dot{Z}(\omega) = \frac{1}{\dot{G}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{рез}}} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})} \quad (2.6)$$

В области малых расстройек, учитывая, что резонансное сопротивление параллельного контура $R_{\text{рез}} = \rho Q$, (где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – характеристическое сопротивление, $Q = \frac{\rho}{R}$ – добротного контура), получаем при резонансной промежуточной частоте $\omega_{\text{пр}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$$\dot{Z}(\omega) = \frac{R_{\text{рез}}}{1 + j\theta_k(\omega - \omega_{\text{пр}})}, \quad (2.7)$$

где $\theta_k = 2Q/\omega_{\text{пр}}$ – постоянная контура.

Амплитуда напряжения на контуре

$$U_{\text{МК}}(t) = a_2 U_{\text{МС}} U_{\text{МГ}} R_{\text{рез}} [(1 + M_{\text{ВЫХ}} \cos(\Omega t - \arctg \Omega \theta_k))], \quad (2.8)$$

где коэффициент $M_{\text{ВЫХ}}$ по напряжению на контуре

$$M_{\text{ВЫХ}} = \frac{M}{\sqrt{1 + \theta_k^2 \Omega^2}} < M \quad (2.9)$$

Это значит, что глубина модуляции сигнала на выходе меньше, чем на входе, и огибающая на выходе отстает по фазе от огибающей на входе на угол $\varphi = \arctg 2\pi F \theta_k$.

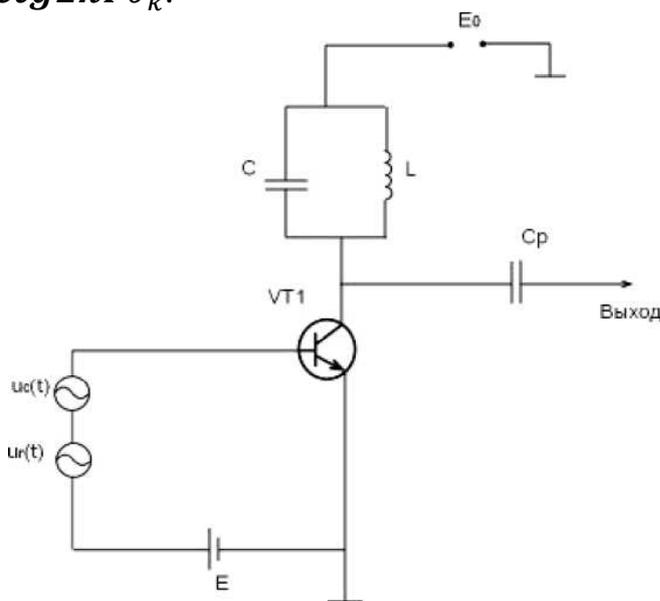


Рис. 2.3. Однотактная схема преобразования частоты

3. Проведение лабораторного исследования.

В соответствии с разработанной программой студентам предлагается исследовать однотактную схему преобразования частоты. В программе должно быть предусмотрено изменение параметров, выбор модуляции несущей, вывод графиков и расчетных значений на монитор, а также удаление графиков и масштабирование по осям. Студент обязан сделать работу согласно своему варианту, выданному преподавателем. Выполняя работу, следует зарисовать исследуемую схему и графики сигналов, выводимых на экран.

Таблица 2.1

Преобразование частоты сигналов

Параметры	Варианты						
	1	2	3	4	5	6	7
Длительность процесса, с	0.4	0.35	0.30	0.45	0.5	0.6	0.7
Амплитуда несущей, В	1	0.8	0.6	0.85	0.65	0.5	1.2
Частота несущей, Гц	1000	1025	1050	1100	975	950	925
Частота гетеродина, Гц	900	925	950	1000	875	850	825
Частота модулирующего сигнала, Гц	5	5.5	6	4.5	4	5	4
Амплитуда сигнала гетеродина, В	1	0.6	0.8	0.65	0.9	0.7	0.75
Коэффициент модуляции	0.5	0.55	0.6	0.7	0.65	0.5	0.55
Собственная частота контура, Гц	100	95	100	105	110	90	100
Коэффициент затухания контура	0.04	0.03	0.02	0.05	0.04	0.03	0.05
Крутизна характеристики, мА/В	0.1	0.15	0.2	0.2	0.2	0.15	0.1
Кривизна характеристики, мА/В ²	1	0.75	0.7	0.9	0.95	0.8	0.85

4. Отчёт должен содержать.

- 4.1. Краткие теоретические сведения.
- 4.2. Иллюстрационные материалы.
- 4.3. Выводы по работе.

5. Контрольные вопросы.

- 5.1. В чем заключается суть преобразования частоты сигналов?
- 5.2. Какие колебания принято называть комбинационными?
- 5.3. Каковы причины возможного появления искажений колебаний на выходе преобразователя частоты?
- 5.4. Изобразите одноктактную схему преобразования частоты и поясните ее работу.
- 5.5. Можно ли построить преобразователь частоты, если ВАХ транзистора аппроксимирована $i = a_0 u + a_3 u^3$?
- 5.6. Что является устройством настройки в супергетеродинном приёмнике?
- 5.7. Возможна ли точная настройка гетеродина на частоту сигнала при преобразовании частоты?
- 5.8. Зачем используется метод многократного преобразования частоты?

Литература [4,5].

Приложение:

Вспомогательные соотношения:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\alpha$$

$$\cos^3 \alpha = \frac{1}{4} (3 \cos \alpha + \cos 3\alpha)$$

$$\sin^3 \alpha = \frac{1}{4} (3 \sin \alpha - \sin 3\alpha)$$

$$\cos^4 \alpha = \frac{3}{8} + \frac{1}{2} \cos 2\alpha + \frac{1}{8} \cos 4\alpha$$

$$\sin^4 \alpha = \frac{3}{8} - \frac{1}{2} \cos 2\alpha + \frac{1}{8} \cos 4\alpha$$

$$\cos \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

Лабораторная работа №3 (4 часа)

Исследование амплитудного модулятора

Цель работы: исследование амплитудного модулятора в различных режимах работы.

1. Домашнее задание.

1.1. Изучите содержание работы и краткие теоретические сведения.

1.2. Составьте алгоритм расчёта необходимых характеристик и соответствующее ПМО.

1.3. Ознакомьтесь с индивидуальным заданием на выполнение лабораторной работы.

2. Основные теоретические сведения.

Амплитудным модулятором принято называть устройство, которое при подаче на его входы гармонического несущего колебания $u_H(t) = U_0 \cos \omega_0 t$ и низкочастотного модулирующего сигнала $U_{\text{мод}}(t) = U_m \cos \Omega t$ создаёт на выходе АМ-сигнал.

Амплитудные модуляторы реализуются с помощью преобразования спектра двух сигналов с помощью нелинейного безынерционного элемента. Схема простейшего амплитудного модулятора показана на рис. 3.1.

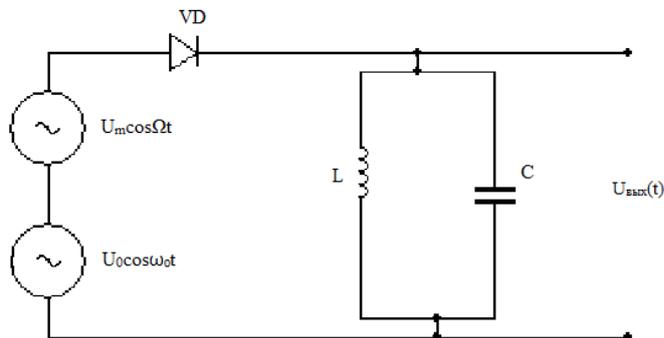


Рис. 3.1. Схема простейшего амплитудного модулятора

В нём в качестве нелинейного элемента применяется диод, вольт-амперная характеристика которого аппроксимируется полиномом второй степени: $i = a_0 + a_2 u^2$.

В схеме действует сумма двух напряжений

$$u = U_0 \cos \omega_0 t + U_m \cos \Omega t \quad (3.1)$$

С учётом вышеотмеченного получим

$$i = a_0 + a_1(U_0 \cos \omega_0 t + U_m \cos \Omega t) + a_2(U_0^2 \cos^2 \omega_0 t + 2U_0 U_m \cos \Omega t \cos \omega_0 t + U_m^2 \cos^2 \Omega t) \quad (3.2)$$

Используя элементарные тригонометрические преобразования заметим, что в спектре выходного тока содержатся первые и вторые гармоники частот ω_0 и Ω , а также их комбинационные частоты $\omega_0 \pm \Omega$. Для получения АМ-сигнала

необходимо выделить колебания с частотами $\omega_0, (\omega_0 + \Omega), (\omega_0 - \Omega)$, что реализуется с помощью колебательного контура, настроенного на частоту ω_0 . В этом случае на выходе схемы формируется искомый сигнал вида

$$u_{AM}(t) = iR_{\text{ЭКВ}} = a_1 R_{\text{ЭКВ}} U_0 \left(1 + \frac{2a_2 U_m}{a_1} \cos \Omega t\right) \cos \omega_0 t \quad (3.3)$$

или

$$u_{AM}(t) = U_m (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t, \quad (3.4)$$

где $u_{AM} = a_1 R_{\text{ЭКВ}} U_0$; $m = \frac{2a_2 U_m}{a_1}$; $R_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное сопротивление контура.

Отметим, что на практике в качестве НЭ часто используются транзисторы.

3. Описание лабораторной установки.



Рис. 3.2. Структурная схема исследования амплитудного модулятора

Источники сигналов несущей и частоты модулирования – создают гармонические сигналы вида:

$$U_{\text{Н}}(t) = U_0 \cos \omega_0 t,$$

$$U_{\text{мод}}(t) = U_m \cos \Omega t.$$

Амплитудный модулятор – на основе биполярного транзистора типа 2N2222A, включенного по схеме с ОЭ:

$$U_{AM} = U_0 (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t =$$

$$= U_0 [\cos \omega_0 t + 0.5m \cos(\omega_0 + \Omega) t + 0.5m \cos(\omega_0 - \Omega) t].$$

Полная ширина спектра сигнала = 2Ω .

$$\text{Коэффициент модуляции, \%} = 100M = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}} 100\%.$$

Осциллограф – применяется виртуальный двухлучевой осциллограф. Рекомендуется установить параметры развертки и делителей напряжения так, чтобы на его экране регистрировалось более 2 периодов сигнала без ограничения по амплитуде.

Анализатор спектра – применяется виртуальный анализатор спектра.

4. Методические указания по порядку проведения лабораторной работы.

4.1. В программе Multisim создать модель для исследования амплитудного модулятора в соответствии с принципиальной электрической схемой, приведенной на рис. 3.2.

4.2. Установить параметры источников сигналов $V1$, $V2$ и значений $L1$, $C2$, $R5$ в соответствии с вариантом задания, указанным преподавателем и табл. 3.1.

Таблица 3.1

Варианты заданий

Номер варианта	Амплитуда источника $V1$, В	Частота источника $V1$, кГц	Амплитуда источника $V2$, В	Частота источника $V2$, кГц	$L1$, мкГн	$C2$, нФ	$R5$, Ом
1	0,5	155	0,1	3	300	3,6	12
2	0,5	200	0,1	5	620	1,0	51
3	0,5	450	0,1	7	62	2,0	3
4	0,5	610	0,1	3	30	2,2	1
5	0,5	255	0,1	7	300	1,3	27
6	0,5	185	0,1	4	620	1,2	47
7	0,5	515	0,1	8	62	1,5	2
8	0,5	405	0,1	6	150	1,0	6,2
9	0,5	180	0,1	2,5	150	5,1	1,5
10	0,5	295	0,1	2	62	47	1

4.3. Представить собранную модель лаборанту или преподавателю для проверки

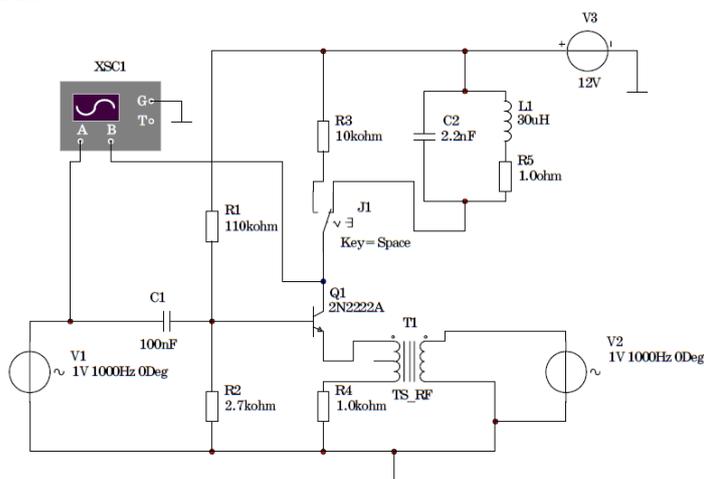


Рис. 3.2. принципиальная электрическая схема исследования амплитудного модулятора

4.4. Нажатием правой кнопки мыши на черном поле модели вызвать соответствующую вкладку и установить цвет всех компонентов модели - красный. Копировать принципиальную электрическую схему модели в соответствующий раздел отчета.

Определение влияния амплитуды источника V2 на коэффициент модуляции

4.5. Включить модель и наблюдать АМ-сигнал на входе осциллографа В (в режиме АС), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.6. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.7. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.8. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.9. Повторить измерения по пп. 4.5-4.8, увеличивая амплитуду источника V2 для следующих значений: V2 = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 и 5 В.

Определение влияния амплитуды источника V1 на форму ЛМ-сигнала

4.10. Установить амплитуду источника гармонического сигнала V2= 0,5 В.

4.11. Установить амплитуду источника гармонического сигнала V1 =1 В.

4.12. Включить модель и наблюдать АМ-сигнал на входе осциллографа В (в режиме АС), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.13. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.14. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.15. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.16. Повторить измерения по пп. 4.12-4.15, увеличивая амплитуду источника V1 для следующих значений: V1=1,5;2;2,5В.

Определение спектрального состава выходного сигнала при нелинейном режиме работы усилителя

4.17. Установить амплитуду источника гармонического сигнала V1 = 0,5 В.

4.18. Подключить резистор R3 в коллекторную цепь транзистора нажатием клавиши Space.

4.19. Включить модель и наблюдать АМ-сигнал на входе осциллографа В (в режиме АС), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.20. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.21. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.22. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

- 4.23. Подключить к коллектору транзистора анализатор спектра.
- 4.24. Включить модель и определить спектр выходного сигнала.
- 4.25. Выключить модель.
- 4.26. Включить транспонирование данных в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.
- 4.27. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

Определение спектрального состава выходного сигнала модулятора

- 4.28. Подключить контур LC2 в коллекторную цепь транзистора нажатием клавиши Space.
- 4.29. Включить модель и определить спектр выходного сигнала.
- 4.30. Выключить модель.
- 4.31. Включить транспонирование данных в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.
- 4.32. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

5. Отчёт должен содержать:

- 5.1. Краткие теоретические сведения.
- 5.2. Иллюстрационные материалы:
 - Принципиальную электрическую схему исследования АМ;
 - Графики осциллограмм и спектров сигналов;
 - Расчёты коэффициентов модуляции по полученным данным и график зависимости $m = f(V_2)$.
- 5.3. Выводы по работе.

6. Контрольные вопросы.

- 6.1. Дайте определение модуляции как одного из радиотехнических процессов.
- 6.2. Принцип работы амплитудного модулятора.
- 6.3. Объясните необходимость работы в режиме с отсечкой.
- 6.4. Как выбирается добротность контура модулятора?
- 6.5. Как регулируется глубина модуляции выходного сигнала?
- 6.6. Как повысить эффективность выходного сигнала с АМ.
- 6.7. Принцип действия балансного модулятора.
- 6.8. Принцип действия частотного модулятора.
- 6.9. Объясните принцип действия частотного модулятора на основе балансного модулятора.
- 6.10. Как соотносятся ширина спектра АМ-сигнала и ширина спектра модулирующего сигнала?

6.11. Приведите спектры АМ-сигнала при модуляции сообщением сложной формы.

6.12. приведите спектр АМ-сигнала с подавленной несущей, с одной боковой полосой.

Литература [1,3,5].

Справочные данные о транзисторе типа 2N2222:

$$U_{кэ.мах} = 30В; I_{к.мах} = 600 мА; I_{к} = 150 мА; h_{21э} = 150; C_{кб} = 5 пФ; f_{ср} = 300 МГц.$$

Лабораторная работа №4 (4 часа)

Исследование амплитудного, частотного и фазового детекторов

Цель работы: исследование работы амплитудного детектора в различных режимах, частотного детектора на LC-контуре и фазового детектора.

1. Домашнее задание.

1.1. Изучите содержание работы и основные теоретические сведения.

1.2. Изучите методические указания по выполнению лабораторной работы.

1.3. Ознакомьтесь с индивидуальным заданием на выполнение лабораторной работы.

2. Основные теоретические сведения.

Детектирование – процесс выделения НЧ переданного сообщения из принятого ВЧ модулированного сигнала. Это операция обратная модуляции.

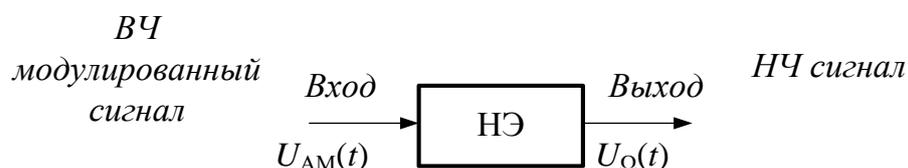


Рисунок 4.1. Сущность детектирования

Временная характеристика:

$$U_{AM}(t) = U_{вх}(t) = U_0[1 + m \cos \Omega t] \cos \omega_0 t. \quad (4.1)$$

Спектр АМ колебания:

$$\{(\omega_0 - \Omega), \omega_0, (\omega_0 + \Omega)\}. \quad (4.2)$$

На рис. 4.2 представлены временные и спектральные характеристики токов детектора в различных точках схемы.

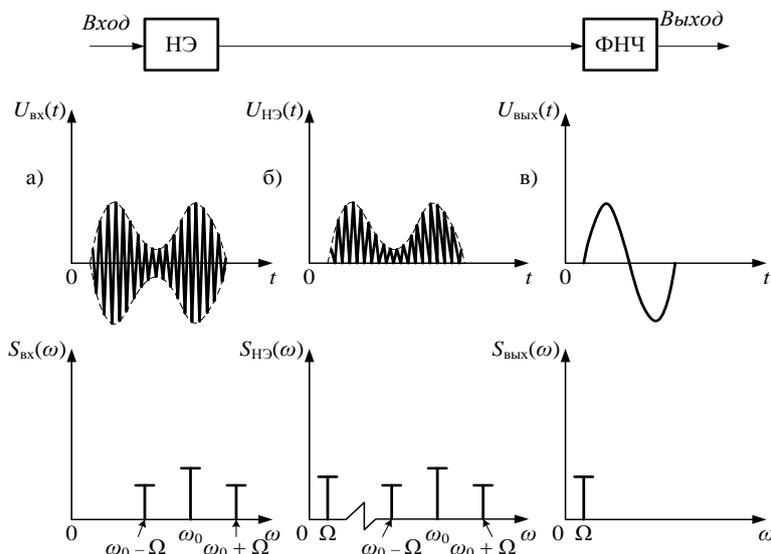


Рисунок 4.2. Временные и спектральные характеристики токов детектора:

а) на входе детектора;

б) протекающих через нелинейный элемент;

в) на выходе детектора

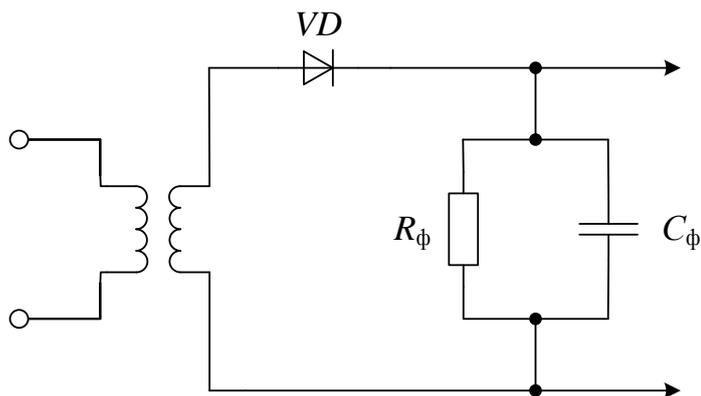


Рисунок 4.3. Простейшая схема детектора

$R_\phi C_\phi \rightarrow \text{ФНЧ}$ – для выделения $S_{i_{нэ}}(\Omega)$ полезной НЧ составляющей и подавления ВЧ составляющих. Следовательно, должны выполняться соотношения:

$$X_{C_\phi}(\Omega) \gg R_\phi \gg X_{C_\phi}(\omega_0), \quad \frac{1}{\Omega C_\phi} \gg R_\phi \gg \frac{1}{\omega_0 C_\phi}, \quad T_\Omega \gg R_\phi C_\phi \gg T_0.$$

Работа детектора определяется характеристикой детектирования.

Характеристика детектирования (ХД) – это зависимость постоянной составляющей тока НЭ от модулируемого параметра входного сигнала.

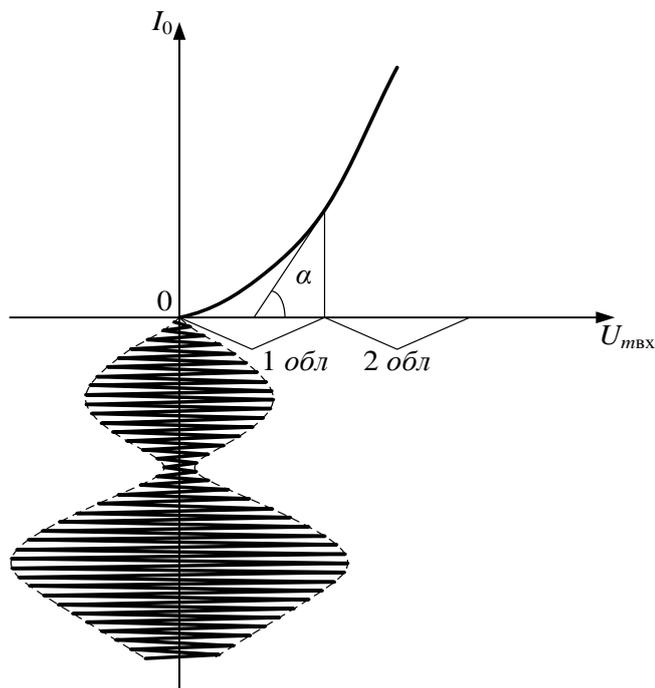


Рисунок 4.4. Характеристика детектирования

Т.е. ХД:

- для АМ: $I_0 = f(U_{m_{вх}}) \sim U_\Omega$;
- для ЧМ: $I_0 = f(\omega_{вх}) \sim \omega$;
- для ФМ: $I_0 = f(\varphi_{вх}) \sim \varphi$.

Различаются 2 режима детектирования в зависимости от того, на какую часть (область) приходится огибающая:

- 1) квадратичное детектирование ($U_m(t) \approx 0,1 \div 0,2$ В);
- 2) линейное детектирование (при больших $U_m(t) = 0,5 \div 1$ В).

Квадратичный детектор

Аппроксимируем ВАХ диода квадратичным полиномом:

$$i_d = a_0 + a_1 U + a_2 U^2. \quad (4.3)$$

Т.к. операция детектирования нелинейная, то a_0 и $a_1 U$ можно не учитывать, тогда

$$i = a_2 U^2. \quad (4.4)$$

Поддаем на детектор модулированный сигнал:

$$U_{AM}(t) = U_{вх}(t) = U_0 [1 + m \cos \Omega t] \cos \omega_0 t,$$

$$U_{AM}(t) = U_0 \underbrace{\cos \omega_0 t}_a + \underbrace{\frac{mU_0}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t}_b + \underbrace{\frac{mU_0}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t}_c. \quad (4.5)$$

Подставим (4.5) в (4.4) и получим i_d :

$$i_d = a_2 (a + b + c)^2 = a_2 a^2 + a_2 b^2 + a_2 c^2 + a_2 2ab + a_2 2ac + a_2 2bc.$$

Составляющих $a_2 a^2$, $a_2 b^2$, $a_2 c^2$ не будет, поскольку это высокие частоты, и мы их отфильтровываем ФНЧ.

В результате подстановки и преобразования получим НЧ составляющие:

$$\Omega \rightarrow J_\Omega = a_2 m U_0^2, \quad 2\Omega \rightarrow J_{2\Omega} = a_2 \frac{m^2 U_0^2}{4}.$$

В квадратичном детекторе кроме полезного продукта Ω есть вредная составляющая 2Ω . Это приводит к искажению сигнала на выходе детектора по отношению к модулирующему. Количественной мерой искажений является коэффициент нелинейных искажений:

$$k_{н.и.} = \frac{J_{2\Omega}}{J_\Omega} = \frac{m}{4}.$$

При $m = 100\%$ $k_{н.и.} = 25\%$ – это очень большие нелинейные искажения. В реальной аппаратуре они составляют доли процента.

Из-за высоких искажений квадратичный детектор для детектирования АМ сигналов не применяется; его применяют в следующих случаях:

- 1) при детектировании АМ с $m \ll 1$;
- 2) для детектирования сигналов дискретной АМ;

Детектирование сигналов угловой модуляции

Существует два метода детектирования:

- 1) прямое; 2) косвенное

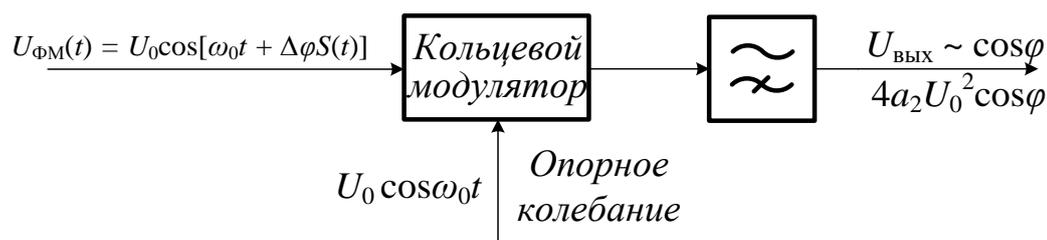
Детектирование ФМ – прямое

Рисунок 4.5. Структурная схема прямого детектирования ФМ ϕ – сдвиг фаз.

Детектирование ЧМ сигнала

$$U_{\text{ЧМ}} = U_0 \cos \left[\omega_0 t + \Delta\omega \int S(t) dt \right]. \quad (4.6)$$

Поскольку модулирующий сигнал стоит под знаком интеграла, то прямого метода детектирования ЧМ сигнала нет.

Существует два варианта детектирования ЧМ:

- 1) ЧМ \rightarrow ФМ – детектирование ФМ (фазовый детектор);
- 2) ЧМ \rightarrow АМ – детектирование АМ (амплитудный детектор) – используется чаще.

Для преобразования ЧМ в АМ используется устройство, у которого $U_{\text{ВЫХ}} = f(\omega_{\text{ВХ}})$.

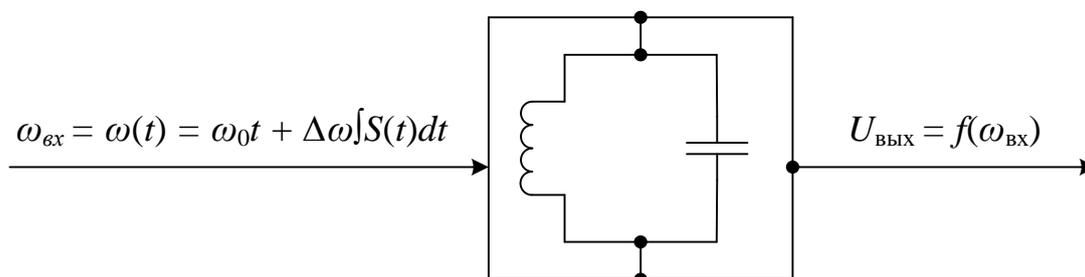


Рисунок 4.6. Сущность преобразования ЧМ в АМ

Существует 3 варианта реализации детектирования в этом случае:

- 1) на одном расстроенном контуре;
- 2) на двух расстроенных контурах;
- 3) на одном настроенном контуре.

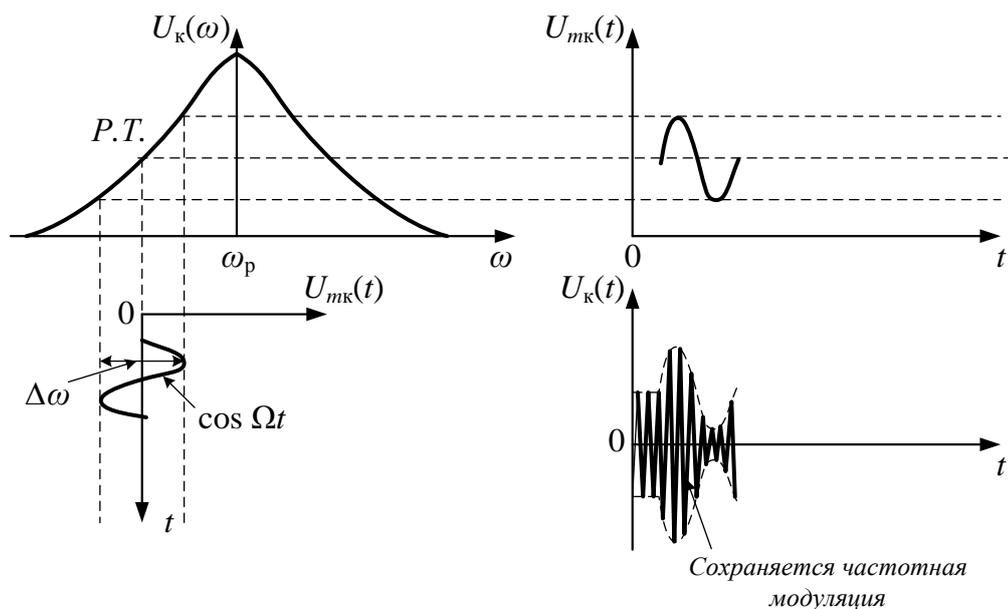


Рисунок 4.7. Сущность детектирования ЧМ на одном расстроенном контуре

Характеристики детектора:

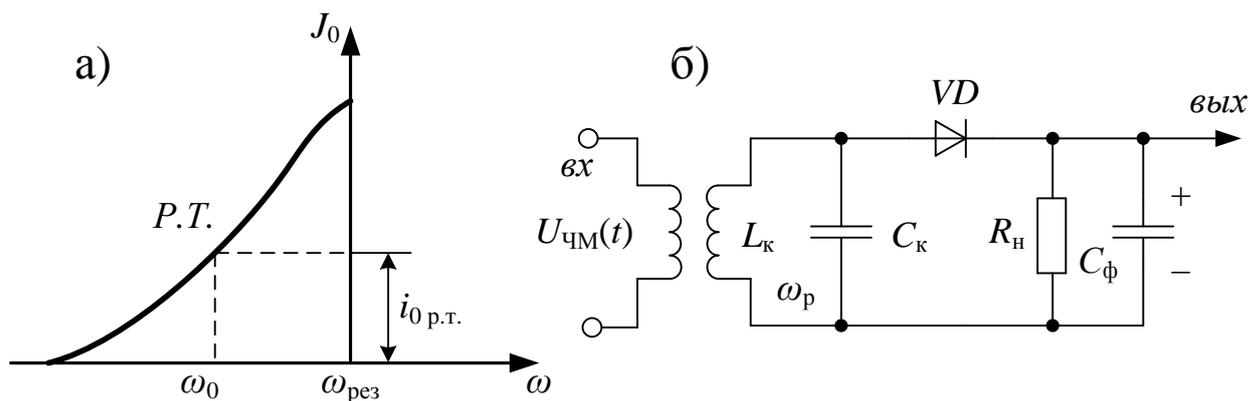


Рисунок 4.8. а) характеристика детектирования ЧМ;

б) принципиальная схема детектора на одном расстроенном контуре

J_0 – постоянная составляющая тока в нагрузке.

Недостатки схемы:

1. При отсутствии модуляции большая постоянная составляющая тока в РТ.
2. Маленький линейный участок – это ограничивает девиацию частоты $\Delta\omega$.
Чем выше $\Delta\omega$, тем лучше устраняется ВЧ составляющая.

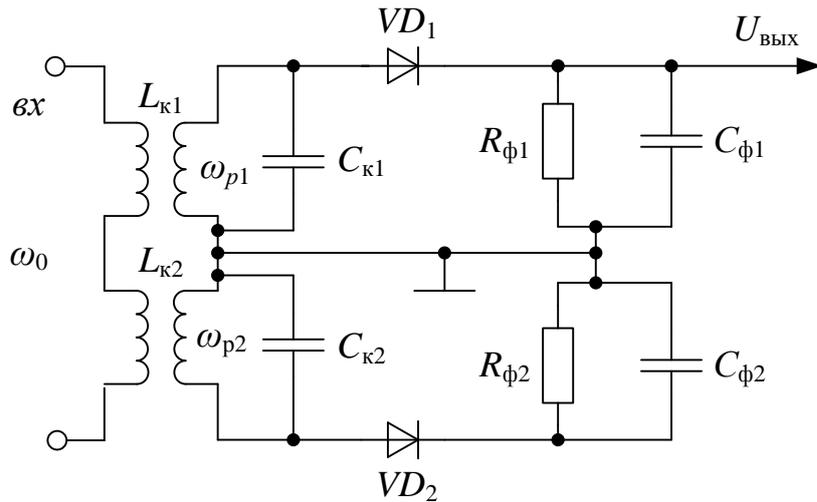


Рисунок 4.9. Принципиальная схема ЧМ детектора на двух взаимно-расстроенных контурах

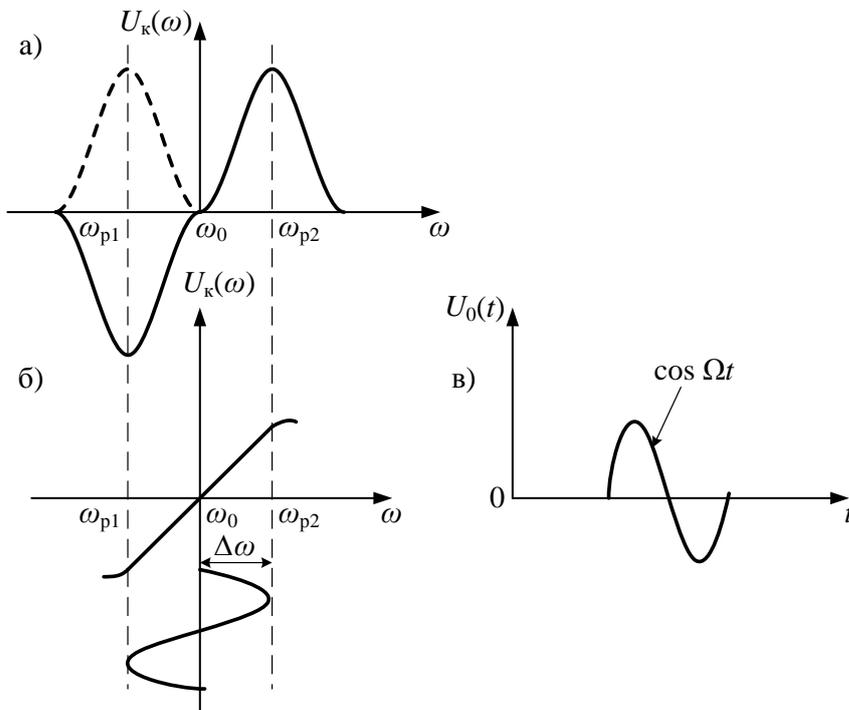


Рисунок 4.10. а) АЧХ расстроенных контуров;
 б) характеристика детектирования частотного детектора;
 в) напряжение на выходе детектора

Достоинства схемы на двух расстроенных контурах:

1. $U_0(\omega_0) = 0$.
2. Девиация в схеме с двумя расстроенными контурами в два раза больше, чем при одном ($\Delta\omega_{2к} > \Delta\omega_{1к}$).

3. Большой линейный участок – можно увеличить $\Delta\omega$.

При $\Delta\omega > \Delta\omega_{\text{допустимой}}$ возникают нелинейные искажения (рис. 4.11).

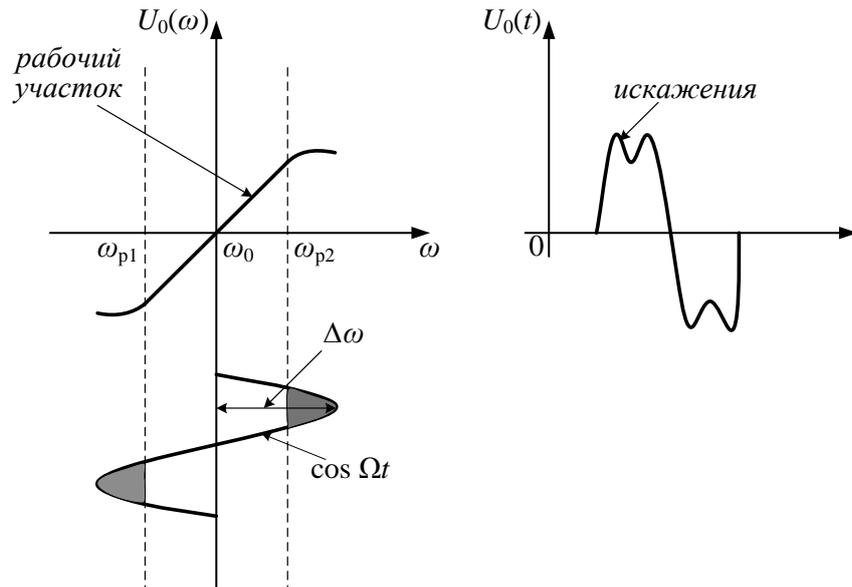


Рисунок 4.11. Превышение $\Delta\omega$ линейного участка характеристики детектирования

Фазовый (синхронный) детектор (ФД)

Синхронный детектор (фазовый детектор) позволяет осуществить высококачественное детектирование сигналов АМ, ЧМ и ФМ; он обеспечивает наилучшее выделение сигнала на фоне помех. Структурная схема ФД показана на рис. 4.12.

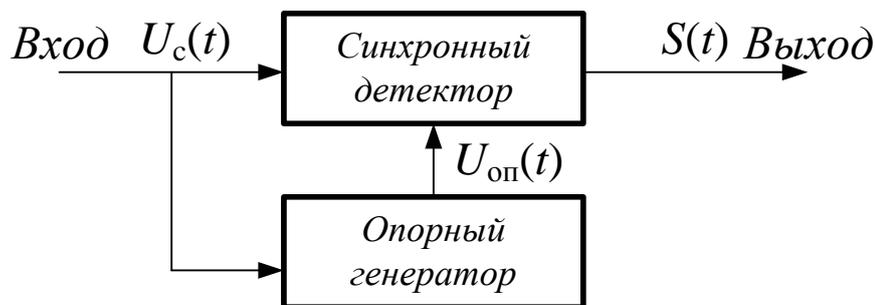


Рисунок 4.12. Структурная схема ФД

Сигнал (АМ, ЧМ, ФМ):

$$U_c(t) = U_m(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_{\text{ЧМ}}(t) + \varphi_{\text{ФМ}}(t) + \varphi_0). \quad (4.7)$$

У синхронного детектора два входа. На первый вход подается модулированный сигнал, на второй вход опорное напряжение. Частота опорного напряжения равна центральной частоте сигнала ω_0 – (синхронность), а фаза равна начальной фазе сигнала φ_0 – (синфазность).

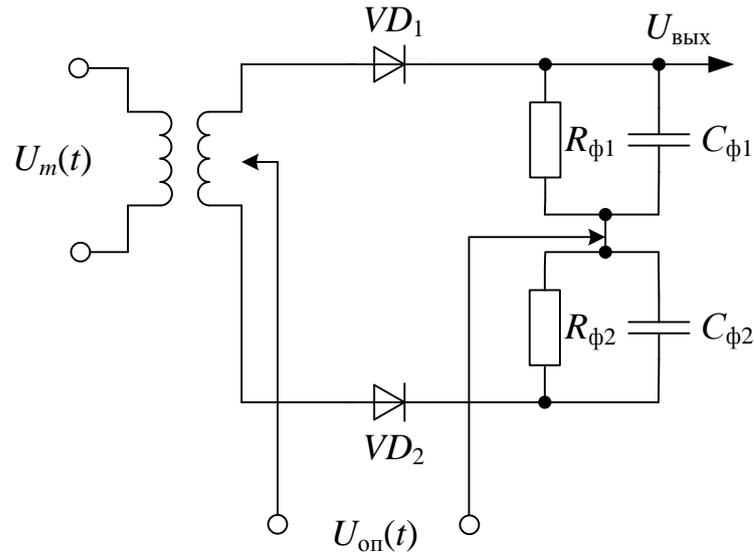


Рисунок 4.13. Принципиальная схема фазового детектора

Простейшая схема (принципиальная) ФД изображена на рис. 4.13.

Напряжение на выходе синхронного детектора (СД) равно интегралу от произведения сигнала на опорное напряжение.

$$U_c(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (4.8)$$

$$U_{оп}(t) = U_{оп} \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (4.9)$$

Пусть на входе АМ сигнал $[U_c(t) = U_{АМ}(t)]$, тогда

$$\begin{aligned} U_{ВЫХ}(t) &= \frac{1}{T} \int_0^T U_c(t) U_{оп}(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) U_{оп} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) dt = \\ &= \frac{U_{оп} U_m}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega_0 t + 2\varphi_0) \right] dt = \frac{U_{оп} U_m}{2}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Т.к. $U_{оп}$ практически постоянно на интервале T , то мы получим модулирующий сигнал без искажений.

3. Описание лабораторных установок.

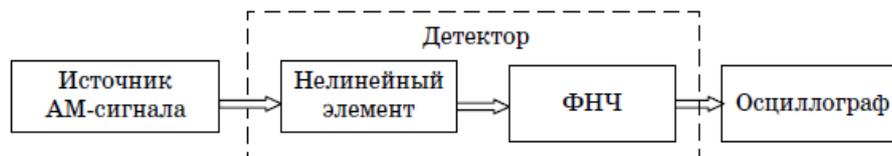


Рис. 4.14. Структурная схема исследования амплитудного детектора

Источник АМ-сигнала – создаёт АМ-сигнал в вида:

$$U_{AM} = U_0[1 + M \cos(\Omega t + \varphi)] \cos \omega_0 t.$$

Полная ширина спектра сигнала = 2Ω .

$$\text{Коэффициент модуляции, \%} = 100M = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}} 100\%.$$

Нелинейный элемент - полупроводниковый диод типа 1N4148.

ФНЧ - фильтр нижних частот 1-го порядка на *RC*-цепи.

Частота среза ФНЧ по уровню -3 дБ:

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Осциллограф - применяется виртуальный двухлучевой осциллограф. В данной работе рекомендуется устанавливать параметры развертки и делителей напряжения так, чтобы на его экране регистрировалось от 1 до 2 периодов сигнала без ограничения по амплитуде.

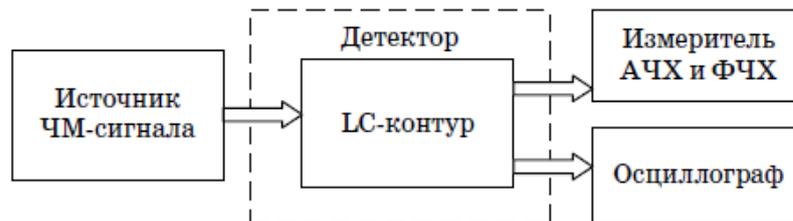


Рис. 4.15. Структурная схема исследования частотного детектора

Источник ЧМ-сигнала – создаёт ЧМ-сигнал вида:

$$U_{ЧМ} = U_0 \sin[\omega t + \left(\frac{\Delta\omega}{\Omega}\right) \sin \Omega t],$$

где U_0 – амплитуда несущей; $\Delta\omega$ – диапазон частотного отклонения (девиации) несущей.

$$\text{Индекс модуляции } M = \frac{\Delta\omega}{\Omega}.$$

Детектор – на основе *LC*-контура.

Добротность контура на резонансной частоте

$$Q = \frac{\omega_{рез}L}{R},$$

где R - импеданс контура.

Полоса пропускания по уровню -3 дБ (0,707): $\Delta f_{-3дБ} = \omega_{рез}/Q$.

Измеритель АЧХ и ФЧХ (Bode Plotter) - применяется виртуальный измеритель АЧХ и ФЧХ.

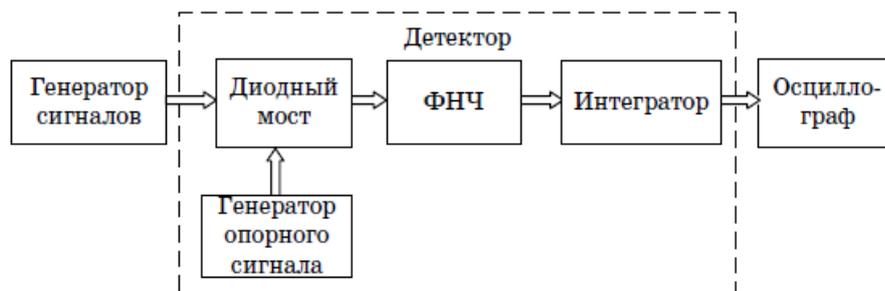


Рис. 4.16. Структурная схема исследования фазового детектора

Генератор сигналов - создает сигнал синусоидальной формы с заданным сдвигом по фазе.

Генератор опорного сигнала - создает опорные сигналы синусоидальной или прямоугольной формы.

Диодный мост - на основе диодов типа 1N4148, соединенных по балансной схеме.

ФНЧ - фильтр нижних частот 1-го порядка на RC-цепи.

Частота среза ФНЧ по уровню -3 дБ:

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Интегратор - применяется виртуальный интегратор.

4. Методические указания по выполнению лабораторной работы.

4.1. Перед выполнением работы подготовить проект отчёта о лабораторной работе.

4.1.1. АД:

4.1.2. В программе Multisim создать модель для исследования амплитудного детектора в соответствии с принципиальной электрической схемой, приведенной на рис. 4.17.

4.1.3. Установить параметры источника АМ-сигнала VC, FC, M, FM в соответствии с вариантом задания, указанным преподавателем и табл. 4.1.

Таблица 4.1

Варианты заданий

Номер варианта	Амплитуда (VC), В	Несущая частота (FC), МГц	Коэффициент модуляции (M)	Частота модуляции (FM), кГц
1	6	1	0,7	10
2	8	1	0,9	8
3	7	1	0,6	9
4	11	1	0,4	12
5	9	1	0,5	11
6	10	1	0,8	8
7	12	1	0,7	10
8	15	1	0,5	9
9	14	1	0,6	11
10	16	1	0,8	12

4.1.4. Представить собранную модель лаборанту или преподавателю для проверки.

4.1.5. Нажатием правой кнопки мыши на черном поле модели вызвать соответствующую вкладку и установить цвет всех компонентов модели - красный. Копировать принципиальную электрическую схему модели в соответствующий раздел отчета.

Изучение входного АМ-сигнала

4.1.6. Включить модель и наблюдать АМ-сигнал на входе осциллографа А (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

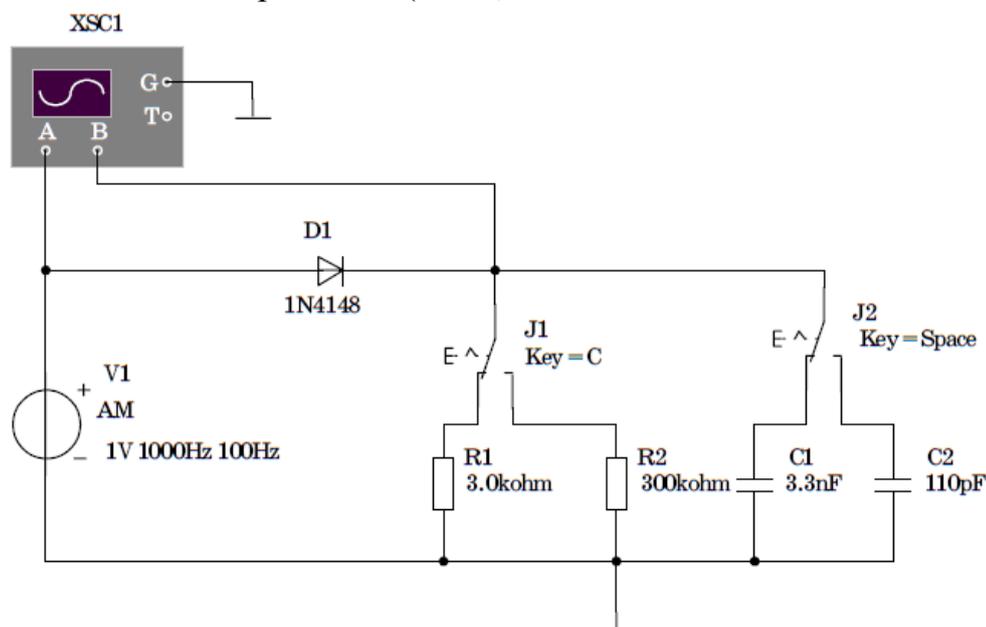


Рис. 4.17. Принципиальная электрическая схема исследования амплитудного детектора

4.1.7. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.1.8. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

Расположить окно графика в нижнем левом углу монитора таким образом, чтобы изображение схемы модели было доступно.

4.1.9. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

Изучение детектированного сигнала

4.1.10. Включить модель и наблюдать детектированный сигнал на входе В осциллографа (в режиме DC).

4.1.11. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.1.12. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

***Изучение процесса детектирования АМ-сигнала
при изменении частоты среза ФНЧ***

4.1.13. Подключить конденсатор С2 нажатием клавиши Space.

4.1.14. Включить модель и наблюдать детектированный сигнал на входе В осциллографа (в режиме DC).

4.1.15. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.1.16. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.1.17. Подключить конденсатор С1 нажатием клавиши Space.

4.1.18. Подключить резистор R2 нажатием клавиши С.

4.1.19. Включить модель и наблюдать детектированный сигнал на входе В осциллографа (в режиме DC).

4.1.20. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.1.21. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

***Изучение процесса детектирования АМ-сигнала
при перемодуляции***

4.1.22. Подключить резистор R1 нажатием клавиши С.

4.1.23. Установить величину коэффициента модуляции $M = 1,2$.

4.1.24. Включить модель и наблюдать детектированный сигнал на входе В осциллографа (в режиме DC).

4.1.25. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.1.26. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.1.27. Представить результаты измерений преподавателю для проверки.

4.1.28. Закрыть окно программы Multisim без сохранения изменений в файле Circuit 1.

4.2.1. ЧД:

4.2.2. В программе Multisim создать модель для исследования частотного детектора в соответствии с принципиальной электрической схемой, приведенной на рис. 4.18.

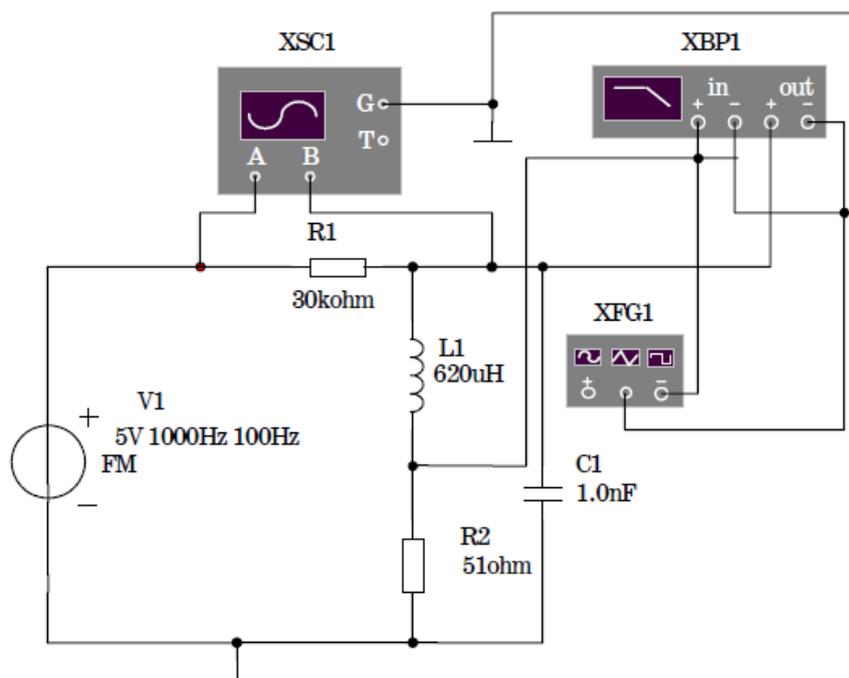


Рис. 4.18. Принципиальная электрическая схема исследования частотного детектора

4.2.3. Установить параметры источника ЧМ-сигнала V1 в соответствии с вариантом задания, указанным преподавателем и табл. 4.2.

4.2.4. Установить L2, C1, R2 в соответствии с вариантом задания, указанным преподавателем и табл. 4.3.

4.2.5. Представить собранную модель лаборанту или преподавателю для проверки.

Таблица 4.2

Варианты заданий параметров источника ЧМ-сигнала V1

Номер варианта	Амплитуда (Voltage Amplitude), В	Несущая частота (Carrier Frequency) F_c , кГц	Индекс модуляции (Modulation Index)	Частота модуляции (Signal Frequency), кГц
1	6	200	4	10
2	8	250	5	10
3	7	400	5	10
4	11	540	6	10
5	9	300	5	10
6	10	240	8	10
7	12	480	6	10
8	15	450	6	10
9	14	140	7	10
10	16	250	5	10

Варианты заданий $L1, C1, R2$

Номер варианта	$L1$, мкГн	$C1$, нФ	$R2$, Ом
1	300	3,6	12
2	620	1,0	51
3	62	2,0	3
4	30	2,2	1
5	300	1,3	27
6	620	1,2	47
7	62	1,5	2
8	150	1,0	6,2
9	150	5,1	1,5
10	62	47	1

4.2.6. Нажатием правой кнопки мыши на черном поле модели вызвать соответствующую вкладку и установить цвет всех компонентов модели - красный. Копировать принципиальную электрическую схему модели в соответствующий раздел отчета.

Определение АЧХ контура $L1C1$

4.2.7. Щелкнуть левой кнопкой мыши по изображению измерителя АЧХ и ФЧХ (ХВР1) и на появившемся интерфейсе прибора установить по горизонтальной оси развертки линейный режим и необходимый частотный диапазон:

Horizontal

Lin

$$F = F_c + 100 \text{ кГц}$$

$$1 = F_c - 100 \text{ кГц}$$

где F_c - значение несущей частоты заданного варианта из табл. 4.2.

4.2.8. Включить модель и наблюдать АЧХ контура, установив необходимые значения F и I на вертикальной оси развертки измерителя АЧХ и ФЧХ.

4.2.9. Выключить модель.

4.2.10. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

Расположить окно графика в нижнем левом углу монитора таким образом, чтобы изображение схемы модели было доступно.

4.2.11. Копировать график АЧХ в соответствующий раздел отчета.

4.2.12. Удалить генератор XFG1 из модели (выделив его щелчком левой кнопки мыши, нажать кнопку Delete на клавиатуре.)

Определение девиации несущей частоты ЧМ-сигнала

4.2.13. Включить модель и наблюдать ЧМ-сигнал на входе А осциллографа (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.2.14. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.2.15. Измерить минимальный и максимальный периоды сигнала с помощью визиров осциллографа. Записать полученные значения в соответствующую таблицу отчета.

4.2.16. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.2.17. Копировать график осциллограммы в соответствующий раздел отчета.

Изучение процесса детектирования ЧМ-сигнала

4.2.18. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и В осциллографа (в режиме DC).

4.2.19. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.2.20. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.2.21. Копировать график осциллограмм в соответствующий раздел отчета.

Определение коэффициента передачи ЧМ-детектора

4.2.22. Включить модель и наблюдать АМ-сигнал на входе В осциллографа (в режиме DC).

4.2.23. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.2.24. Измерить минимальную и максимальную амплитуды сигнала с помощью визиров осциллографа. Записать полученные значения в соответствующую таблицу отчета.

4.2.25. Представить результаты измерений преподавателю для проверки.

4.2.26. Закрыть окно программы Multisim без сохранения изменений в файле Strcult 1.

4.3.1. ФД:

4.3.2. В программе Multisim создать модель для исследования частотного детектора в соответствии с принципиальной электрической схемой, приведенной на рис. 4.19.

4.3.3. Установить параметры генераторов сигналов V1 и V2 в соответствии с вариантом задания, указанным преподавателем и табл. 4.4.

Таблица 4.4

Варианты заданий параметров генераторов сигналов V1 и V2

Номер варианта	Амплитуда V1 (Voltage Amplitude), В	Частота V1 (Frequency), кГц	Амплитуда V2 (Voltage Amplitude), В	Частота V2 (Frequency), кГц
1	0,5	100	0,5	10
2	0,6	100	0,6	10
3	0,7	100	0,7	10
4	0,8	100	0,8	10
5	0,9	100	0,9	10
6	1	100	1	10
7	1,1	100	1,1	10
8	1,2	100	1,2	10
9	1,3	100	1,3	10
10	1,4	100	1,4	10

4.3.4. Установить коэффициент передачи Gain (K) интегратора A1 равным 100 V/V.

4.3.5. Представить собранную модель лаборанту или преподавателю для проверки.

4.3.6. Нажатием правой кнопки мыши на черном поле модели вызвать соответствующую вкладку и установить цвет всех компонентов модели - красный. Копировать принципиальную электрическую схему модели в соответствующий раздел отчета.

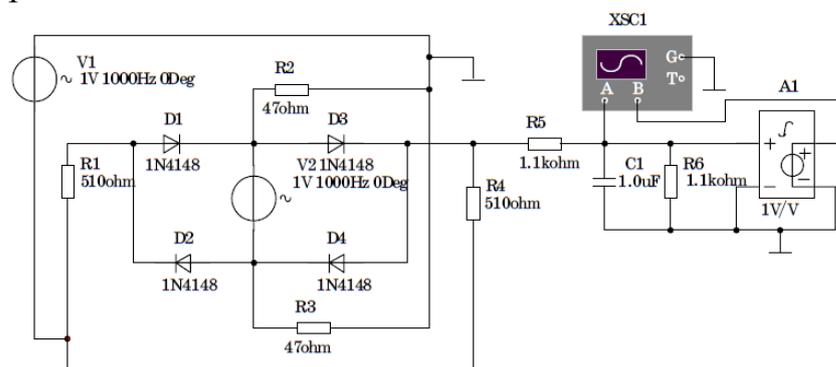


Рис. 4.19. Принципиальная электрическая схема исследования фазового детектора

Определение характеристики ФД при опорном сигнале синусоидальной формы

4.3.7. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и В осциллографа (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.3.8. Выключить модель после окончания переходного процесса на конденсаторе С1 (для разности фаз источников V1 и V2, равной 0, на выходе интегратора сигнал должен отсутствовать).

4.3.9. Измерить значение напряжения на выходе интегратора с помощью визира осциллографа. Занести его в соответствующую таблицу отчета.

4.3.10. Повторить измерения по пп. 4.4.7-4.4.9 для следующих значений сдвига по фазе (Phase) источника V1: 5; 10; 15; 20; 30; 45; 60; 90°.

4.3.11. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

Расположить окно графика в нижнем левом углу монитора таким образом, чтобы изображение схемы модели было доступно.

4.3.12. Копировать графики осциллограмм для сдвига по фазе 90° в соответствующий раздел отчета.

Определение характеристики ФД при опорном сигнале прямоугольной формы (меандр)

4.4.13. Заменить источник сигнала синусоидальной формы V2 на источник прямоугольных импульсов типа меандр (Clock Source), соблюдая остановленную ранее полярность напряжения.

4.3.14. Установить частоту (Frequency) источника импульсов равной 10 кГц, а амплитуду (Amplitude) 0,6 В.

4.3.15. Установить сдвиг по фазе источника V1 равным 0.

4.3.16. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и В осциллографа (в режиме DC).

4.3.17. Выключить модель после окончания переходного процесса на конденсаторе С1 (для разности фаз источников V1 и V2, равной 0, на выходе интегратора сигнал должен отсутствовать).

4.3.18. Зафиксировать значение напряжения на выходе интегратора в соответствующую таблицу отчета.

4.3.19. Повторить измерения по пп. 4.4.16-4.4.18 для следующих значений сдвига по фазе (Phase) источника V1: 5; 10; 15; 20; 30; 45; 60; 90°.

4.3.20. Закрыть окно программы Multisim без сохранения изменений в файле Circuit 1.

Примечание.

Справочные данные о диоде сигнальном типа 1N4148:

$$U_{\text{обр.макс}} = 75 \text{ В}; I_{\text{обр}} = 5 \text{ мкА}; U_{\text{пр}} = 0,6 \text{ В}; I_{\text{пр}} = 10 \text{ мА}; t_{\text{восст.Робр}} = 4 \text{ нс}; C = 1,3 \text{ пФ}$$

Отчёт должен содержать:

5.1. Краткие теоретические сведения.

5.2. Иллюстрационные материалы.

5.2.1. АД:

- принципиальную электрическую схему исследования АД;
- графики осциллограмм;
- расчёты частот среза ФНЧ для всех применяемых сочетаний RC

5.2.2. ЧД:

- принципиальную электрическую схему исследования ЧД;
- графики АЧХ и осциллограмм;
- расчёты девиации несущей частоты, коэффициента передачи детектора и крутизны рабочей части АЧХ резонансного контура.

5.2.3. ФД:

- принципиальную электрическую схему исследования ФД;
- графики осциллограмм для $\Delta\varphi = 90^\circ$;
- графики и характеристики ФД для двух видов опорного сигнала в диапазоне сдвига по фазе $-90\dots+90$ (отрицательная ветвь характеристики повторяет положительную со знаком минус);
- расчёт частоты среза ФНЧ.

5.3. Выводы по работе.

5. Контрольные вопросы.

6.1. Объясните различия в форме сигналов, полученных по пп. 4.1.10 и 4.1.14.

6.2. Объясните форму сигнала, полученного по п. 4.1.19.

6.3. Объясните причину искажений сигнала при коэффициенте модуляции $M = 1,2$ (п. 4.1.24).

6.4. Определение процесса детектирования.

6.5. Особенности детектирования АМ-сигналов с одной боковой полосой (ОБП) частот.

6.6. Особенности детектирования АМ-сигналов с подавленной несущей.

6.7. Определение коэффициента детектирования.

6.8. Особенности взаимодействия сигнала и помехи в АМ-детекторе.

6.9. Особенности прохождения случайных сигналов через АМ-детектор.

6.10. Покажите, что в квадратичном детекторе кроме полезного сигнала с частотой Ω на выходе присутствует вредная составляющая с частотой 2Ω .

6.11. Приведите осциллограммы для сигналов на входе и выходе детектора, формы протекающего тока:

а) для детектора класса «В»;

б) для детектора класса «С».

6.12. В каких устройствах используются частотные детекторы (ЧД)?

- 6.13. Какой основной алгоритм преобразования сигналов используется при построении частотных детекторов?
- 6.14. Определение частотной модуляции.
- 6.15. Определение индекса модуляции и девиации частоты.
- 6.16. Как определить практическую ширину спектра ЧМ-сигнала?
- 6.17. Нарисуйте схему детектора с расстроенными контурами и объясните принцип ее работы.
- 6.18. Напишите аналитическое выражение характеристики детектирования ЧД с расстроенными контурами, нарисуйте и объясните ее форму.
- 6.19. Проведите сравнительный анализ частотных детекторов различных типов.
- 6.20. Поясните сущность метода детектирования ЧМ сигналов:
- вариант ЧМ→ФМ;
 - вариант ЧМ→АМ.
- 6.21. Раскройте особенности ЧМ детектора на двух взаимно-расстроенных контурах, приведите принципиальную схему.
- 6.22. Постройте АЧХ расстроенных контуров, характеристику детектирования ЧД и напряжения на его выходе.
- 6.23. В каких устройствах используются фазовые детекторы фазового детектора?
- 6.24. Определение частотной модуляции.
- 6.25. Как определить практическую ширину спектра ФМ-сигнала?
- 6.26. Нарисуйте схему ФД. Какой вид имеет его характеристика детектирования?
- 6.27. Каким образом можно с помощью частотного модулятора получить ФМ-сигнал?
- 6.28. Чему равно напряжение на выходе синхронного детектора?

Литература [1,3,5].

Лабораторная работа №5 (4 часа)

Исследование сигналов и их спектров

Цель работы: исследование непрерывных и T-финитных сигналов и их спектров.

1. Домашнее задание

- 1.1. Изучите содержание работы и краткие теоретические сведения.
- 1.2. Ознакомьтесь с методическими указаниями по выполнению работы
- 1.3. Ознакомьтесь с индивидуальным заданием на выполнение лабораторной работы.

2. Основные теоретические сведения.

Если какой-либо сигнал представлен в виде суммы гармонических колебаний принято считать, что реализовано спектральное разложение этого сигнала в базисе гармонических функций. При этом сумма гармонических составляющих сигнала образуют его спектр.

Сигнал $S(t)$ и его спектральная плотность $S(\omega)$ взаимно-однозначно связаны прямым и обратным преобразованием Фурье:

$$\begin{cases} S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \exp(-j\omega t) dt \\ S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \end{cases} \quad (5.1)$$

По-существу, спектральная плотность сигнала позволяет определить вклад всех компонент, содержащихся внутри интервала, частот $\Delta\omega$.

Для периодической функции вида:

$$S(t) = S(t \pm nT),$$

где $T = \frac{2\pi}{\omega}$ – период колебаний; n – любое положительное целое число;

ω

– круговая частота, используется ряд Фурье, составленный из ортогональных тригонометрических функций:

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t), \quad (5.2)$$

$$\text{где } a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) dt; \quad (5.3)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \cos k\omega t dt; \quad (5.4)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \sin k\omega t dt; \quad (5.5)$$

Для одиночного импульса ($T \rightarrow \infty$):

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (5.6)$$

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Комплексное выражение для спектральной плотности:

$$\begin{aligned} S(\omega) &= A(\omega) - jB(\omega) \\ &= |S(\omega)| e^{jj(\omega)}, \end{aligned} \quad (5.7)$$

где

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \int_0^{\infty} S(t) \cos \omega t dt; B(\omega) \\ &= \int_0^{\infty} S(t) \sin \omega t dt \end{aligned} \quad (5.8)$$

Амплитуда и фаза спектральной плотности:

$$|S(\omega)| = \sqrt{A(\omega)^2 + B(\omega)^2}, \quad (5.9)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \left(\frac{B(\omega)}{A(\omega)} \right). \quad (5.10)$$

Описание лабораторной установки.

1. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ

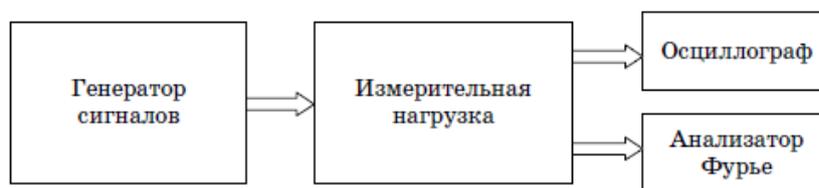


Рис. 5.1. Структурная схема исследования сигналов и их спектров

Генератор сигналов – создает гармонический сигнал, а также сигналы треугольной и прямоугольной формы.

Измерительная нагрузка – резистор или полупроводниковый диод с резистором.

Осциллограф – применяется виртуальный двухлучевой осциллограф. В данной работе рекомендуется устанавливать параметры развертки и делителей напряжения так, чтобы на его экране регистрировалось от 1 до 2 периодов сигнала без ограничения по амплитуде.

Анализатор Фурье – применяется виртуальный анализатор Фурье программы *Multisim*.

3. Методические указания по порядку проведения работы.

4.1. В программе *Multisim* создать модель для исследования сигналов и их спектров в соответствии с принципиальной электрической схемой, приведённой на рис 5.2.

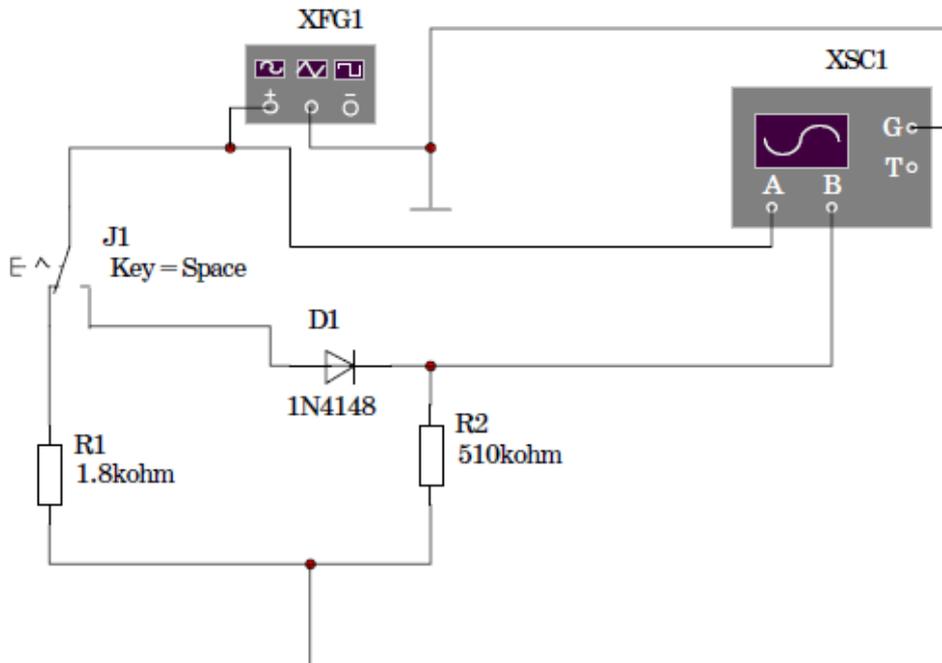


Рис. 5.2. Принципиальная электрическая схема исследования сигналов и их спектров

4.2. Щелкнуть левой кнопкой мыши на табло Options и на появившейся вкладке щелкнуть левой кнопкой мыши на табло Preferences.

4.3. На вкладке Preferences установить флажок в строке Show nodenames и нажать кнопку ОК.

4.4. Щелкнуть левой кнопкой мыши на табло Simulate и на появившейся вкладке выбрать путь Analyses - Fourier analyses. После щелчка на последнем табло должна появиться папка установок Фурье-анализа.

4.5. Установить на вкладке Analysis Parameters частоту (Frequency resolution) и число гармоник (Number of harmonics) в соответствии с вариантом задания, указанным преподавателем и табл. 1.

4.6. Установить на вкладке Analysis Parameters время анализа (Stopping time for sampling), равное 0,1 с.

4.7. В строке Display установить режим Graph.

4.8. Открыть вкладку Output variables и в появившемся левом окне выделить номер исследуемого узла схемы, к которому подключен + генератора XFG1. Перенести указанный номер в правое окно нажатием кн. Plot during simulation.

4.9. Нажать кнопку Accept.

Номер варианта	Частота (Frequency), Гц	Амплитуда (Amplitude), В	Число гармоник (Number of harmonics)
1	100	6	9
2	250	8	5
3	125	7	7
4	150	11	9
5	80	9	5
6	110	10	7
7	280	12	9
8	420	15	5
9	500	14	7
10	350	16	9

4.10. Установить частоту и амплитуду генератора сигналов XFG1 в соответствии с табл. 5.1.

4.11. Представить собранную модель лаборанту или преподавателю для проверки.

4.12. Нажатием правой кнопки мыши на черном поле модели вызвать соответствующую вкладку и установить цвет всех компонентов модели - красный. Копировать принципиальную электрическую схему модели в соответствующий раздел отчета.

Изучение гармонического сигнала и его спектра

4.13. Включить модель и наблюдать гармонический сигнал на входе осциллографа А (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.14. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.15. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue. Расположить окно графика в нижнем левом углу монитора таким образом, чтобы изображение схемы модели было доступно.

4.16. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.17. Щелкнуть левой кнопкой мыши на табло Simulate и на появившейся вкладке выбрать путь Analyses - Fourier analyses. Послещелчка на последнем табло должна появиться папка установок Фурье-анализа.

4.18. Нажать кнопку Simulate. В течение 1 минуты на мониторе должны появиться результаты моделирования в виде графиков. Если этого не произошло, обратиться к лаборанту или преподавателю.

4.19. Копировать график амплитудного спектра в соответствующий раздел отчета.

4.20. Закрыть окно Analysis Graphs.

Изучение сигнала колоколообразной формы и его спектра

4.21. Подключить к выходу генератора диод нажатием клавиши Space на клавиатуре компьютера.

4.22. Включить модель и наблюдать сигнал колоколообразной формы на входе осциллографа В (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.23. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.24. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.25. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.26. Щелкнуть левой кнопкой мыши на табло Simulate и на появившейся вкладке выбрать путь Analyses - Fourier analyses. После щелчка на последнем табло должна появиться папка установок Фурье-анализа.

4.27. Открыть вкладку Output variables и в появившемся правом окне выделить номер исследуемого ранее узла схемы. Перенести указанный номер в левое окно нажатием кнопки Remove.

4.28. В левом окне выделить номер исследуемого узла схемы, к которому подключен анод диода D1. Перенести указанный номер в правое окно нажатием кнопки Plot during simulation.

4.29. Нажать кнопку Simulate. В течение 1 минуты на мониторе должны появиться результаты моделирования в виде графиков.

4.30. Копировать график амплитудного спектра в соответствующий раздел отчета.

Изучение сигнала треугольной формы и его спектра

4.31. Переключить генератор в режим сигнала треугольной формы.

4.32. Установить коэффициент заполнения генератора сигнала треугольной формы в соответствии с вариантом задания, указанным преподавателем и табл. 5.2.

Варианты заданий коэффициента заполнения сигналов

Номер варианта	Коэффициент заполнения (Duty Cycle), %
1	50
2	30
3	25
4	35
5	65
6	70
7	45
8	20
9	40
10	60

4.33. Щелкнуть левой кнопкой мыши на черном поле модели, свободном от каких-либо компонентов.

4.34. Включить модель и наблюдать сигнал треугольной формы на входе осциллографа В (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.35. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.36. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.37. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.38. Щелкнуть левой кнопкой мыши на табло Simulate и на появившейся вкладке выбрать путь Analyses - Fourier analyses. После щелчка на последнем табло должна появиться папка установок Фурье-анализа.

4.39. Нажать кнопку Simulate. В течение 1 минуты на мониторе должны появиться результаты моделирования в виде графиков.

4.40. Копировать график амплитудного спектра в соответствующий раздел отчета.

Изучение сигнала прямоугольной формы и его спектра

4.41. Переключить генератор в режим сигнала прямоугольной формы.

4.42. Щелкнуть левой кнопкой мыши на черном поле модели, свободном от каких-либо компонентов.

4.43. Включить модель и наблюдать сигнал прямоугольной формы на входе осциллографа В (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.44. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.45. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.46. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.47. Щелкнуть левой кнопкой мыши на табло Simulate и на появившейся вкладке выбрать путь Analyses - Fourier analyses. После щелчка на последнем табло должна появиться папка установок Фурье-анализа.

4.48. Нажать кнопку Simulate. В течение 1 минуты на мониторе должны появиться результаты моделирования в виде графиков.

4.49. Копировать график амплитудного спектра в соответствующий раздел отчета.

4.50. Представить результаты измерений преподавателю для проверки.

4.51. Закрыть окно программы Multisim без сохранения изменений в файле Circuit 1.

4. Отчёт должен содержать.

5.1. Краткие теоретические сведения.

5.2. Иллюстрационные материалы:

- Принципиальную электрическую схему исследования спектров сигналов;
- График спектров исследуемых сигналов;
- Расчёты и графики спектров единичных импульсов прямоугольной, колоколообразной и треугольной формы, применяя программу MathCad.

5.3. Выводы по работе.

5. Контрольные вопросы.

6.1. Дайте определение понятия периодического сигнала. Приведите примеры физических процессов, для которых модель периодического сигнала является точным способом описания.

6.2. Как возникает понятие “отрицательной” частоты?

6.3. Какими свойствами обладает спектральная плотность вещественного сигнала?

6.4. Как изменится спектр периодического сигнала, если период следования стремится к бесконечности?

6.5. Как найти распределение мощности и энергии в спектре периодического сигнала?

6.6. Как влияет изменение длительности импульса и периода повторения на спектр периодической последовательности импульсов?

6.7. Каковы особенности спектра 5-импульса?

6.8. Какова связь между длительностью импульса и шириной его спектра?

6.9. Как определить число гармонических составляющих в спектре импульсного сигнала?

6.10. Как найти распределение мощности и энергии в спектре непериодического сигнала?

6.11. Какая доля общей энергии прямоугольного импульса содержится в пределах основного лепестка спектральной диаграммы?

6.12. Раскройте понятие комплексной частоты.

6.13. Как определить спектральную плотность комплексного экспоненциального сигнала?

6.14. Как определить спектральную плотность радиосигнала?

6.15. В каких случаях применимо преобразование Лапласа по отношению к описанию спектров сигналов?

Литература [1,6].

Справочные данные о диоде сигнальном типа 1N4148:

$$U_{\text{обр.макс}} = 75 \text{ В}; I_{\text{обр}} = 5 \text{ мкА}; U_{\text{пр}} = 0,6 \text{ В}; I_{\text{пр}} = 10 \text{ мА}; t_{\text{восст.Робр}} = 4 \text{ нс}; C = 1,3 \text{ пФ}$$

Лабораторная работа №6 (4 часа)

Исследование процессов дискретизации и квантования сигналов.

Цель работы: изучение процесса дискретизации и квантования сигналов.

1. Домашнее задание.

- 1.1. Изучите содержание и краткие теоретические сведения.
- 1.2. Ознакомьтесь с методическими указаниями по выполнению работы.
- 1.3. Ознакомьтесь с индивидуальным заданием на выполнение работы.

2. Основные теоретические сведения.

Напомним формулировки основных теорем Котельникова.

Теорема 1. Любую функцию $S(t)$, состоящую из частот от 0 до F_B периодов в секунду, можно представить в виде

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} S(k\Delta t) \frac{\sin 2\pi F_B(t - k\Delta t)}{2\pi F_B(t - k\Delta t)}, \quad (6.1)$$

где k – целые числа; $S(k\Delta t)$ – постоянные, зависящие от $S(t)$;

F_B – верхняя частота спектра.

И наоборот, любая функция $S(t)$, представленная этим рядом (6.1), частот лишь из частот от 0 до F_B периодов в секунду. Если обратиться к обобщённому ряду Фурье [7], то очевидно, что в соотношении (6.1) базисным являются отсчётные функции

$$\Psi_k(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} S(k\Delta t) \frac{\sin 2\pi F_B(t - k\Delta t)}{2\pi F_B(t - k\Delta t)},$$

приведённые на рис. 6.1, а коэффициенты разложения по данному базису $c_k = S(k\Delta t)$

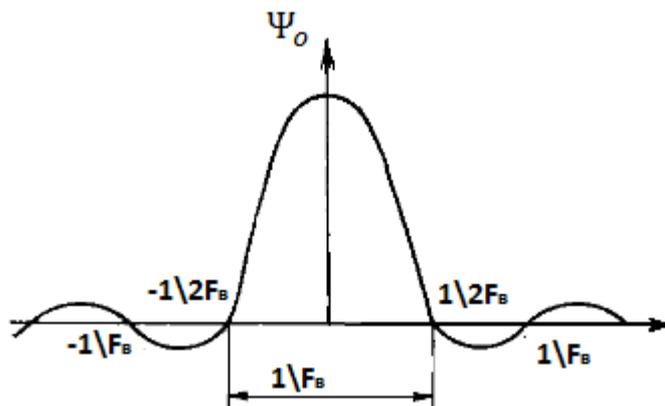


Рис. 6.1. График функции отсчётов.

Теорема 2. (Теорема отсчётов). Любую функцию (сигнал) $S(t)$, состоящую из частот от 0 до F_B периодов в секунду, можно непрерывно передавать с любой точностью с помощью чисел, следующих друг за другом через интервалы времени $\Delta t = 1/(2F_B)$ секунд.

Интервалы времени, через которые берутся отсчёты, именуется интервалами Найквиста.

Напомним основные свойства функции отсчётов.

1) В момент времени $t=0$ функция отсчётов имеет максимальное значение, равное единице. Это можно легко показать. Пусть $k=0$, тогда $\Psi_0(t) = \frac{\sin 2\pi F_B t}{2\pi F_B t}$. Раскроем неопределённость по правилу Лопиталья, обозначив $2\pi F_B t = x$,

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(\sin x)'}{x'} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos x}{1} = 1$$

2) В моменты времени

$t = \pm k\Delta t = \frac{k}{2F_B}$, где $k = 1, 2, \dots$, отсчётные функции обращаются в нуль

3) Ширина главного лепестка функции на нулевом уровне равна $1/F_B$.

4) Отсчётные функции являются ортогональными в бесконечно большом интервале времени, т.е.

$$(\Psi_i(t), \Psi_k(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_i(t)\Psi_k dt = \begin{cases} \frac{1}{2F_B}, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases} \quad (6.2)$$

Рассмотрим теперь процесс восстановления непрерывного сигнала $S(t)$ по его дискретным отсчётам. Из теоремы отсчётов следует, что для передачи по каналу связи сигнала $S(t)$ с ограниченным спектром необходимо выполнить следующие операции.

1) Взять отсчёты мгновенных значений сигнала $S(k\Delta t)$ через интервалы времени $\Delta t = \pm k\Delta t = \frac{k}{2F_B}$, где $k = 1, 2, \dots$, т.е. найти величины $S = \frac{1}{2F_B}, S = \frac{2}{2F_B}, S = \frac{3}{2F_B}, \dots$

2) Передать по каналу найденные отсчёты любым из возможных методов.

3) На приёмной стороне восстановить переданные отсчёты и сформировать короткие импульсы с длительностью $\tau_{\text{и}} \ll \Delta t = \frac{1}{2F_B}$ и амплитудами $S(k\Delta t)$.

4) Сформировать функции отсчётов $\Psi_k(t), k = 1, 2, \dots$, как показано на рис. 6.2

5) Произвести суммирование найденных функций и получить в результате сигнал $\tilde{S}(t)$, который будет пропорционален (или равен) переданному сигналу $S(t)$.

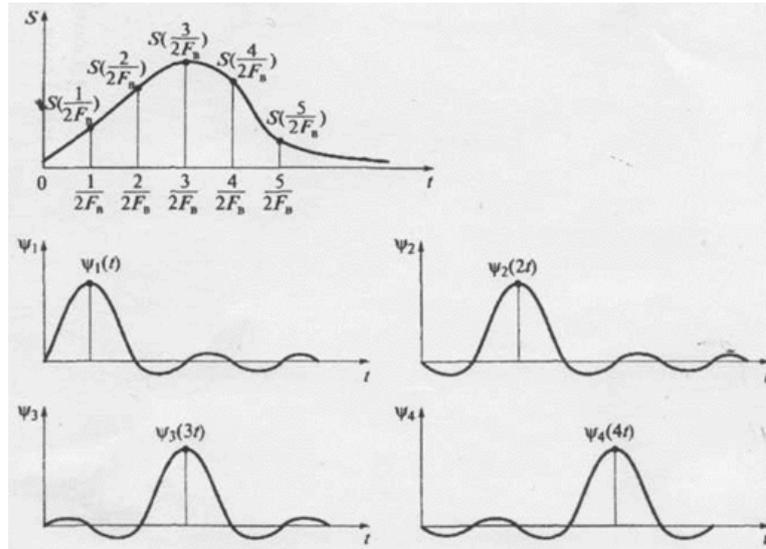


Рис. 6.2. Формирование отсчётов аналогового сигнала в дискретные моменты времени

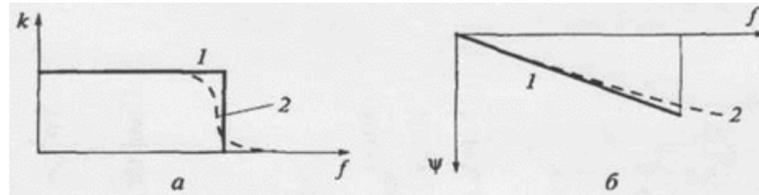


Рис. 6.3. Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики фильтров, формирующих функций отсчётов:
1-идеального; 2-реального

Для получения отсчетных функций обычно применяется фильтр нижних частот с шириной полосы пропускания, равной F_b , на вход которого следует подать короткий импульс с длительностью $\tau_{и}$ и амплитудой $S(k\Delta t)$. Если фильтр считать идеальным, а на его вход подавать дельта-импульс $\delta(t)$, то отсчетная функция на выходе не будет иметь искажений, так как АЧХ $k(f)$ фильтра равномерная, а ФЧХ $\varphi(f)$ — линейная (рис. 6.3.):

$$k(f) = \begin{cases} 1, & 0 \leq f \leq F_b \\ 0, & f > F_b \end{cases}$$

На самом деле при восстановлении сигнала возникают погрешности. Рассмотрим кратко причины их возникновения на практике.

1) Характеристики реальных фильтров $k(f)$ и $\varphi(f)$ отличаются от идеальных (см. кривые 2 на рис. 6.3), что приводит к отклонениям реальных отсчетных функций от идеальных, а следовательно, к появлению некоторых неточностей восстановления непрерывного сигнала $S(t)$.

2) Для восстановления сигнала по его отсчетным функциям необходимо просуммировать бесконечное множество членов ряда Котельникова (6.1).

Однако реальные сигналы $S(t)$ имеют ограниченные спектры и рассматриваются в конечном интервале времени T . В связи с этим точное разложение приходится заменять приближенным, т.е. при котором также суммируется конечное число членов ряда:

$$\tilde{S}(t) = \sum_{k=-n/2}^{n/2} S(k\Delta t) \frac{\sin 2\pi F_B(t - k\Delta t)}{2\pi F_B(t - k\Delta t)}$$

Число отсчётов, определяющее $\tilde{S}(t)$, при $\Delta t = 1/(2F_B)$ составляет $b = \frac{T}{\Delta t} + 1 = 2F_B T + 1$ (обычно $2F_B T \gg 1$), поэтому $n = 2F_B T$.

Параметр $n = 2F_B T$, иногда обозначаемый символом B и называется *базой сигнала*, играет важную роль в ТЭС при рассмотрении сложных сигналов.

Ясно, что погрешность при восстановлении сигнала будет тем больше, чем меньше число слагаемых учитывается при суммировании.

3) Спектры реальных сигналов не равны нулю за пределами граничной частоты. Основная доля энергии сигналов приходится на частоты от нуля до F_B , но небольшая доля этой энергии может быть и выше граничной частоты. Значение относительной среднеквадратичной погрешности можно определить следующим выражением:

$$\frac{\varepsilon^2(t)}{S^2(t)} = \frac{\int_{F_B}^{\infty} |S(jF)|^2 df}{\int_0^{\infty} |S(jF)|^2 df} = \frac{\Delta E}{E_s}$$

Где ΔE – часть энергии, которая выходит за пределы полосы частот $[0, F_B]$ и не учитывается при восстановлении сигнала; E_s – полная энергия сигнала.

При этом оказывается, что погрешность за счёт отбрасываемой части спектра сигнала становится тем больше, чем «медленнее» убывает спектр за пределами граничной частоты F_B .

В заключение отметим основные области применения теоремы отсчётов.

1) Упрощение представления сигналов или помех. Вместо непрерывных функций они задаются наборами отсчётных значений, и при этом не происходит потерь информации, содержащейся в непрерывном сигнале.

2) Передача непрерывных сообщений по каналам связи с помощью дискретных или цифровых сигналов.

3) Цифровая обработка непрерывных сигналов.

3. Описание лабораторной установки.



Рис. 6.4. Структурная схема исследования процесса дискретизации и квантования сигналов

Функциональный генератор - создает гармонический сигнал, а также сигналы треугольной и прямоугольной формы.

Генератор стохастического сигнала - создает стохастический сигнал. Основан на источнике полиномиального сигнала, в котором моделируется взаимодействие АМ, ЧМ и гармонического колебаний.

Генератор управляющего сигнала - создает последовательность прямоугольных импульсов с заданной скважностью.

Период следования данных импульсов является периодом дискретизации Δt , а их длительность $T_{и}$ определяет относительную погрешность преобразования δ .

Согласно теореме Котельникова значение периода дискретизации должно удовлетворять условию:

$$\Delta t \leq 1/2\pi f_{в}$$

где $f_{в}$ - верхняя частота преобразования сигнала.

Относительная погрешность преобразования определяется выражением:

$$\delta, \% = 200\pi f_{в} T_{и}$$

Электронный ключ - на полевом транзисторе типа BF245A.

Осциллограф - применяется виртуальный двухлучевой осциллограф. В данной работе рекомендуется устанавливать параметры развертки и делителей напряжения так, чтобы на его экране регистрировалось от 1 до 2 периодов сигнала без ограничения по амплитуде.

4. Методические указания по проведению лабораторной работы.

4.1. В программе Multisim создать модель для исследования процесса дискретизации и квантования сигналов в соответствии с принципиальной электрической схемой, приведенной на рис. 6.5.

4.2. Установить параметры генератора управляющего сигнала V4 в соответствии с вариантом задания, указанным преподавателем и табл. 6.1.

Таблица 6.1

Варианты заданий параметров генератора управляющего сигнала V4

Номер варианта	Частота (Frequency), Гц	Амплитуда (Amplitude), В	Коэффициент заполнения (Duty Cycle), %
1	1000	5	20
2	1100	5	25
3	1300	5	15
4	900	5	30
5	1050	5	10
6	950	5	10
7	1150	5	20
8	1200	5	25
9	1250	5	30
10	1350	5	15

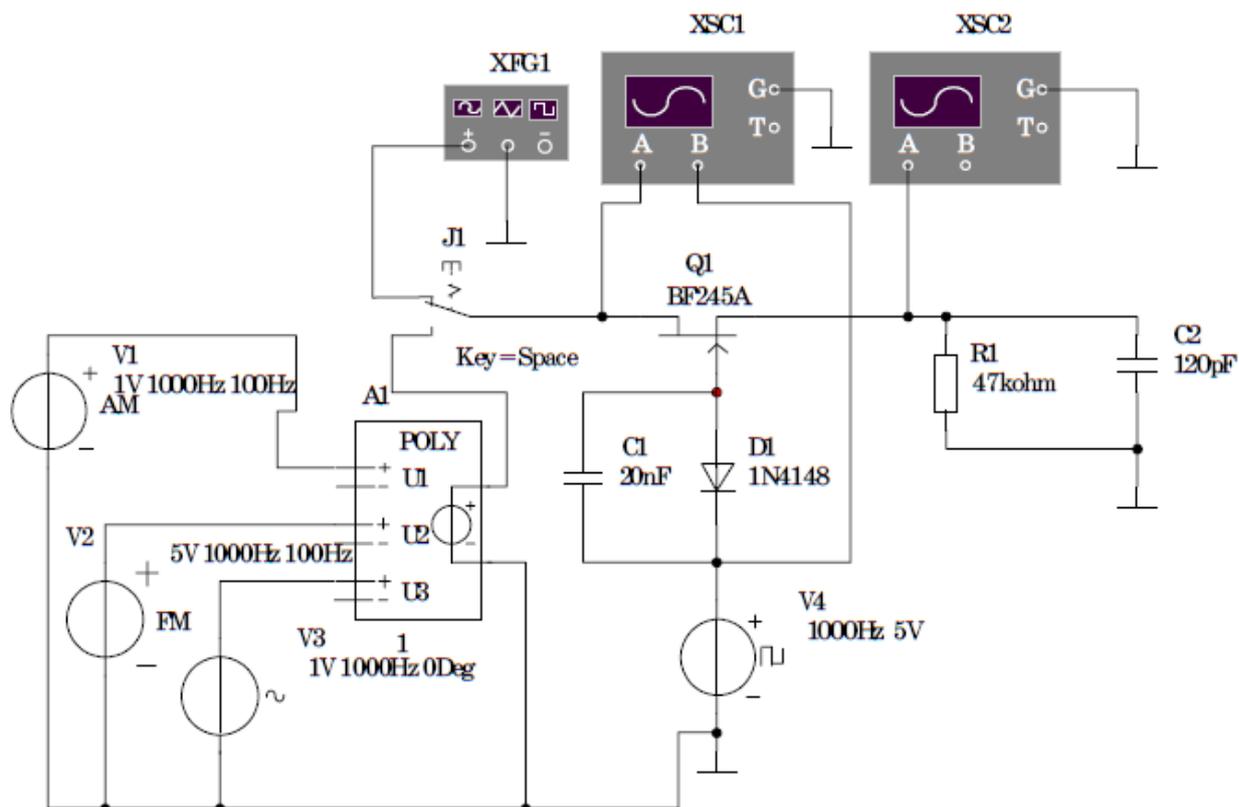


Рис. 6.5. Принципиальная электрическая схема исследования процесса дискретизации и квантования сигналов

4.3. Установить частоту функционального генератора XFG1 равной 100 Гц, а амплитуду - 1 В в режиме гармонического сигнала.

4.4. Установить следующие параметры источника V1 AM-сигналов:

- амплитуда $V_C = 0,5$ В;
- несущая частота $F_C = 100$ Гц;
- частота модуляции $F_M = 10$ Гц.

4.5. Установить следующие параметры источника V2 ЧМ-сигналов:

- амплитуда Voltage Amplitude = 0,5 В;
- несущая частота Carrier Frequency = 100 Гц;
- частота девиации Signal Frequency = 10 Гц.

4.6. Установить следующие параметры источника гармонических сигналов V3:

- амплитуда Voltage Amplitude = 0,5 В;
- частота Frequency = 100 Гц;
- фазовый сдвиг Phase = 90° .

4.7. Установить коэффициенты полиномиального источника $F = 1$, $G = 1$, $I = 1$.

4.8. Представить собранную модель лаборанту или преподавателю для проверки.

4.9. Нажатием правой кнопки мыши на черном поле модели вызвать соответствующую вкладку и установить цвет всех компонентов модели - красный. Копировать принципиальную электрическую схему модели в соответствующий раздел отчета.

Изучение процесса дискретизации гармонического сигнала

4.10. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и В осциллографа 1, а также на входе А осциллографа 2 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.11. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.12. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue. Расположить окно графика в нижнем левом углу монитора таким образом, чтобы изображение схемы модели было доступно.

4.13. Копировать графики в соответствующий раздел отчета.

Изучение процесса дискретизации сигнала треугольной формы

4.14. Установить функциональный генератор XFG1 в режим сигнала треугольной формы.

4.15. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и В осциллографа 1, а также на входе А осциллографа 2 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.16. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.17. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.18. Копировать графики в соответствующий раздел отчета.

Изучение процесса дискретизации сигнала прямоугольной формы

4.19. Установить функциональный генератор XFG1 в режим сигнала прямоугольной формы.

4.20. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и В осциллографа 1, а также на входе А осциллографа 2 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.21. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.22. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.23. Копировать графики в соответствующий раздел отчета.

Изучение влияния частоты выборки на процесс дискретизации

4.24. Установить частоту генератора управляющего сигнала V4 равной 100 Гц.

4.25. Установить функциональный генератор XFG1 в режим гармонического сигнала.

4.26. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и В осциллографа 1, а также на входе А осциллографа 2 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.27. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.28. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.29. Копировать графики в соответствующий раздел отчета.

Изучение процесса дискретизации стохастического сигнала

4.30. Подключить генератор стохастического сигнала нажатием клавиши Space на клавиатуре компьютера.

4.31. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и В осциллографа 2, а также на входе А осциллографа 2 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale). Время наблюдения должно составлять не менее 2 минут.

4.32. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.33. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.34. Копировать графики в соответствующий раздел отчета.

4.35. Установить частоту генератора управляющего сигнала V4 в соответствии с определенным вариантом задания (табл. 6.1).

4.36. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и В осциллографа 1, а также на входе А осциллографа 2 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale). Время наблюдения должно составлять не менее 2 минут.

4.37. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.38. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.39. Копировать графики в соответствующий раздел отчета.

4.40. Представить результаты измерений преподавателю для проверки.

4.41. Закрыть окно программы Multisim без сохранения изменений в файле Circuit 1.

5. Отчёт должен содержать.

5.1. Краткие теоретические сведения.

5.2. Иллюстрационные материалы:

- принципиальную электрическую схему исследования;
- графики осциллограмм;
- расчёты максимального периода дискретизации;

5.3. Выводы по работе.

6. Контрольные вопросы.

6.1. В чем заключается процесс дискретизации непрерывных сигналов? Как его записать аналитически?

6.2. Как изменяется спектр сигнала в результате его дискретизации?

6.3. Приведите примеры практического использования дискретизации сигналов в системах связи.

6.4. Сформулируйте теорему отсчетов.

6.5. Из каких соображений выбирается частота дискретизации непрерывных сигналов?

6.6. Каким образом и с помощью какого функционального устройства обеспечивается восстановление сигнала по его отсчетам?

6.7. Укажите причины погрешностей восстановления непрерывного сигнала по его отсчетам.

6.8. Напишите выражение сигнала в виде ряда Котельникова.

6.9. Какой базис используется при разложении сигналов в ряд Котельникова?

6.10. Как определяется коэффициент разложения сигналов в ряд Котельникова?

6.11. Чем определяется частота повторения отсчётных импульсов?

6.12. Из каких соображений выбирается полоса пропускания ФНЧ?

6.13. Поясните структуру спектра дискретного сигнала.

Справочные данные о диоде сигнальном типа 1N4148:

$$U_{\text{обр.макс}} = 75 \text{ В}; I_{\text{обр}} = 5 \text{ мкА}; U_{\text{пр}} = 0,6 \text{ В}; I_{\text{пр}} = 10 \text{ мА}; t_{\text{восст.Робр}} = 4 \text{ нс}; C = 1,3 \text{ пФ}$$

Справочные данные о полевом транзисторе типа BF245A:

$$U_{\text{зи пор}} = 40 \text{ В}; I_{\text{с нач мин}} = 2,5 \text{ мА}; I_{\text{с нач макс}} = 7,5 \text{ мА}; U_{\text{отс.мин}} = 1,8 \text{ В}; U_{\text{отс.макс}} = 5 \text{ В}; \\ C_{\text{зи}} = 25 \text{ пФ}; C_{\text{зс}} = 5 \text{ пФ};$$

Лабораторная работа №7 (4 часа)

Исследование аналого-цифрового преобразования сигналов

Цель работы: исследование аналого-цифрового преобразования сигналов.

1. Домашнее задание.

1.1. Изучите содержание и краткие теоретические сведения.

1.2. Ознакомьтесь с методическими указаниями по выполнению работы.

1.3. Ознакомьтесь с индивидуальным заданием на выполнение работы.

2. Основные теоретические сведения.

Цель аналого-цифрового преобразования (АЦП) — заменить непрерывную функцию $u(t)$ последовательностью M -ичных символов.

АЦП осуществляется в два этапа. Первый этап,— это квантование по времени непрерывного сигнала $u(t)$ (см. лаб. раб. №6). В результате получается последовательность импульсов-отсчетов, следующих с шагом Δt .

Второй этап — это оцифровка каждого отсчета. Подготовка к этой операции заключается в следующем. Диапазон возможных значений напряжений (u_{\min} , u_{\max}) делится на M интервалов длиной

$$\Delta u = (u_{\max} - u_{\min})/M \quad (7.1)$$

каждый. Величина Δu называется *шагом квантования по уровню* (рис. 7.1.). Далее интервалы нумеруют M -ичными цифрами снизу вверх, начиная с цифры 0.

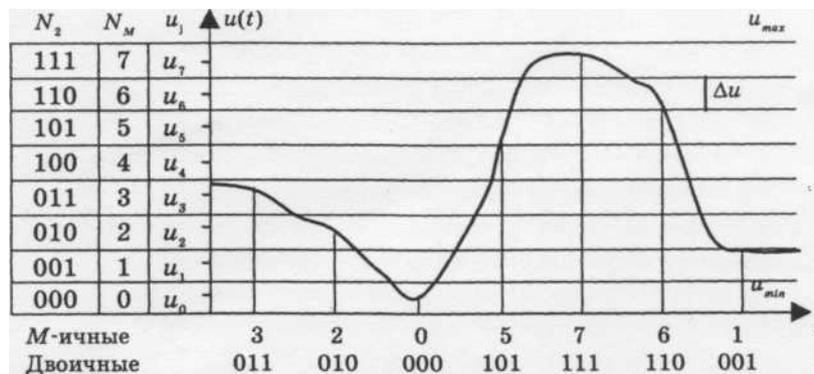


Рис. 7.1. Пример аналого-цифрового преобразования непрерывного сигнала $u(t)$ для $M=8$ ($k=3$)

Для оцифровки очередной импульс-отсчет «прикладываем» к шкале и заменяем его M -ичной цифрой N_M , равной номеру того интервала, в который попала вершина импульса. В итоге, вместо серии, состоящей из n отсчетов, передается последовательность M -ичных цифр длиной n .

Поскольку в технике наиболее часто для передачи используются двоичные символы, то значение M выбирают по формуле

$$M = 2^k \quad (7.2)$$

и номер очередного интервала передается в виде k -разрядной двоичной комбинации (N_2 на рис. 7.1). В итоге количество передаваемых символов-цифр увеличивается в k раз.

Обратное, т. е. **цифроаналоговое преобразование** (ЦАП) также проводится в два этапа.

Первый этап — это формирование импульсов, соответствующих каждой M -ичной цифре (или k -разрядной комбинации при передаче двоичных символов). В качестве подготовки к этой операции внутри каждого из M интервалов выбирается точка. Обычно она соответствует центру интервала — это точки u_0, u_1, \dots, u_{M-1} на 7.2. Тогда амплитуда очередного импульса, соответствующего цифре j , устанавливается равной u_j . Таким образом, в итоге проводится округление значения каждого отсчета.

Ошибка такого округления $e = u - u_j$, где u — истинное значение отсчета. Если шаг квантования Δu достаточно мал (соответственно, число интервалов M велико), величина случайной ошибки e имеет почти равномерное распределение в интервале ширины Δu , поэтому среднеквадратическое значение ошибки квантования по уровню равно

$$\sigma_k = \Delta u / (2\sqrt{3}) \quad (7.3)$$

Второй этап ЦАП — преобразование серии импульсов-отсчетов в непрерывную функцию — проводится при помощи ФНЧ с прямоугольной частотной характеристикой.

Такое квантование по уровню, когда все M интервалов имеют одинаковую длину (7.1), называется *равномерным* и является наиболее простым в техническом отношении. При фиксированном значении M эта процедура обеспечивает минимальное значение среднеквадратической ошибки квантования лишь для таких сигналов $u(t)$, у которых величина напряжения равномерно распределена в интервале (u_{\min}, u_{\max}). Реальные сигналы, такие как звуковой, характеризуются распределением вероятностей, имеющим узкий центральный пик и длинные «хвосты» (рис. 7.2).

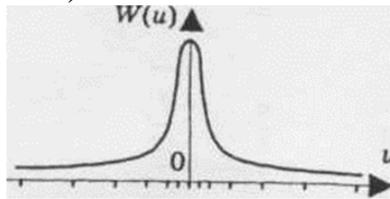


Рис. 7.2. Распределение вероятностей уровня сигнала и шкала неравномерного квантования

Для таких сигналов предпочтительней неравномерное квантование по уровню, когда длины интервалов берут меньшими в области наиболее вероятных значений напряжения и увеличивают их в области малых вероятностей.

Тот же эффект достигается более простыми техническими средствами.

Сначала сигнал $u(t)$ подвергают *компрессии по уровню*, т. е. пропускают через устройство, амплитудная характеристика которого линейна лишь в области малых значений входного напряжения, а при других значениях описывается логарифмической кривой (рис.7.3). В итоге распределение напряжения сигнала на выходе компрессора становится существенно ближе к равномерному.

После компрессии проводят стандартную процедуру АЦП с равномерным квантованием. В пункте приема, после стандартного ЦАП следует провести обратное нелинейное преобразование, хотя, как показывает практика, нередко можно обойтись и без него.

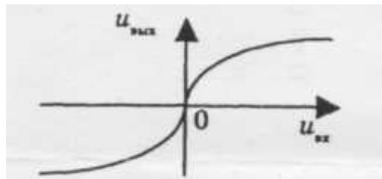


Рис. 7.3. Амплитудная характеристика компрессора

Для проведения АЦП телефонного сигнала используют стандартные значения параметров: $F_k = 8000$ отсчетов/с, $k = 8$ бит/отсчет, т.е. $M = 256$. В итоге получается стандартный цифровой телефонный сигнал, который характеризуется скоростью цифрового потока на выходе АЦП, равной $V = 8000 \times 8 = 64$ кбит/с [2,6].

Серия двоичных импульсов, получаемая в результате такого преобразования телефонного сигнала, называется сигналом с *импульсно-кодовой модуляцией* (ИКМ).

При записи музыкальных произведений на компакт-диск значения этих параметров следующие: $F_k = 44100$ отсчетов/с, $k = 16$ бит/отсчет, т. е. $M = 65536$, $V = 705.6$ кбит/с.

3. Описание лабораторной установки.

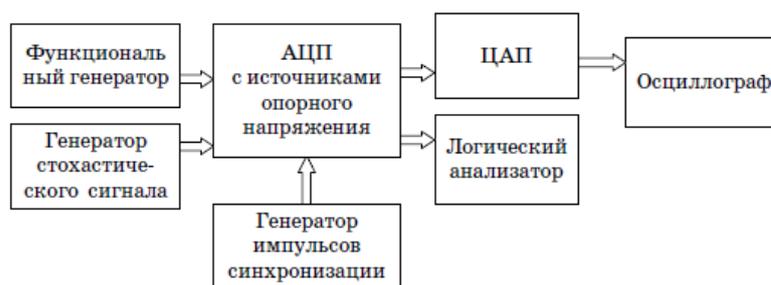


Рис. 7.4. Структурная схема исследования процесса аналого-цифрового преобразования сигналов

Функциональный генератор - создает гармонический сигнал, а также сигналы треугольной и прямоугольной формы.

Генератор стохастического сигнала - создает стохастический сигнал. Основан на источнике полиномиального сигнала, в котором моделируется взаимодействие АМ, ЧМ и гармонического колебаний.

Генератор импульсов синхронизации - создает импульсы синхронизации для управления АЦП.

АЦП (аналого-цифровой преобразователь) - применяется 8-разрядный аналого-цифровой преобразователь программы Multisim.

ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь) - применяется 8-разрядный цифро-аналоговый преобразователь программы Multisim.

Логический анализатор - применяется виртуальный 8-разрядный логический анализатор.

Осциллограф - применяется виртуальный двухлучевой осциллограф. В данной работе рекомендуется устанавливать параметры развертки и делителей напряжения так, чтобы на его экране регистрировалось от 1 до 2 периодов сигнала без ограничения по амплитуде.

4. Методические указания по проведению лабораторной работы.

4.1. В программе Multisim создать модель для исследования аналого-цифрового преобразования сигналов, соответствию с принципиальной электрической схемой, приведенной на рис. 7.2.

4.2. Установить величину Voltage источников опорного напряжения V1, V2, равной 3 В.

4.3. Установить параметры генератора импульсов синхронизации V3 в соответствии с вариантом задания, указанным преподавателем табл. 7.1.

Таблица 7.1

Варианты задания параметров генератора импульсов синхронизации V3

Номер варианта	Частота (<i>Frequency</i>), кГц	Скважность (<i>Duty Cycle</i>), %	Амплитуда (<i>Amplitude</i>), В
1	8	20	5
2	7	25	5
3	9	15	5
4	10	30	5
5	8	10	5
6	7	10	5
7	9	20	5
8	10	25	5
9	8	30	5
10	7	15	5

4.4. Установить частоту функционального генератора XFG1 равной 1000 Гц, а амплитуду 2 В в режиме гармонического сигнала.

4.5. Установить следующие параметры источника V4 AM-сигналов:

- амплитуда $VC = 0,5$ В;
- несущая частота $FC = 950$ Гц;
- частота модуляции $FM = 95$ Гц.

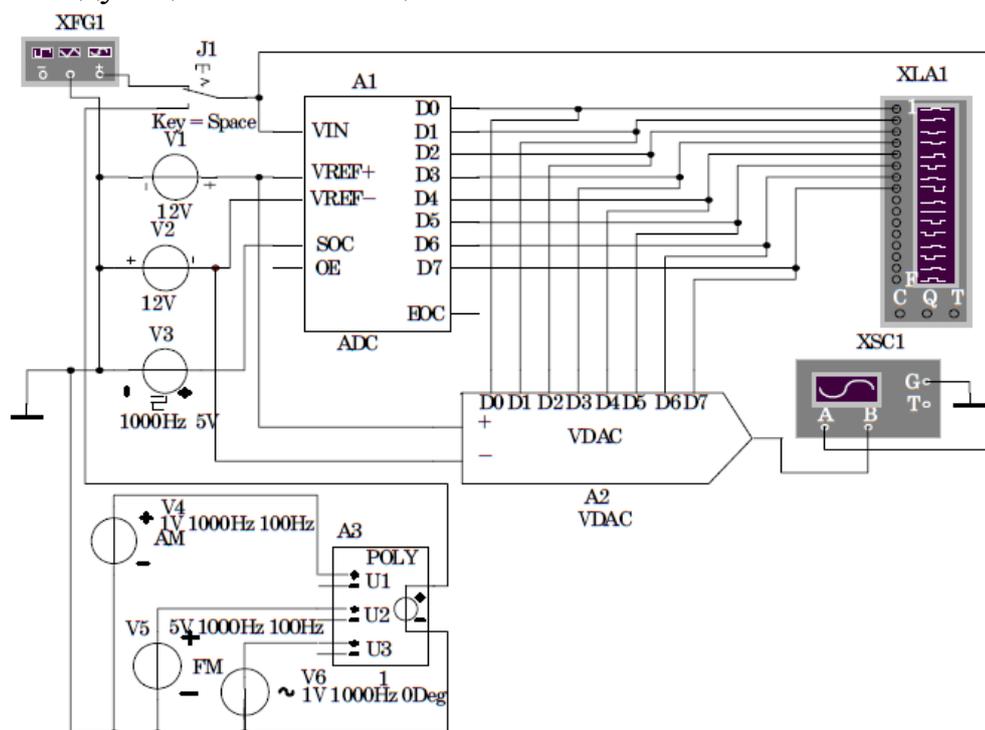


Рис. 7.5. Принципиальная электрическая схема исследования аналого-цифрового преобразования сигналов

4.6. Установить следующие параметры источника V5 ЧМ-сигналов:

- амплитуда Voltage Amplitude = 0,5 В;
- несущая частота Carrier Frequency = 1100 Гц;
- частота девиации Signal Frequency = 110 Гц.

4.7. Установить следующие параметры источника гармонических сигналов V6:

- амплитуда Voltage Amplitude = 0,5 В;
- частота Frequency = 1050 Гц;
- фазовый сдвиг Phase = 45° .

4.8. Установить коэффициенты полиномиального A3 источника $F = 1, G = 1, I = 1$.

4.9. Представить собранную модель лаборанту или преподавателю для проверки.

4.10. Нажатием правой кнопки мыши на черном поле модели вызвать соответствующую вкладку и установить цвет всех компонентов модели - красный. Копировать принципиальную электрическую схему⁷ модели в соответствующий раздел отчета.

Изучение аналого-цифрового преобразования гармонического сигнала

4.11. Включить модель и наблюдать сигналы на входах осциллографа А и (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale), а также на входах логического анализатора.

4.12. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.13. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

Расположить окно графика в нижнем левом углу монитора таким образом, чтобы изображение схемы модели было доступно.

4.14. Копировать графики в соответствующий раздел отчета. Изучение процесса дискретизации сигнала треугольной формы.

4.15. Установить функциональный генератор XFG1 в режим сигнала треугольной формы.

4.16. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и Б осциллографа (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale), а также на входах логического анализатора.

4.17. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.18. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.19. Копировать графики в соответствующий раздел отчета. Изучение процесса дискретизации сигнала прямоугольной формы

4.20. Установить генератор функциональный XFG1 в режим сигнала прямоугольной формы.

4.21. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и В осциллографа (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale), а также на входах логического анализатора.

4.22. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.23. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.24. Копировать графики в соответствующий раздел отчета. Изучение процесса дискретизации стохастического сигнала

4.25. Подключить генератор стохастического сигнала нажатием клавиши Space на клавиатуре компьютера.

4.26. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и В осциллографа 1, а также на входе А осциллографа 2 (в режиме DC), установив необходимые

значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).
Время наблюдения должно составлять не менее 2 минут.

4.27. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.28. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.29. Копировать графики в соответствующий раздел отчета.

4.30. Представить результаты измерений преподавателю для проверки.

4.31. Закрыть окно программы Multisim без сохранения изменений в файле Circuit 1.

5. Отчёт должен содержать.

5.1. Краткие теоретические сведения.

5.2. Иллюстрационные материалы:

- принципиальную электрическую схему исследования АЦП сигналов;
- графики осциллограмм;
- расчёты максимального периода дискретизации Δt и относительной погрешности преобразования δ для конкретного варианта задания параметров генератора импульсов синхронизации V3;

5.3. Выводы по работе.

6. Контрольные вопросы.

6.1. Определение аналого-цифрового преобразования.

6.2. Что такое шаг дискретизации?

6.3. Определение процесса квантования.

6.4. Чем различаются следящий и периодический режимы квантования?

6.5. Поясните отличия последовательных, параллельных и последовательно-параллельных АЦП.

6.6. Основные характеристики АЦП.

6.7. Принцип действия АЦП прямого преобразования, в каких устройствах его целесообразно использовать.

6.8. Принцип действия интегрального таймера.

6.9. Принцип действия АЦП с опорными источниками тока.

6.10. Каким образом осуществляется АЦП?

6.11. Как обеспечивается минимальное значение ошибки квантования при ЦАП?

6.12. Поясните принцип компрессии по уровню.

Литература [3,7].

Лабораторная работа №8 (4 часа)

Исследование ковариационных функций прямоугольных и дискретных сигналов

Цель работы: исследование основных свойств ковариационных функций последовательностей пачек прямоугольных импульсов и изучение принципа корреляционного анализа, свойств ковариационных и взаимных корреляционных функций дискретных сигналов.

1. Домашнее задание.

1.1. Изучите содержание и краткие теоретические сведения.

1.2. Разработайте самостоятельно алгоритм и соответствующие ПМО для реализации приведённых лабораторных установок.

1.3. Ознакомиться с индивидуальным заданием и порядком проведения лабораторной работы.

2. Основные теоретические сведения.

Напомним определения исследуемых характеристик представленных в таблице 8.1.

Таблица 8.1

Термин	Определение	Математическая формула и обозначение характеристики
1. Ковариационная функция случайного процесса <i>Нрк.</i> <i>Автоковариационная функция случайного процесса</i> <i>Корреляционная функция случайного процесса</i> Autocovariation function	Функция двух переменных t и u из области определения случайного процесса, равная математическому ожиданию произведения значений случайного процесса в моменты времени t и u	$K_{\xi}(t, u) = M\{\xi(t)\xi(u)\},$ $\forall t, u \in T$
2. Корреляционная функция случайного процесса <i>Нрк.</i> <i>Автокорреляционная функция случайного процесса</i> <i>Ковариационная функция случайного процесса</i> Autocorrelation function	Функция двух переменных t и u , равная ковариационной функции центрированного случайного процесса	$R_{\xi}(t, u) = M\{[\xi(t) - m_1] \times$ $\times [\xi(u) - m_2]\},$ $\forall t, u \in T,$ где $m_1 = M[\xi(t)],$ $m_2 = M[\xi(u)]$
3. Нормированная корреляционная	Функция двух переменных t и u , равная отношению	$r(t, u) = \frac{R(t, u)}{\sigma(t)\sigma(u)}$

функция случайного процесса
Нрк. Коэффициент корреляции
 Correlation coefficient

корреляционной функции случайного процесса к произведению средних квадратических отклонений случайного процесса в моменты времени t и u

$\forall t, u \in T$

4. Взаимная ковариационная функция случайных процессов
Нрк. Кроссковариационная функция
Кросскорреляционная функция случайных процессов
 Cross-covariation function

Функция двух переменных t и u , равная математическому ожиданию произведения случайных процессов, взятых в любые моменты времени t и u из областей определения этих случайных процессов

$$K_{\xi\eta}(t, u) = M\{\xi(t)\eta(u)\}$$

5. Взаимная корреляционная функция случайных процессов
Нрк. Кросскорреляционная функция
Кроссковариационная функция случайных процессов
 Cross-correlation function

Функция двух переменных t и u , равная математическому ожиданию произведения значений центрированных случайных процессов, взятых в любые моменты времени t и u из областей определения этих случайных процессов

$$R_{\xi\eta}(t, u) = M\{[\xi(t) - m_\xi] \times [\eta(u) - m_\eta]\},$$

$$\forall t, u \in T,$$

где $m_\xi = M[\xi(t)],$
 $m_\eta = M[\eta(u)]$

6. Нормированная взаимная корреляционная функция случайных процессов
Нрк. Взаимный коэффициент корреляции случайных процессов

Функция двух переменных t и u , равная отношению взаимной корреляционной функции случайных процессов к произведению средних квадратических отклонений этих случайных процессов

$$r_{\xi\eta}(t, u) = \frac{R_{\xi\eta}(t, u)}{\sigma_\xi(t)\sigma_\eta(u)}$$

Ковариационная функция непериодического сигнала определяется выражением

$$K(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t + \tau)dt, \quad (8.1)$$

где τ – смещение во времени.

Для действительного сигнала ковариационная функция является действительной четной функцией

$$K(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t+\tau)dt = \int_{-\infty}^{\infty} s(t-\tau)s(t)dt \quad (8.2)$$

$$= R(-\tau)$$

Ковариационная функция непериодического сигнала при $\tau = 0$ описывает энергию сигнала

$$K(0) = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t)dt = E \quad (8.3)$$

Ковариационная функция периодического сигнала $s(t)$, имеющего период T , определяется выражением

$$K(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t)s(t+\tau)dt. \quad (8.4)$$

При $\tau = 0$ корреляционная функция

$$K(0) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s^2(t)dt \quad (8.5)$$

описывает среднюю мощность сигнала.

Корреляционная функция для двух сигналов называется взаимно корреляционной функцией.

Сравнивая выражения (8.1)...(8.5) одиночных и периодических сигналов одного и того же вида, отметим, что про длительности сигнала значительно меньшей периода ковариационную функцию периодического сигнала можно получить, взяв ковариационную функцию одиночного сигнала с коэффициентом $1/T$ – периодическим её повторением на оси τ .

Ковариационная функция непериодического сигнала $s(t)$ связана с его спектральной плотностью энергии $\hat{S}(\omega)$ преобразованием Фурье

$$K(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{S}(\omega)e^{i\omega\tau}d\omega \quad (8.6)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 e^{i\omega\tau} d\omega$$

$$W(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) e^{i\omega\tau} dt, \quad (8.7)$$

Где $W(\omega) = S^*(\omega)S(\omega) = |S(\omega)|^2$

Учитывая четность функций $K(\tau)$ и $W(\omega)$, (8.6) и (8.7) можем записать в виде:

$$W(\omega) = 2 \int_0^{\infty} K(\tau) \cos \omega \tau dt, \quad (8.8)$$

$$K(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} W(\tau) \cos \omega \tau d\omega$$

При $\tau = 0$

$$K(0) = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) d\omega \quad (8.9)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega$$

Для узкополосного сигнала

$$u(t) = \operatorname{Re}[\dot{V}(t) e^{i\omega_0 t}] \quad (8.10)$$

Выражение для ковариационной функции можем записать в виде

$$K(\tau) = \operatorname{Re} \left[e^{i\omega_0 \tau} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \dot{V}(t) \dot{V}(t + \tau) e^{i2\omega_0 t} dt \right] + \operatorname{Re} \left[e^{i\omega_0 \tau} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \dot{V}^*(t) \dot{V}(t + \tau) dt \right] \quad (8.11)$$

Функция $\dot{V}(t)$ является низкочастотной, медленно меняется в течение периода несущего колебания $2\pi/\omega_0$. Вследствие этого значение первого интеграла в (8.11) может быть принято равным нулю. Таким образом, выражение для ковариационной функции узкополосного сигнала запишется в виде

$$K(\tau) = \operatorname{Re} \left[e^{i\omega_0 \tau} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \dot{V}^*(t) \dot{V}(t + \tau) dt \right] \quad (8.12)$$

$$= \operatorname{Re}[K_V(\tau) e^{i\omega_0 \tau}]$$

Где $K_V(\tau) = 1/2 \int_{-\infty}^{\infty} \dot{V}(t) \dot{V}(t + \tau) dt$

Величина $K_V(\tau)$ представляет ковариационную функцию комплексной огибающей сигнала. Так как $\dot{V}(t)$ является комплексной величиной, то в общем случае $K_V(\tau)$ представляет комплексную функцию. Ковариационная функция узкополосного сигнала $K(\tau)$ является действительной. Соотношение, связывающее её с ковариационной функцией комплексной огибающей (8.12), аналогично тому, которое связывает узкополосный сигнал с его комплексной огибающей.

Часто целесообразно сначала определить ковариационную функцию комплексной огибающей сигнала, а затем перейти к ковариационной функции узкополосного сигнала.

Когда огибающая сигнала $V(t)$ является действительной величиной, величина ковариационной функции огибающей

$$K_V(\tau) = 1/2 \int_{-\infty}^{\infty} V(t)V(t + \tau)dt$$

так же действительная величина. В этом случае выражение для корреляционной функции узкополосного сигнала можно записать в виде

$$K(\tau) = K_V(\tau) \cos \omega_0 \tau \tag{8.13}$$

Взаимная ковариационная функция двух узкополосных сигналов, имеющих одинаковую несущую частоту ω_0 , определяется аналогично тому, как была определена ковариационная функция.

Выражение для спектральной плотности энергии узкополосного сигнала определяется как преобразование Фурье корреляционной функции

$$W(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau)e^{i\omega_0\tau}d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} Re[K_V(\tau)e^{i\omega_0\tau}]e^{-i\omega\tau}d\tau \tag{8.14}$$

Из (8.14) получим

$$W(\omega) = \frac{1}{2}W_V(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}W_V(-\omega - \omega_0) \tag{8.15}$$

Где W_V – спектральная плотность энергии комплексной огибающей

$$W_V(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K_V(\tau) e^{-i\omega\tau}d\tau \tag{8.16}$$

Графики ковариационной функции одиночного импульса и периодической последовательности пачек прямоугольных импульсов (в виде пачки трёх импульсов) приведены на рис. 8.1 и 8.2 соответственно.

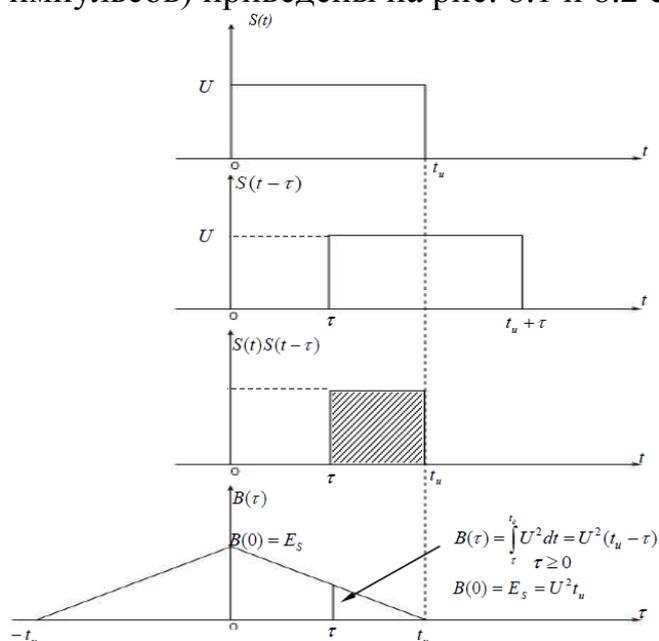


Рис. 8.1. КФ одиночного прямоугольного импульса.

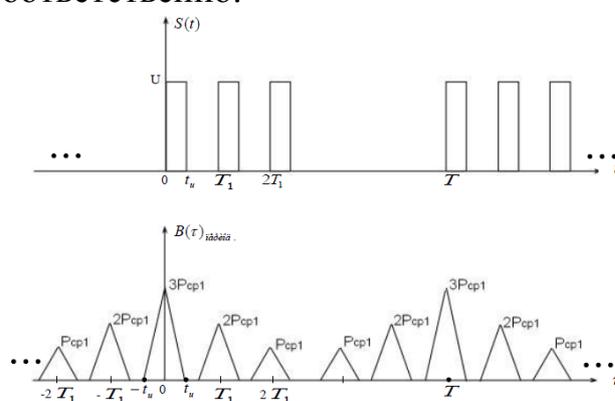


Рис. 8.2. ВКФ пачки прямоугольных импульсов.

Взаимная ковариационная функция дискретных сигналов также является дискретной. Дискретная ВКФ записывается следующим образом

$$\widehat{K}(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} u_j u_{j-n}, \quad (8.17)$$

где u_j – значение дискретного сигнала на j -ой позиции, которое может принимать значения $\pm 1, 0$;

u_{j-n} – значение копии дискретного сигнала, сдвинутой относительно дискретного сигнала на n позиции.

Эта функция целочисленного аргумента n обладает следующими свойствами:

- достигает максимума при $n = 0$;
- является четной, то есть $\widehat{K}_u(n) = \widehat{K}_u(-n)$.

Дискретная взаимная корреляционная функция записывается так

$$\widehat{R}_{u_1 u_2}(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} u_{1j} u_{2j-n} \quad (8.18)$$

где u_{1j} – значение первого дискретного сигнала на j -ой позиции, которое может принимать значения $\pm 1, 0$;

u_{2j-n} – значение второго дискретного сигнала на j -ой позиции, которое может принимать значения $\pm 1, 0$; причём второй сигнал сдвинут относительно первого на n позиций.

Дискретная ВКФ обладает следующими свойствами:

не является чётной функцией двух неодинаковых сигналов, то есть

$$\widehat{R}_u(n) \neq \widehat{R}_u(-n);$$

необязательно достигает максимума при $n = 0$;

$$R_{u_1 u_2}(n) \neq R_{u_2 u_1}(-n) \quad (8.19)$$

Соотношение (8.19) позволяет определить искомые функции при отрицательных значениях аргумента n .

3. Описание моделируемых лабораторных установок и порядка выполнения исследований.

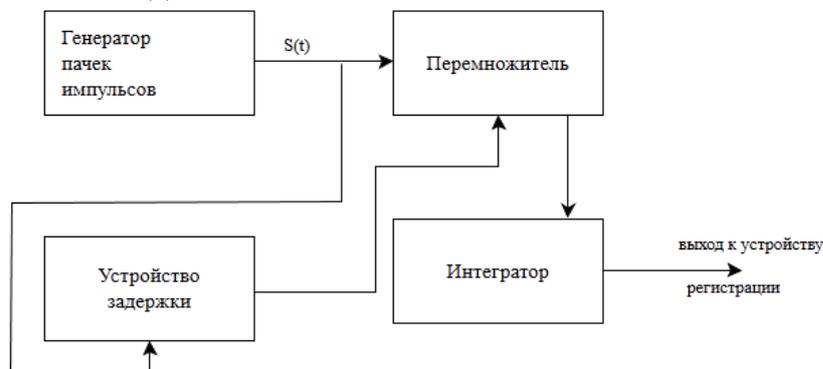


Рис. 8.3. Схема исследования ковариационной функции периодической последовательности видеосигналов: $S(t)$ – прямой сигнал, $S(t - \tau)$ – задержанный сигнал.

По данным табл. 8.4 построить графики ВКФ. Сравнить полученные графики.

- рассчитать дискретную ВКФ пятипозиционного сигнала Баркера $u_3 = (1, -1, 1, 1, 1)$, используя формулу (8.17), и построить её график. Сравнить графики АКФ сигналов u_1 и u_2
- рассчитать дискретную взаимную корреляционную функции сигналов u_1 и u_2 по формуле (8.18). Результаты расчётов свести в табл. 8.5.

Таблица 8.5

n	0	1	2	3	4	-1	-2	-3	-4
$\widehat{K}_{u_1 u_2}(n)$									

Используя данные табл. 8.5, построить график и сравнить её с ВКФ, построенными по данным табл. 8.4.

4. Отчёт должен содержать.

- 4.1. Краткие теоретические сведения.
- 4.2. Алгоритмы и программы расчётов.
- 4.3. Результаты предварительных расчётов.
- 4.4. Указанные в п. 3 графики.
- 4.5. Выводы по работе.

5. Контрольные вопросы.

- 5.1. Поясните принцип работы коррелятора.
- 5.2. Сформулируйте основные свойства ковариационной функции и дайте их физическое толкование.
- 5.3. Раскройте основные свойства корреляционной функции.
- 5.4. Постройте ковариационную функцию двух разнополярных прямоугольных импульсов, имеющих параметры: $U_{m1} = 1\text{В}$, $\tau_{н1} = 10\text{ мкс}$, $U_{m2} = -1\text{В}$, $\tau_{н2} = 10\text{ мкс}$, расстояние между импульсами 60 мкс.
- 5.6. Дайте определение дискретного сигнала. Приведите примеры этих сигналов.
- 5.7. Дайте определение дискретной АКФ дискретного сигнала. Перечислите её свойства.
- 5.8. В чём состоит достоинство сигналов Баркера по сравнению с другими дискретными сигналами?
- 5.9. Дайте определение дискретной ВКФ двух дискретных сигналов. Перечислите её свойства.
- 5.10. Каким образом можно определить ковариационную функцию периодического сигнала, если известна ковариационная функция одиночного сигнала и при каких условиях?

5.11. При каких условиях корреляционная функция описывает среднюю мощность сигнала?

5.12. Дайте определение нормированной ковариационной функции.

5.13. Дайте определение нормированной корреляционной функции.

Литература [1,6,7].

Лабораторная работа №9 (4 часа)

Исследование стационарных случайных процессов

Цель работы: исследование стационарных случайных процессов.

1. Домашнее задание.

- 1.1. Изучите содержание работы и основные теоретические сведения.
- 1.2. Изучите методические указания по выполнению работы.
- 1.3. Ознакомьтесь с индивидуальным заданием по выполнению работы.

2. Основные теоретические сведения.

Под *случайным (стохастическим)* процессом (сигналом) $S(t)$ понимают множество временных функций $S_i(t)$ (где $i = 1, 2, \dots$), которые в любой момент времени могут принимать различные значения с заданным распределением вероятностей. Функции $S_i(t)$ называются реализациями случайного процесса, а совокупность возможных реализаций — ансамблем. В дальнейшем под сигналом $S(t)$ будем понимать напряжение или ток, развиваемый на некоторой нагрузке, а интервал времени наблюдения сигнала (процесса) обозначим T .

Любой случайный процесс можно определить лишь в вероятностном смысле. Поэтому говорят, что случайный процесс задан, если указано правило нахождения его вероятностных характеристик для любого момента времени в пределах области определения. При счетном или конечном числе реализаций их можно просто перечислить и указать вероятности появлений.

Например, пусть случайный сигнал $S(t)$, заданный в интервале времени $t \in [0, T]$, имеет реализации

$$\begin{aligned} S_0(t) &= U_c \cos \omega_0 t; \\ S_1(t) &= U_c \cos \omega_1 t \end{aligned}$$

с вероятностями $P(S_0) = P_0$ и $P(S_1) = P_1 = 1 - P_0$, где U_c , ω_0 , ω_1 , P_0 — некоторые постоянные величины. Нетрудно увидеть, что это простейший пример случайного процесса с конечным числом реализаций, т.е. сигнала, информационным параметром которого является частота ω . Следовательно, это сигнал с частотной манипуляцией.

Рассмотрим некоторый случайный процесс $X(t)$. Зафиксировав момент времени t_1 , получим сечения случайного процесса $X(t_1) = x_1$, представляющие собой случайную величину (непрерывную или дискретную).

Пусть задан некоторый уровень x , тогда можно определить вероятность того, что в момент времени $t = t_1$ значения случайного процесса не превысят значения x :

$$F_1(x, t) = P\{X(t) \leq x\}.$$

Более полно случайный процесс характеризует двухмерная интегральная функция распределения $F_2(x_1, t_1; x_2, t_2)$, определяющая вероятность того, что в

момент времени t_1 функция $X(t_1)$ будет не больше x_1 а в момент времени t_2 функция $X(t_2)$ не превысит уровень x_2 :

$$F_2(x_1, t_1; x_2, t_2) = P\{X(t_1) \leq x_1; X(t_2) \leq x_2\}$$

При условии существования частной производной второго порядка можно найти двумерную плотность распределения вероятностей:

$$\frac{\partial^2 F_2(x_1, t_1; x_2, t_2)}{\partial x_1 \partial x_2} = \omega_2(x_1, t_1; x_2, t_2)$$

В общем случае определяют n -мерную ИФР:

$$F_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = P\{X(t_1) \leq x_1, \dots, X(t_n) \leq x_n\},$$

которая выражает свойства случайного процесса в произвольных сечениях.

Аналогично определяется n -мерная ПВ:

$$\omega_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = \frac{\partial^n F_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n)}{\partial x_1 \dots \partial x_n}$$

В частном случае, если значения случайного процесса $X(t)$ к любой момент времени являются независимыми, то n -мерная плотность вероятностей примет вид

$$\omega_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = \prod_{k=1}^n \omega_1(x_k, t_k)$$

Нахождение n -мерных ПВ и ИФР — весьма трудная задача, которую удается решить далеко не всегда, поэтому для большинства практических задач гораздо удобнее использовать более простые и наглядные числовые характеристики случайного процесса.

Математическое ожидание (момент первого порядка)

$$M\{X(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x \omega_1(x, t) dx,$$

где $\omega_1(x, t)$ — одномерная плотность распределения вероятностей случайного процесса.

Математическое ожидание является некоторой средней функцией, около которой группируются возможные реализации случайного процесса.

Дисперсия (центральный момент второго порядка)

$$D\{X(t)\} = M\{X^2(t)\} - [M\{X(t)\}]^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [x - M\{X(t)\}]^2 \omega_1(x, t) dx$$

Дисперсия также является функцией времени и характеризует меру разброса реализаций относительно среднего значения случайного процесса, т.е. вокруг его математического ожидания.

Математическое ожидание и дисперсия характеризуют случайный процесс только в отдельные моменты времени. Поэтому применяют также функцию корреляции, которая характеризует статистическую связь между сечениями

$X(t_1)$ и $X(t_2)$ случайного процесса в моменты времени t_1 и t_2 и определяет среднюю скорость его изменения во времени.

Функцию корреляции определяют как математическое ожидание произведения двух сечений центрированного случайного процесса (центрированным процессом называется разность между случайным процессом и его математическим ожиданием):

$$B(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [x_1 - M\{X(t_1)\}]^2 [x_2 - M\{X(t_2)\}]^2 \omega_2(x_1, x_2; t_1, t_2) dx_1 dx_2$$

Можно так же определить взаимную корреляционную функцию двух случайных процессов $X(t)$ и $Y(t)$:

$$B_{XY}(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [x_1 - M\{X(t_1)\}]^2 [y_2 - M\{Y(t_2)\}]^2 \omega_2(x_1, y_2; t_1, t_2) dx_1 dy_2$$

где $\omega_2(x_1, y_2; t_1, t_2)$ — совместная плотность вероятностей сечений процессов $X(t)$ и $Y(t)$ соответственно в моменты t_1 и t_2 .

Строго стационарным, т.е. *стационарным в узком смысле*, называется случайный процесс, плотность распределения вероятностей которого не изменяется при произвольном сдвиге во времени начала отсчета, т.е. для любых значений $-\infty < t < \infty$:

$$\omega_n(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_n) = \omega_n(x_1, \dots, x_n; t_1 + \tau, \dots, t_n + \tau)$$

где τ — произвольный интервал времени.

Отсюда следует независимость (инвариантность) числовых характеристик или моментных функций такого случайного процесса: математического ожидания и дисперсии от сдвига во времени.

Стационарным в широком смысле называется процесс, математическое ожидание и дисперсия которого не зависят от времени, а функция корреляции зависит только от значения τ . Из данного определения следует, что функция корреляции такого процесса — это четная функция от τ , т.е. $B(\tau) = B(-\tau)$.

Кроме того, можно показать, что $B(\tau) \leq B(0) = \sigma^2$, где σ^2 — дисперсия стационарного процесса. Для этого следует найти математическое ожидание квадрата разности значений стационарного процесса $X(t)$ в моменты времени t и $t + \tau$:

$$\begin{aligned} M\{[X(t) - X(t + \tau)]^2\} &= M\{X^2(t) + X^2(t + \tau) - 2X(t)X(t + \tau)\} \\ &= M\{X^2(t)\} + M\{X^2(t + \tau)\} - 2M\{X(t)X(t + \tau)\} = 2[D\{X(t)\} - B(\tau)] \end{aligned}$$

Поскольку квадрат любого числа всегда не отрицательный, т.е. выражение $2[D\{X(t)\} - B(\tau)] \geq 0$, то можно утверждать, что дисперсия всегда положительная, т.е. $D\{X(t)\} \geq 0$.

Очевидно, что случайный процесс стационарный в узком смысле является стационарным и в широком смысле. Однако процесс стационарный в широком смысле не является стационарным в узком смысле.

Для случайных процессов стационарных в широком смысле введем важное свойство — *эргодичность*, определяющее, что усреднение одной реализации

$x(t)$ процесса по времени при условии, что это время T достаточно велико, приводит примерно к такому же результату, как усреднение реализаций случайного процесса $X(t)$ по множеству (ансамблю). В этом случае математическое ожидание случайного процесса характеризует постоянную составляющую, а дисперсия — мощность переменной составляющей.

Свойство эргодичности имеет важное практическое значение, так как позволяет при изучении статистических свойств случайного процесса рассматривать только одну реализацию, но за достаточно длинный промежуток времени.

3. Описание лабораторной установки.

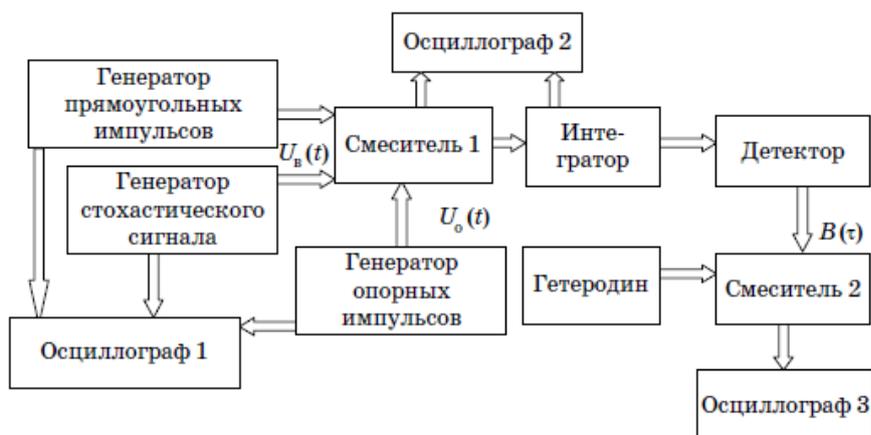


Рис. 9.1. Структурная схема исследования стационарных случайных процессов

Генератор прямоугольных импульсов - создает последовательность импульсов прямоугольной формы.

Генератор стохастического сигнала - создает стохастический сигнал. Основан на источнике полиномиального сигнала, в котором моделируется взаимодействие АМ, ЧМ и гармонического колебаний.

Генератор опорных импульсов - создает опорные импульсы прямоугольной формы.

Смеситель 1 - производит перемножение входного и опорного сигнала. При этом опорный импульс перемещается во времени относительно входных импульсов с шагом t .

Интегратор - применяется интегрирующая RC цепь.

Детектор - применяется детектор на полупроводниковом диоде типа 1N4148. На выходе детектора снимается сигнал соответствующий корреляционной функции:

$$B(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U_B(t)U_0(t + \tau)dt.$$

Энергетический спектр случайного сигнала определяется выражением:

$$W(f) = 4 \int_0^{\infty} B(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau$$

Гетеродин - применяется источник гармонического сигнала.

Смеситель 2 - производит перемножение сигналов корреляционной функции и гетеродина. На выходе образуется сигнал свертки.

Осциллографы 1-3 - применяется виртуальный двухлучевой осциллограф. В данной работе рекомендуется устанавливать параметры развертки и делителей напряжения так, чтобы на его экране регистрировалось от 1 до 2 периодов сигнала без ограничения по амплитуде.

4. Методические указания по проведению лабораторной работы.

4.1. В программе Multisim создать модель для исследования стационарных случайных процессов в соответствии с принципиальной электрической схемой, приведенной на рис. 9.2.

4.2. Установить параметры генератора опорных импульсов V1 и генератора прямоугольных импульсов V2 в соответствии с вариантом задания, указанным преподавателем и табл. 9.1 и 9.2.

4.3. Установить следующие параметры источника гармонических сигналов V3:

- частота Frequency = 1 МГц;
- фазовый сдвиг Phase = 90°.

4.4. Установить следующие параметры источника V4 АМ-сигналов:

- несущая частота FC = 100 кГц;
- частота модуляции FM = 10 кГц.

4.5. Установить следующие параметры источника V5 ЧМ-сигналов:

- амплитуда Voltage Amplitude = 1В;
- несущая частота Carrier Frequency = 100 кГц;
- частота девиации Signal Frequency = 10 кГц.

Таблица 9.1

Варианты заданий параметров генератора импульсов V1

Номер варианта	Время задержки (Delay Time), нс	Длительность импульса T_0 (Pulse Width), нс	Период следования (Period), нс
1	976	488	1480
2	976	490	1480
3	976	495	1480
4	976	500	1480
5	976	505	1480
6	976	510	1480
7	976	515	1480
8	976	485	1480
9	976	480	1480
10	976	520	1480

Варианты заданий параметров генератора импульсов V2

Номер варианта	Время задержки (<i>Delay Time</i>), нс	Длительность импульса T_B (<i>PulseWidth</i>), нс	Период следования (<i>Period</i>), нс
1	500	488	1500
2	500	490	1500
3	500	495	1500
4	500	500	1500
5	500	505	1500
6	500	510	1500
7	500	515	1500
8	500	485	1500
9	500	480	1500
10	500	520	1500

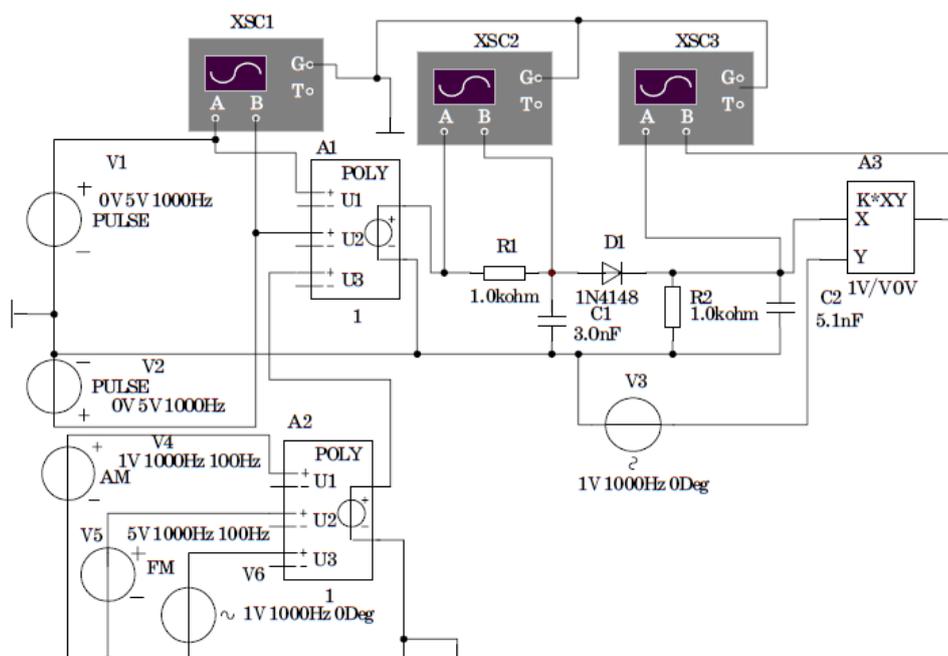


Рис. 9.2. Принципиальная электрическая схема исследования стационарных случайных процессов

4.6. Установить следующие параметры источника гармонических сигналов V6:

- частота Frequency = 100 кГц;
- фазовый сдвиг Phase = 90°.

4.7. Установить коэффициенты полиномиального источника A1 равными $A = 0$, $F = 1$.

4.8. Установить коэффициенты полиномиального источника A2 равными $F=1, G=1, I=1$.

4.9. Представить собранную модель лаборанту или преподавателю для проверки.

4.10. Нажатием правой кнопки мыши на черном поле модели вызвать соответствующую вкладку и установить цвет всех компонентов модели - красный. Копировать принципиальную электрическую схему модели в соответствующий раздел отчета.

Изучение корреляционной функции и свертки импульсов равной длительности

4.11. Включить модель и наблюдать сигналы на входах А и Б осциллографа XSC1 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.12. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.13. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue. Расположить окно графика в нижнем левом углу монитора таким образом, чтобы изображение схемы модели было доступно.

4.14. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.15. Включить модель и наблюдать сигнал корреляционной функции на входе В осциллографа XSC2 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.16. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.17. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.18. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.19. Включить модель и наблюдать сигнал свертки на входе осциллографа XSC3 В (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.20. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.21. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.22. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

Изучение корреляционной функции и свертки импульсов при $T_e > T_0$

4.23. Установить длительность входных импульсов генератора V2 равной $2T_B$ (где T_B - значение из табл. 9.2 для заданного варианта).

4.24. Включить модель и наблюдать сигнал корреляционной функции на входе В осциллографа XSC2 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.25. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.26. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.27. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.28. Включить модель и наблюдать сигнал свертки на входе В осциллографа XSC3 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.29. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.30. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.31. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

Изучение корреляционной функции и свертки импульсов при $T_c < T_a$

4.32. Установить длительность входных импульсов генератора V2 равной $0,5T_b$ (где T_b - значение из табл. 9.2 для заданного варианта).

4.33. Включить модель и наблюдать сигнал корреляционной функции на входе В осциллографа XSC2 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.34. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.35. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.36. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.37. Включить модель и наблюдать сигнал свертки на входе В осциллографа XSC3 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.38. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.39. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.40. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

Выделение последовательности импульсов из шумоподобного сигнала

4.41. Установить длительность входных импульсов генератора V2 равной T_b (где T_b - значение из табл. 9.2 для заданного варианта).

4.42. Установить коэффициенты полиномиального источника A1 равными $D = 0,5$, $K = 1$.

4.43. Включить модель и наблюдать сигнал на входе A осциллографа XSC2 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.44. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.45. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.46. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

4.47. Включить модель и наблюдать сигнал свертки на входе B осциллографа XSC3 (в режиме DC), установив необходимые значения длительности развертки (Timebase) и делителей напряжения (Scale).

4.48. Выключить модель незадолго до момента полного хода луча осциллографа.

4.49. Включить транспонирование осциллограмм в графики MathCad путем последовательного нажатия кнопок Transfer-Export Simulation Results to MathCad-Continue.

4.50. Копировать график в соответствующий раздел отчета.

5. Отчёт должен содержать.

5.1. Краткие теоретические сведения.

5.2. Иллюстрационные материалы:

- принципиальную электрическую схему исследования;
- графики осциллограмм;

5.3 Расчёты энергетического спектра сигнала по корреляционной функции, полученной в п. 4.15;

5.4. Выводы по работе.

6. Контрольные вопросы.

6.1. Дайте определение корреляционной функции сигнала $B(t)$.

6.2. Дайте определение спектральной плотности энергии $W(f)$ и мощности $G(f)$ сигналов.

6.3. Каковы размерности $B(t)$, $W(f)$ и $G(f)$ и их свойства?

6.4. Как вычисляют спектр произведения сигналов?

6.5. Как изменяется спектр сигнала в результате его умножения на гармоническое колебание?

6.6. Приведите соотношения для математического ожидания, дисперсии и ковариационной функции при эргодическом процессе.

6.7. Что характеризует корреляционная функция?

6.8. Дайте определения интервала корреляции.

6.9. Определите моментные функции случайного телеграфного сигнала.

6.10. В каких случаях целесообразно использование нормированной корреляционной функции случайных процессов для их описания?

6.11. Что понимается под реализацией случайного процесса?

6.12. Определите характеристики элементарной случайной функции $Y(t) = \Psi \cos(\alpha t - \Theta)$, где Ψ и Θ – независимые случайные величины; с. в. Ψ имеет характеристики m_Ψ и δ_Ψ ; с. в. Θ распределена равномерно в интервале $(0, 2\pi)$; α – неслучайный параметр.

6.13. Каким образом возможно определение ковариационных функций с помощью ряда Маклорена?

6.14. Дайте определение случайного процесса со стационарными первыми приращениями.

6.15. Как связаны ковариационная функция со спектральной плотностью стационарного процесса?

Литература [3,6,7].

Справочные данные о диоде сигнальном типа 1N4148:

$U_{\text{обр.макс}} = 75 \text{ В}; I_{\text{обр}} = 5 \text{ мкА}; U_{\text{пр}} = 0,6 \text{ В}; I_{\text{пр}} = 10 \text{ мА}; t_{\text{восст.Робр}} = 4 \text{ нс}; C = 1,3 \text{ пФ}$

Литература

1. Б. И. Филиппов. Теория электрической связи. – Новосибирск: издательство СГУТиИ, 2011.
2. В. И. Каганов. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Форум-Инфра, 2005.
3. Р. Р. Биккенин, М.Н. Чесноков. Теория электрической связи. – М.: издательский центр «Академия», 2010.
4. А. А. Харкевич. Основы радиотехники – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007.
5. М. Т. Иванов. Теоретические основы радиотехники. – М.: Высшая школа, 2002.
6. С. И. Баскаков. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1983.
7. Ю. П. Акулиничев. Теория электрической связи. – Сн-Пб., м., Краснодар: Лань, 2010.

