

Федеральное агентство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Кафедра вычислительной техники

Методическое руководство к лабораторным работам по курсу
«ЦЕПИ И СИГНАЛЫ»

Составители:
А.С.Меркутов
А.Н.Цислав

Владимир 2011

ВВЕДЕНИЕ

Для выполнения представленных в настоящем методическом руководстве лабораторных работ предлагается использовать систему автоматизированного проектирования **Advanced Design System**, которая предназначена для моделирования аналоговых и цифровых радиоэлектронных устройств и систем широкого класса. Ниже приводится последовательность основных команд, ориентированных на сеанс работы с программным обеспечением данной САПР.

1. Запустить программу **Advanced Design System**. Сгенерируется окно главного меню.
2. Установить режим работы системы - аналоговый, если это необходимо, выполнив команду **Tools> Advanced Design System Setup>Analog RF Only**. Выйти из программы и снова ее запустить.
3. Создать новый проект - команда **File>New Project**.
4. Присвоить имя новому проекту и открыть его. К имени автоматически присоединяются символы `_prj`.
5. Открыть окно схемного редактора командой **File>New Schematic**.
6. Сформировать схемный проект.
7. Сохранить содержимое окна схемного редактора. Файл получает расширение `*.dsn` и размещается в подкаталоге `network`.
8. Результаты моделирования (графики, таблицы и т.п.) сохранить в файле с расширением `*.dds`.

Далее приводится описание лабораторных работ, ориентированных на изучение спектральных характеристик типовых радиосигналов и способов их оценки, изучение принципов работы простейших детекторов модулированных сигналов для различных видов модуляции, исследование характеристик амплитудных и частотных детекторов при вариации параметров сигналов и элементов схемы.

Лабораторная работа №1. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИОДИЧЕСКИХ И НЕПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

1. Цель работы

Формирование моделей периодических и непериодических сигналов, исследование амплитудного и фазового спектра сигналов с использованием методов решения системы дифференциальных уравнений, описывающих поведение схемы во временной области и прямого преобразования Фурье.

2. Теоретическая часть

Под сигналом $S(t)$ будем понимать изменение во времени одного из параметров физического процесса. Классификация сигналов по ряду признаков отражена на рис.1.

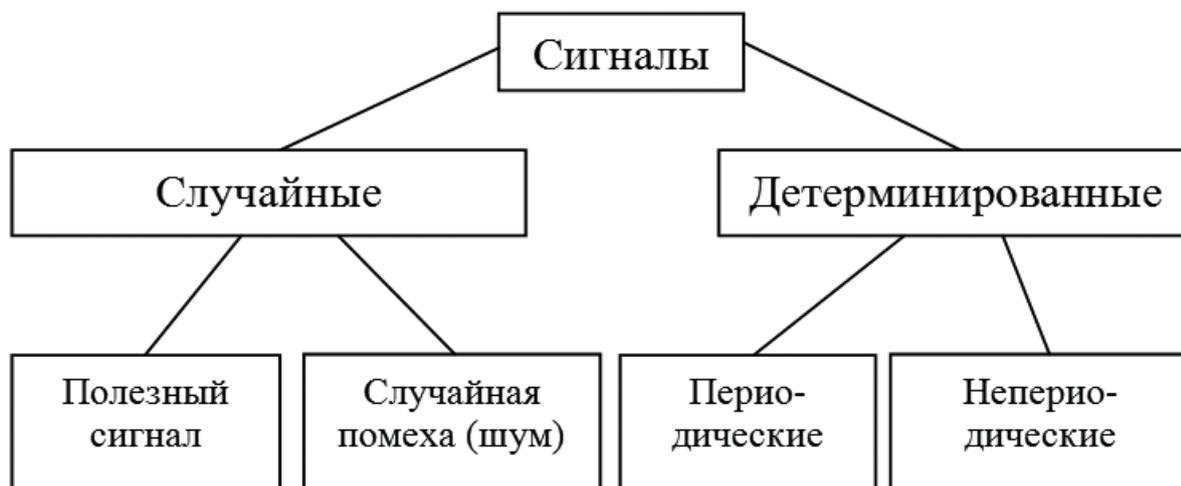


Рис.1. Классификация сигналов

Детерминированным называется сигнал, который точно определен в любой момент времени (например, задан в аналитическом виде). Детерминированные сигналы могут быть периодическими и непериодическими.

Периодическим называется сигнал, для которого выполняется условие:

$$S(t) = S(t + \kappa T),$$

где κ – любое целое число, T – период, являющийся конечным отрезком времени.

Пример периодического сигнала - гармоническое колебание:

$$S(t) = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right)$$

Любой сложный периодический сигнал может быть представлен в виде суммы гармонических колебаний с частотами, кратными основной частоте $\omega = 2\pi/T$.

Непериодический сигнал, как правило, ограничен во времени.

Случайным сигналом называют функцию времени, значения которой заранее неизвестны и могут быть предсказаны лишь с некоторой **вероятностью**. В качестве основных характеристик случайных сигналов принимают:

- а) закон распределения вероятности (относительное время пребывания величины сигнала в определенном интервале);
- б) спектральное распределение мощности сигнала.

Спектральный анализ периодических сигналов

Известно, что любую функцию $S(t)$, кусочно-непрерывную на интервале $a < t < b$ и ограниченную по норме:

$$\int_a^b |S(t)|^2 dt < \infty$$

можно разложить в ряд, называемый обобщенным рядом Фурье, по полному набору (базису) ортогональных функций $\Psi_n(t)$:

$$S(t) = C_0 \Psi_0(t) + C_1 \Psi_1(t) + \dots + C_n \Psi_n(t).$$

Функции $\Psi_k(t)$ называются ортогональными, если выполняется соотношение:

$$\int_a^b \Psi_m(t) \Psi_k^*(t) dt = 0, \text{ при } m \neq k \quad \int_a^b \Psi_k(t) \Psi_k^*(t) dt = \|\Psi_k\|^2 \text{ — норма.}$$

Для комплексных функций $\Psi_k(t)$, $\Psi_k^*(t)$ есть комплексно-сопряженная ей функция. Коэффициенты ряда определяются следующим выражением:

$$C_k = \frac{\int_a^b S(t) \Psi_k^*(t) dt}{\|\Psi_k\|^2}.$$

В радиотехнике в качестве базисных функций разложения Фурье используют преимущественно тригонометрические функции. Это объясняется следующими причинами:

а) функции $\cos \omega t$, $\sin \omega t$ являются простыми, определены при всех значениях t , являются ортогональными и составляют полный набор при кратном уменьшении периода;

б) гармоническое колебание является единственной функцией времени, сохраняющей свою форму при прохождении колебания через линейную систему с постоянными параметрами, могут изменяться лишь амплитуда и фаза;

в) для гармонических функций и их комплексного анализа имеется мощный математический аппарат, найдены спектры множества форм сигналов;

г) гармоническое колебание легко осуществить на практике.

Спектр периодического сигнала является дискретным и представляет набор гармонических колебаний, в сумме составляющих исходный сигнал. Одним из преимуществ разложения сигнала в спектр является следующее. Токи и напряжения в цепи под действием сигнала описываются дифференциальными уравнениями, соответствующими элементам цепи и способу их соединения. Линейные цепи описываются линейными дифференциальными уравнениями, причем для линейных цепей верен принцип суперпозиции, согласно которому действие на систему сложного сигнала, состоящего из суммы простых сигналов, равно сумме действий от каждого составляющего сигнала в отдельности. Это позволяет при известной реакции системы на какой-либо простой сигнал, например, на синусоидальное колебание с определенной частотой, определить реакцию системы на любой сложный сигнал, разложив его в ряд по синусоидальным колебаниям.

Спектральный анализ непериодических сигналов

Пусть задан сигнал в виде ограниченной во времени функции $S(t)$, отличной от нуля в промежутке $t_1 t_2$ как показано на рис.2.

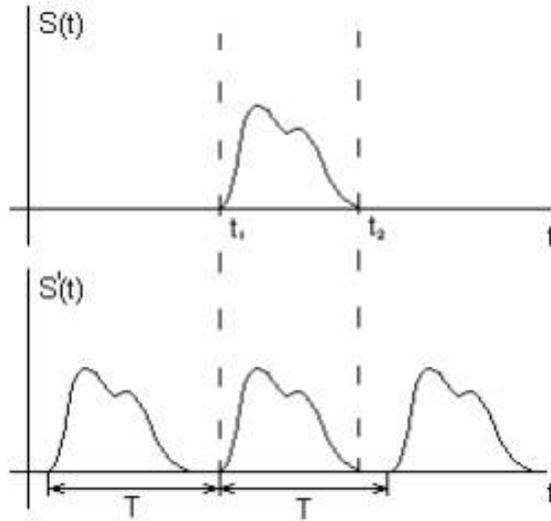


Рис.2 Пример неперидического сигнала

Выделим произвольный отрезок времени T , включающий промежуток $t_1 t_2$, далее продолжим аналитически $S(t)$ на всю бесконечную ось с периодом T . Тогда мы сможем разложить такую периодическую функцию $S'(t)$ в гармонический ряд Фурье. В комплексной форме будем иметь:

$$S'(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{A}_n e^{in\omega_1 t} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi / \omega_1} \left[\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S'(t) e^{-in\omega_1 t} dt \right] \cdot e^{in\omega_1 t}.$$

Полученный ряд на участке $[t_1, t_2]$ будет точно соответствовать нашей функции $S(t)$. Однако, если нас интересуют моменты времени за участком $[t_1, t_2]$, то необходимо увеличить период T , т. е. отодвинуть повторные значения функции $S(t)$. Производя замену переменных и переходя от суммирования к интегрированию, получим

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T} \rightarrow d\omega, n\omega_1 \rightarrow \omega;$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} \left[\int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-i\omega t} dt \right] d\omega;$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \dot{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-i\omega t} dt, \text{ где}$$

$\dot{S}(\omega)$ - спектральная плотность сигнала $S(t)$.

Спектр непериодического сигнала сплошной (непрерывный) и распространяется на отрицательные частоты.

Если $S(\omega) = A(\omega) + iB(\omega)$, то $|\dot{S}(\omega)| \equiv S(\omega) = \sqrt{A^2 + B^2}$ - модуль спектральной плотности или амплитудно-частотная характеристика:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{B(\omega)}{A(\omega)} - \text{фазово-частотная характеристика.}$$

Необходимое условие существования спектральной плотности: $\int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt < \infty$.

3. Задание

3.1. Создать рабочий проект в среде САПР ADS или открыть имеющийся.

3.2. Сформировать схемный проект, включающий последовательное соединение источника напряжения периодической последовательности импульсов во временной области (компонента **V_Pulse** из группы **Sources Time Domain**) и 50-омного резистора.

3.3. Установить имя выходного напряжения на узел соединения резистора и источника напряжения.

3.4. Определить параметры источника напряжения **V_Pulse** (рис. 3, 2) согласно заданному варианту последовательности прямоугольных импульсов:

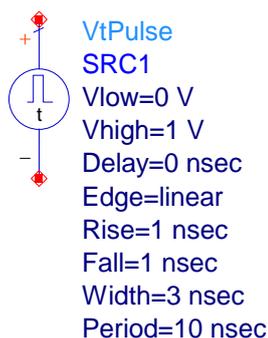


Рис. 3. Задание параметров импульсного источника напряжения

Vlow – нижний уровень импульсов;

Vhigh – верхний уровень импульсов;

Delay – время задержки ;

Edge – закон изменения переднего и заднего фронтов импульсов (**linear** – линейный);

Rise – время нарастания переднего фронта импульсов;

Fall – время спада заднего фронта импульсов;

Width – ширина вершины импульсов.

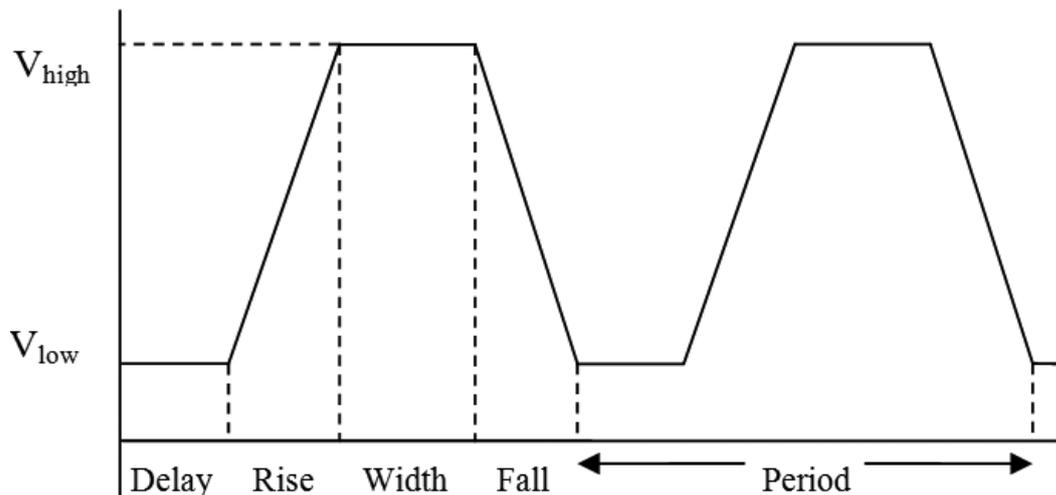


Рис. 4. Определение параметров импульсного источника

В данном случае время задержки, нарастания и спада принять равными минимальному значению шага временного анализа, деленному на 10-100 (см. ниже).

3.5. Выбрать и разместить на схеме контроллер проведения анализа во временной области (компонента **TRAN** из группы **Simulation Transient**). Определить временные параметры анализа в диалоговом окне **Time Setup** размещенного контроллера: начальное время анализа **Start time=0**, конечное время анализа **Stop Time**, которое должно быть установлено равным 100 периодам входного сигнала; минимальное значение шага анализа (**min time step**) может быть выбрано равным 1/10 ширины самого узкого участка периода входного сигнала (уменьшение этого параметра увеличивает точность анализа и его время). Минимальное значение шага анализа будет определять максимальную частоту рассчитываемого спектра.

3.6. Запустить проект на анализ командой **Simulation>Simulate**.

3.7. Вывести в окне просмотра выходных результатов временную развертку выходного напряжения и, при необходимости, локализовать ее в области наблюдаемых процессов для более удобного наблюдения.

Вывести в окне просмотра выходных результатов компоненту **Eqn** и сформировать уравнение, реализующее функцию прямого преобразования Фурье **fs(vout)**, где **vout** – имя выходного напряжения, присвоив его какому-либо идентификатору, например, **SPECTR1** (рис. 5)

$$\text{Eqn SPECTR1}=\text{fs}(\text{out})$$

Рис. 5. Определение уравнения для выполнения Фурье-анализа

Открыть окно построения графика в прямоугольной системе координат (Rectangle). В окне **Datasets and Equations** выбрать группу **Equations**, а в ней – имя сформированного уравнения (**SPECTR1**) и добавить его на график (**Add**), предварительно выбрав форму вывода амплитудного спектра – **Magnitude**. Разместить маркеры в оцениваемых частотных точках спектра. В результате сформируется изображение, приведенное на рис. 6.

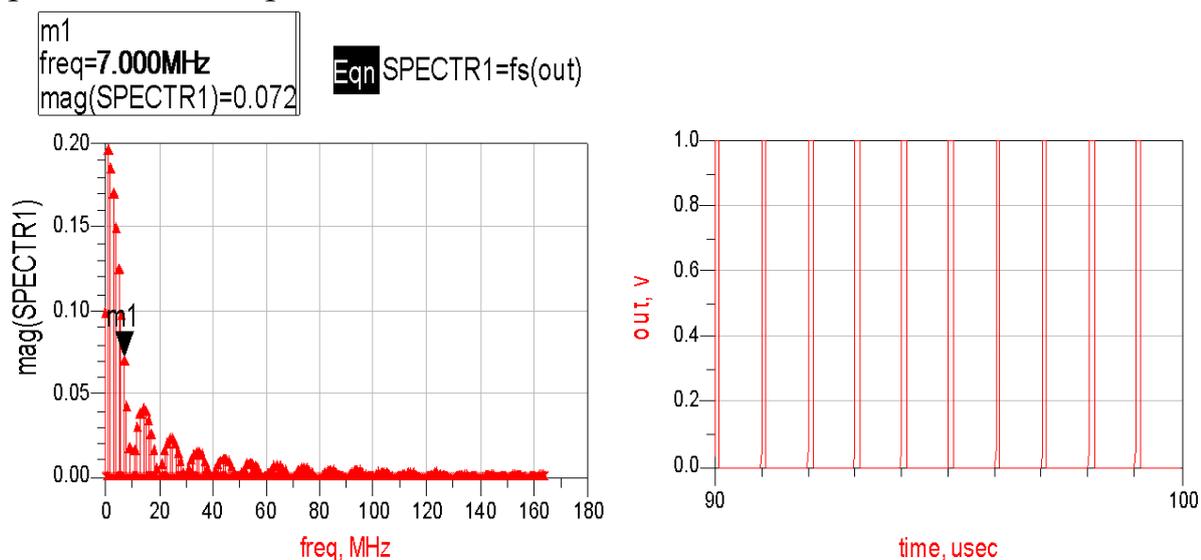


Рис. 6. Спектр периодической последовательности импульсов и временное изображение сигнала

Выполнить оценку амплитуды для произвольных двух гармоник спектра с помощью маркеров.

Увеличивая и уменьшая период следования импульсов в два раза, получить временные развертки и амплитудные спектры. Наблюдать изменения спектра.

3.8. Преобразовать источник прямоугольных импульсов в источник пилообразного сигнала. Для этого достаточно поменять местами значения длительности фронта нарастания и длительности вершины

импульса в источнике сигнала. Провести спектральный анализ при различных значениях периода. Наблюдать изменения спектра. Сравнить спектры прямоугольных и пилообразных сигналов.

3.9. Восстановить параметры исходного источника прямоугольных импульсов. Установить значение периода последовательности далеко за пределами времени проведения анализа, определенного в контроллере **TRAN**, моделируя тем самым эффект одиночного импульса.

3.10. Выполнить спектральный анализ для двух различных значений длительности импульса. Вывести амплитудные спектры и временные развертки сигнала. Наблюдать изменения спектра.

4. Содержание отчета

4.1. Цель работы, задание.

4.2. Теоретическая часть, включающая последовательность определения амплитудного спектра исходного сигнала в общем виде с количественной оценкой выбранных двух гармоник для сравнения в п. 2.10.

4.3. Схемные проекты для проведения исследований с синусоидальным и импульсным источником и результаты моделирования.

4.4. Полученные в ходе моделирования и рассчитанные графические зависимости.

4.5. Выводы по результатам проведенных исследований.

5. Контрольные вопросы и задания

5.1. Спектральный анализ периодических сигналов. Разложение в ряд Фурье.

5.2. Применение формул прямого и обратного преобразования Фурье для непериодических сигналов

5.3. Учет свойства четности и нечетности сигналов при спектральном анализе.

5.4. Свойства преобразования Фурье (сдвиг во времени сигнала, сжатие-расширение сигнала).

5.5. Свойства преобразования Фурье (дифференцирование и интегрирование колебаний).

5.6. Свойства преобразования Фурье (дифференцирование и интегрирование колебаний).

5.7. Свойства преобразования Фурье (произведение колебаний).

5.8. Свойства спектра последовательности прямоугольных импульсов.

5.9. Свойства дельта-функции.

5.10. Формирование проекта для проведения спектрального анализа предложенной схемы в среде САПР ADS.

6. Варианты параметров сигналов

Таблица 1.

Номер варианта	Верхний уровень сигнала, В	Нижний уровень сигнала, В	Длительность вершины импульса, нс	Период следования импульсов, нс
1	1	0	200	800
2	2	-2	100	800
3	1	-2	500	1500
4	4	2	100	400
5	1	-4	400	1200
6	2	1	200	1000
7	0	-2	100	1000
8	2	-4	200	1200

Лабораторная работа №2. ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛОВ С АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

1. Цель работы

Изучение и исследование временных и спектральных характеристик сигналов с амплитудной модуляцией (АМ); изучение принципов детектирования сигналов с АМ-модуляцией.

2. Теоретическая часть

Описание сигналов с амплитудной модуляцией

В общем виде сигнал с амплитудной модуляцией (рис. 7) может быть описан следующим образом:

$$a(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \theta_0),$$

где $A(t)$ – модулирующий (управляющий) сигнал,

$\cos(\omega_0 t + \theta_0)$ – несущий сигнал(колебание),

ω_0 – частота несущего колебания,

θ_0 – начальная фаза несущего колебания.

Глубина амплитудной модуляции - максимальное относительное отклонение амплитуды от среднего:

$$M = \frac{2A_{\max} - 2A_{\min}}{2A_{\max} + 2A_{\min}},$$

где A_{\max} , A_{\min} - соответственно максимальное и минимальное значения модулированного сигнала (рис. 7).

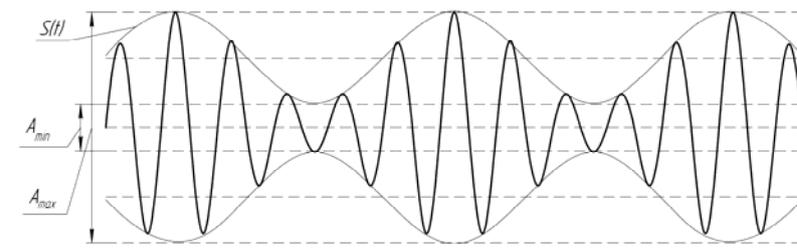


Рис.7. АМ-сигнал и оценка глубины модуляции

Определение спектра амплитудно-модулированного сигнала

Спектральную плотность АМ-сигнала, представляющего собой произведение модулирующего и несущего сигналов, можно определить на основании интеграла свертки:

$$\dot{S}_a(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_A(\omega') \cdot \Phi(\omega - \omega') d\omega',$$

где $S_A(\omega)$ - спектральная плотность функции $A(t)$;

$\Phi(\omega - \omega') = \pi[e^{i\theta_0} \delta(\omega - \omega_0 - \omega') + e^{-i\theta_0} \delta(\omega + \omega_0 - \omega')]$ - спектральная плотность несущего сигнала. Тогда:

$$\begin{aligned} \dot{S}_a(\omega) &= \frac{1}{2} e^{i\theta_0} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_A(\omega') \cdot \delta(\omega - \omega_0 - \omega') d\omega' + \\ & \frac{1}{2} e^{-i\theta_0} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_A(\omega') \cdot \delta(\omega + \omega_0 - \omega') d\omega' \\ \dot{S}_a(\omega) &= \frac{1}{2} e^{i\theta_0} \dot{S}_A(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} e^{-i\theta_0} \dot{S}_A(\omega + \omega_0) \end{aligned}$$

Таким образом, спектральная плотность модулированного сигнала представляет собой два спектра модулирующей функции, построенных относительно частот $\omega = \omega_0$ и $\omega = -\omega_0$ (сдвинутых на частоты несущей), как показано на рис. 8.

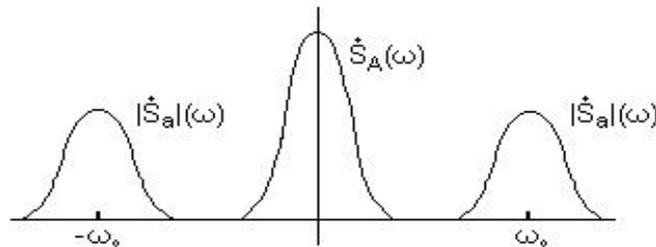


Рис.8. Спектр информационного и АМ-сигналов в общем виде

Пример определения спектра АМ-сигнала при гармоническом модулирующем сигнале

В случае гармонического модулирующего воздействия АМ-сигнал может быть описан с помощью следующего выражения:

$$a(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \theta_0) + A_0 M \cos(\Omega t + \varphi) \cos(\omega_0 t + \theta_0), \text{ где}$$

Ω - частота модулирующего колебания,

φ - начальная фаза модулирующего колебания.

Второе слагаемое может быть сведено к виду, используя тригонометрические преобразования

$$\frac{A_0 M}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi + \theta_0 + \varphi] + \frac{A_0 M}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi + \theta_0 - \varphi].$$

Это выражение

соответствует новым гармоническим колебаниям с частотами $\omega_0 + \Omega$ и $\omega_0 - \Omega$, соответствующими верхней и нижней боковым частотам модуляции. Зависимость модуля спектральной плотности от частоты приведена на рис. 9.

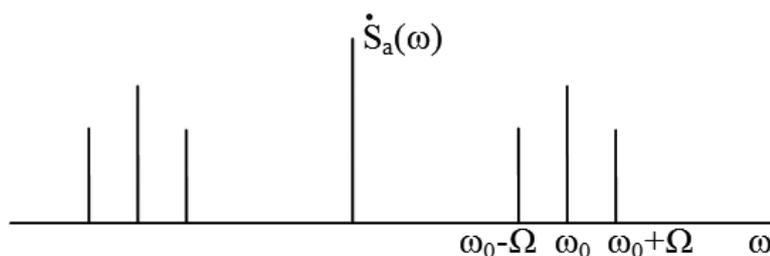


Рис. 9. Спектральная плотность AM-сигнала при однотоновой модуляции

Амплитудное детектирование

Амплитудный детектор состоит из нелинейного элемента и низкочастотного фильтра в качестве нагрузки. На вход детектора подается модулированный сигнал $e(t) = E(t) \cos \omega_0 t$. На выходе детектора генерируется сигнал $E(t)$. Различают 2 способа детектирования AM сигнала – квадратичный и линейный.

Квадратичное детектирование осуществляется при малой амплитуде сигнала, полностью укладывающемся на нижнем квадратичном участке вольтамперной характеристики нелинейного элемента, например, полупроводникового диода (рис. 10).

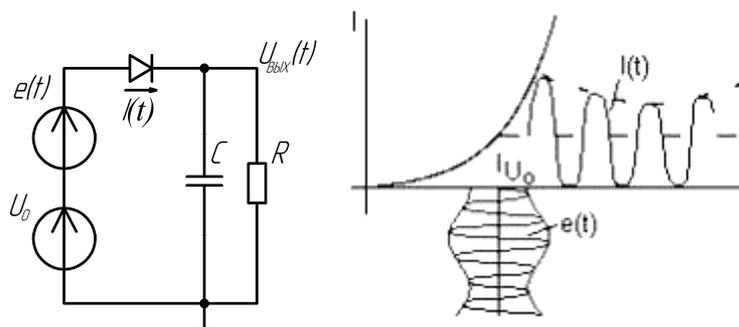


Рис.10. Пример схемы детектора AM-сигналов на биполярном транзисторе и отклик нелинейного элемента при квадратичном детектировании

В этом случае выходной ток нелинейного элемента можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
I(t) &= I(U_0) + a_1 e(t) + a_2 e^2(t). \\
I(t) &= I(U_0) + a_1 E(t) \cos \omega_0 t + a_2 E^2(t) \cos^2 \omega_0 t = \\
&= I_0 + a_1 E(t) \cos \omega_0 t + \frac{a_2}{2} E^2(t) \cos 2\omega_0 t + \frac{a_2}{2} E^2.
\end{aligned}$$

Высокочастотные составляющие ω_0 и $2\omega_0$ отфильтровываются. Информация содержится в последнем низкочастотном слагаемом.

$$I = \frac{1}{2} a_2 E^2(t) \text{ при условии } \frac{2\pi}{\Omega} \gg RC \gg \frac{2\pi}{\omega_0}.$$

Следует заметить, что если вывести напряжение смещения U_0 на линейный участок вольт-амперной характеристики, то детектирования вообще не будет. Рассмотрим случай тональной модуляции, когда АМ-сигнал представляется в виде:

$$E(t) = E_0 (1 + M \cos \Omega t).$$

В этом случае:

$$\begin{aligned}
I &= \frac{a_2}{2} E_0^2 (1 + 2M \cos \Omega t + M^2 \cos^2 \Omega t) = \\
&= \frac{a_2}{2} E_0^2 \left(1 + \frac{M^2}{2} + 2M \cos \Omega t + \frac{M^2}{2} \cos 2\Omega t \right).
\end{aligned}$$

Как видно, при квадратичном детектировании появляется паразитная двойная частота. При модуляции несколькими частотами возникают еще комбинированные частоты с амплитудами, пропорциональными произведению индексов модуляции ($M_1 M_2$). Для уменьшения амплитуд высших комбинационных гармоник, нужно уменьшать глубину модуляции M . Если требуется неискаженное воспроизведение сигналов (музыка), то квадратичное детектирование применять нецелесообразно.

Линейное детектирование осуществляется при большой амплитуде сигнала при кусочно-линейной аппроксимации детектора (рис. 11).

Когда речь идет о линейном детектировании, не следует, конечно, упускать из виду то, что детектор, работающий с отсечкой тока, является сугубо нелинейным устройством. Эта нелинейность обусловлена формой характеристики не только в области $u > 0$ (где характеристика может быть близка к линейной), а на протяжении всей области действующих на диоде напряжений. При работе с отсечкой характеристика диода представляет собой ломаную линию, состоящую из участка оси абсцисс (при $u < 0$) и наклонной линии (при $u > 0$), с изломом вблизи точки $u = 0$.

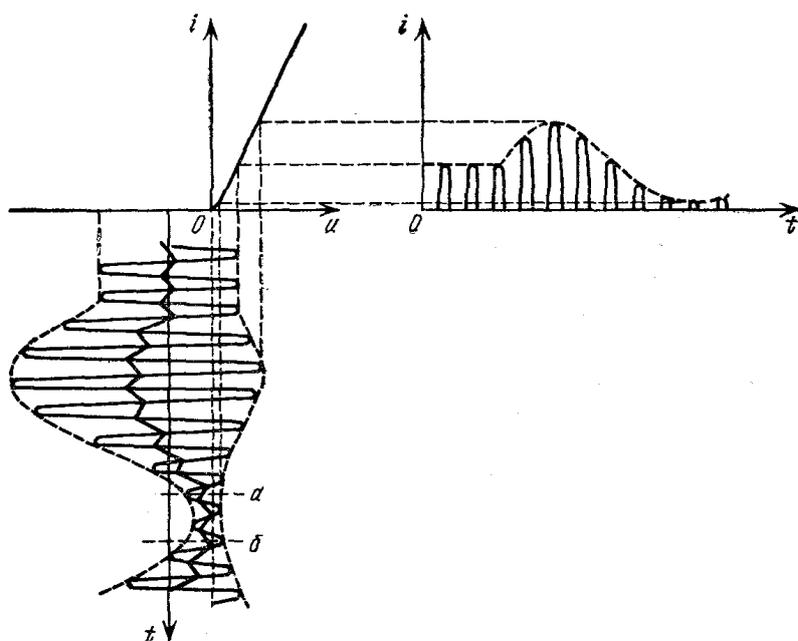


Рис.11. Отклик нелинейного элемента на АМ-сигнал при линейном детектировании

Режим модуляции накладывает на выбор элементов нагрузки детектора дополнительные ограничения. Необходимо, чтобы постоянная времени цепи нагрузки была мала по сравнению с периодом модуляции. В противном случае изменение выпрямленного напряжения на нагрузке может отставать от изменения огибающей входной э.д.с. Подобный режим представлен на рис. 12. На участке $a - б$ из-за чрезмерно большой инерционности RC-цепи напряжение $u_{\text{ВЫХ}}$ отстает в своем росте от огибающей э.д.с. В точке $б$, где $u_{\text{ВЫХ}}$ и амплитуда модулированной э.д.с. уравниваются, ток через диод и рост $u_{\text{ВЫХ}}$ прекращаются. На участке $б - в$ источник э.д.с. и диод не оказывают никакого влияния на нагрузочную цепь и в последней происходит разряд конденсатора C через резистор R . Таким образом, на участке $б - в$ напряжение является экспонентой. Получается *нелинейное искажение сигнала*. Так как эти искажения обусловлены тесным взаимодействием нелинейного элемента (диод, транзистор) с линейной цепью (RC), степень нелинейных искажений зависит не только от параметров цепи и глубины модуляции, но также и от частоты модуляции. Эти искажения возрастают с повышением частоты, а также глубины модуляции входной э. д. с.. Для устранения рассматриваемых искажений необходимо, чтобы выполнялось неравенство $R \cdot C \ll 2\pi/\Omega$. С другой стороны, для сглаживания высокочастотных пульсаций требуется выполнение неравенства $R \cdot C \gg 2\pi/\omega_0$. Совмещая эти два условия, получаем

неравенство, определяющее условие неискаженной передачи информационного сигнала:

$$2\pi/\omega_0 \ll R \cdot C \ll 2\pi/\Omega.$$

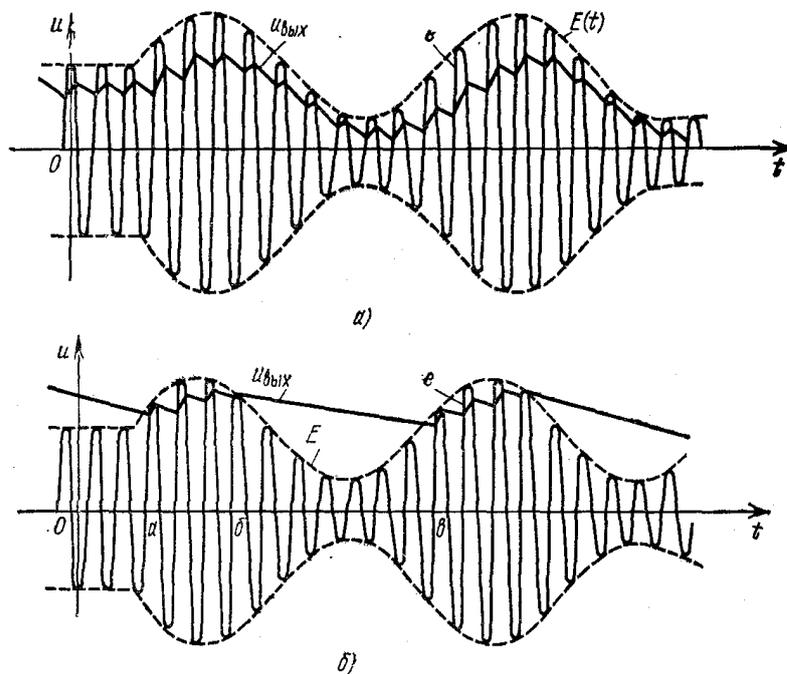


Рис. 12. Случай правильного (а) и неправильного (б) выбора параметров RC-нагрузки АМ-детектора

Обычно частоты ω_0 и Ω сильно различаются ($\Omega \ll \omega_0$) и выполнение условия не встречает затруднений.

При импульсной модуляции огибающей в правой части неравенства вместо периода модуляции $2\pi/\Omega$ следует подставлять длительность импульса. При этом предполагается, что интервалы между импульсами велики по сравнению с длительностью импульса. При очень коротких импульсах, длительность которых всего лишь в несколько раз превышает период $T_0 = 2\pi/\omega_0$ («высокочастотный голод») возникают трудности с разделением огибающей и высокочастотного заполнения.

3. Задание

3.1. Создать проект САПР ADS в рабочем каталоге. Установить аналоговый режим работы системы (команда главного меню *Tools>ADS Setup>Analog RF only*).

3.2. Подготовить схемный проект для проведения анализа источника АМ-сигнала во временной области при синусоидальном модулирующем сигнале. Установить индекс модуляции $m=0,5$. Выполнить анализ на интервале 5 – 10 периодов модулирующего сигнала.

3.3. Вывести временную развертку АМ-сигнала на выходе модулятора и с помощью маркеров и уравнения определить экспериментально значение глубины модуляции.

3.4. Выполнить спектральный анализ выходного сигнала. Вывести амплитудный и фазовый спектр АМ-сигнала, локализованный в окрестности несущей частоты. С помощью маркеров определить амплитуды и фазы всех спектральных составляющих.

3.5. Повторить анализ п. 3.3 для значений индекса модуляции 0,9 и 0,2.

3.6. Включить на модулирующий вход источник импульсного сигнала типа меандр и определить временную развертку и спектр АМ-сигнала при $m=0,5$. Частота следования прямоугольных импульсов должна соответствовать частоте синусоидального источника. Выполнить анализ и определить временную развертку и спектр АМ-сигнала. Уменьшить ширину импульса в 10 раз и повторить анализ.

3.7. Сравнить спектры сигналов (ширина, форма, амплитуда) в первом и во втором случаях.

3.8. Сформировать схемный проект модели детектора АМ-сигналов, включив в нее амперметр последовательно с диодом. Установить параметры выходного RC-фильтра. Выполнить анализ.

3.9. Вывести на экран временные развертки выходного сигнала, тока через диод. Выполнить спектральный анализ выходного сигнала и определить коэффициент нелинейных искажений по формуле:

$$K_{\text{нл}} = \sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots) / (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots)}, \text{ где}$$

V_i - гармоники амплитудного спектра выходного сигнала.

3.10. Увеличивать и уменьшать в 50 раз емкость или сопротивление выходного фильтра и определять временную развертку выходного сигнала и коэффициент нелинейных искажений. Объяснить возможные причины изменения качества протектированного сигнала.

3.11. Путем многовариантного анализа определить наиболее оптимальное значение параметров RC-цепи (менять R или C), при котором

будет зафиксировано минимальное значение коэффициента нелинейных искажений. Расчеты провести для 6-ти точек изменения и фиксировать только значение K_r .

3.12. Включить импульсный источник сигнала типа меандр с частотой, соответствующей частоте синусоидального источника и определить временную развертку сигнала на выходе детектора при индексе модуляции 0,5 и 1 .

3.13. Включить на выходе детектора последовательно-параллельную RC -цепочку с параметрами $C=100$ нФ, $R=50$ кОм. Определить временную развертку напряжения на сопротивлении $R=50$ кОм и убедиться в отсутствии постоянной составляющей. При необходимости для достижения установившегося режима увеличьте интервал анализа в контроллере TRAN.

4. Пример выполнения задания

4.1 Формирование проекта для проведения исследований АМ-сигнала во временной области при гармоническом модулирующем сигнале

На рис.13 приведена схема проекта для проведения анализа.

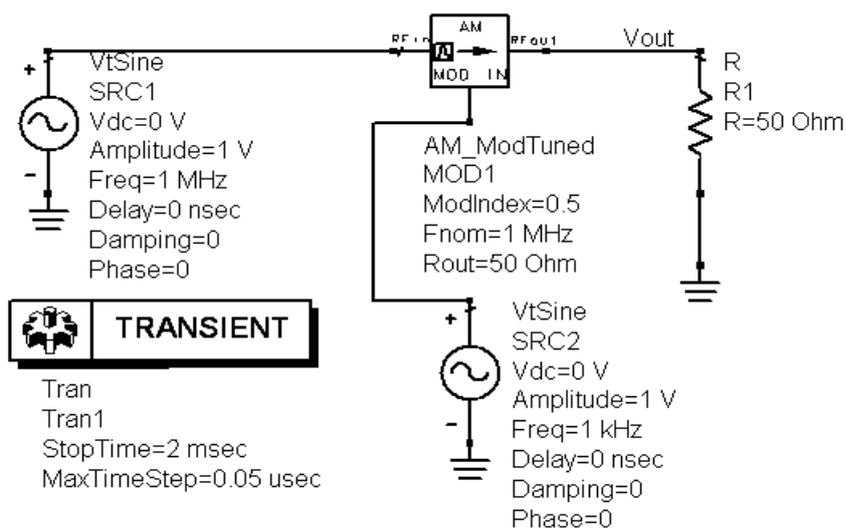


Рис. 13. Схемный проект для проведения исследований источника АМ-сигнала при гармоническом модулирующем сигнале

В состав проекта включены следующие основные компоненты:

MOD1 – модулятор, генерирующий АМ-сигнал. Компонента **AM_ModTuned** находится в группе **System – Mod/Demod**. Параметры компонента: **ModIndex** – индекс модуляции, **Fnom** – частота несущего сигнала, **Rout** – выходное сопротивление. Ко входу *RF in* подключается гармонический источник несущего сигнала, ко входу *MOD IN* – источник модулирующего сигнала. Модулированный сигнал генерируется на выходе *RF out*. В данном случае нагрузкой является сопротивление 50 Ом, а для съема информации используется выходное напряжение с установленным именем **Vout**.

SRC1 – источник синусоидального несущего сигнала. Компонента **VtSine** находится в группе **Sources_Time_Domain**. Параметры компонента: **Amplitude** – амплитуда сигнала (принять 1 В), **Freq** – частота сигнала.

SRC2 – источник модулирующего синусоидального сигнала. Установить для проведения исследований амплитуду 1 В. В данном примере установлено значение частоты модуляции 1 кГц.

В контроллере **Tran** определить конечное время анализа (несколько периодов модулирующего сигнала) и максимальный шаг, размер которого определить значением не более 1/20 периода несущего сигнала.

Выполнить моделирование.

4.2 Определение временных и спектральных характеристик АМ-сигнала

Активизировать окно просмотра выходных результатов (напряжение **Vout**). Вывести временную зависимость выходного сигнала модулятора. На развертке установить маркеры в локальных максимумах и минимумах огибающей, как показано на рис. 14.

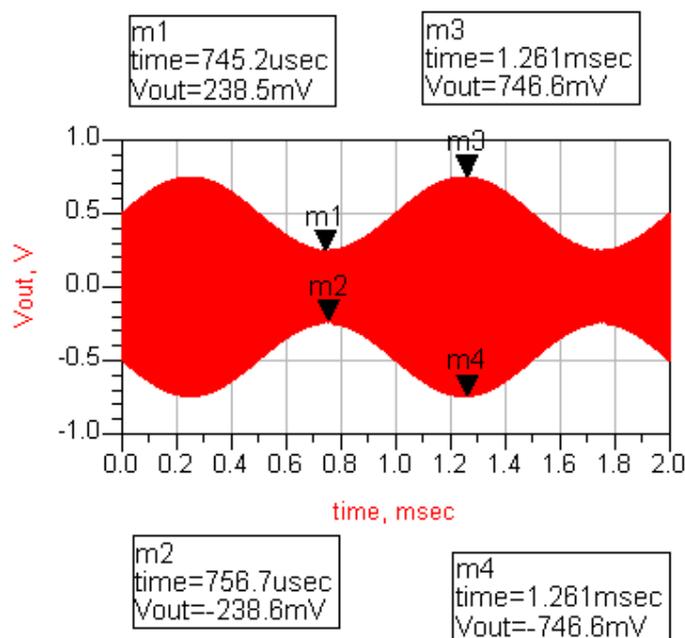


Рис. 14. Временная развертка АМ-сигнала.

С помощью компонента **Eqn** сформировать уравнение для определения глубины модуляции (рис. 15). После этого, используя табличную форму визуализации данных (тип List), вывести рассчитанное значение, которое находится в блоке выходных данных (см. окно приложения *List) Datasets and Equations>Equations>M*.

Eqn $M = \frac{(m3 - m4) - (m1 - m2)}{(m3 - m4) + (m1 - m2)}$

time	M
<invalid>...	0.516

Рис. 15. Определение глубины модуляции

Сформировать уравнение для спектрального анализа с помощью разложения выходного отклика в ряд Фурье с применением функции **fs()** (рис. 16).

Eqn $SPECTR = fs(Vout, \dots, 1e-3, 2e-3)$

Рис. 16. Уравнение для спектрального анализа напряжения **Vout**

В данном уравнении рекомендуется для более удобного вывода спектра установить интервал Фурье-анализа (начальное и конечное время), соответствующий периоду АМ - сигнала (1 и 2 мС соответ-

ственно) на последнем интервале проведенного временного анализа, что позволит миновать возможные переходные процессы. Если переходных процессов не удастся избежать, необходимо увеличить время анализа и повторить моделирование. Если точное значение периода установить сложно, то нужно использовать функцию **fs()** только с параметром **Vout**. Если заданное значение максимального шага анализ не соответствует временным изменениям сигнала то программа выбирает его значение в автоматическом режиме. Выбранный шаг генерируется в окне статуса после запуска проекта на моделирование и будет приниматься во внимание.

Вывести амплитудный и фазовый спектры напряжения **Vout** (опции *Magnitude* и *Phase*), затем локализовать их в окрестности несущей частоты и установить маркеры на реальных спектральных составляющих, как показано на рис. 17 - 18.

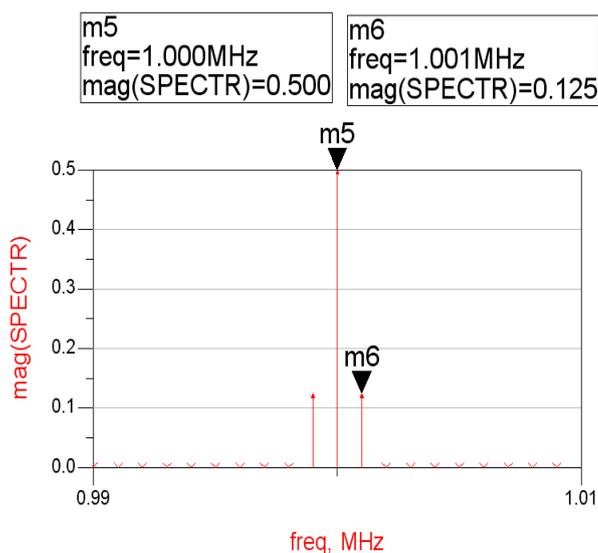


Рис.17. Амплитудный спектр АМ-сигнала.

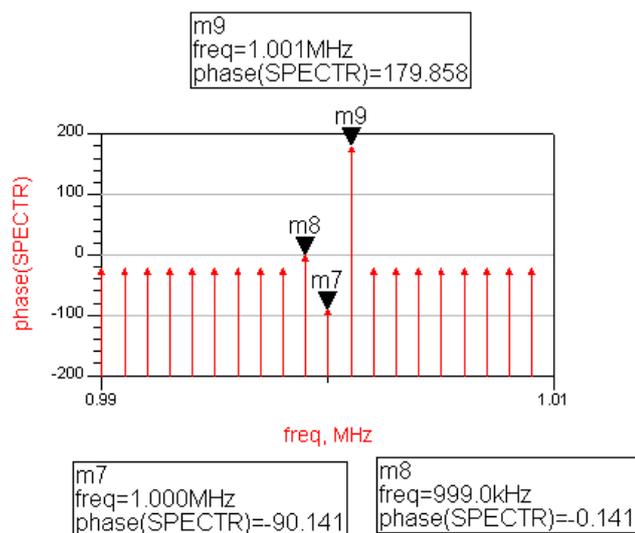


Рис. 18. Фазовый спектр АМ-сигнала

4.3 Формирование проекта для проведения исследований АМ-сигнала во временной области при импульсном модулирующем сигнале

Схема проекта приведена на рис. 19.

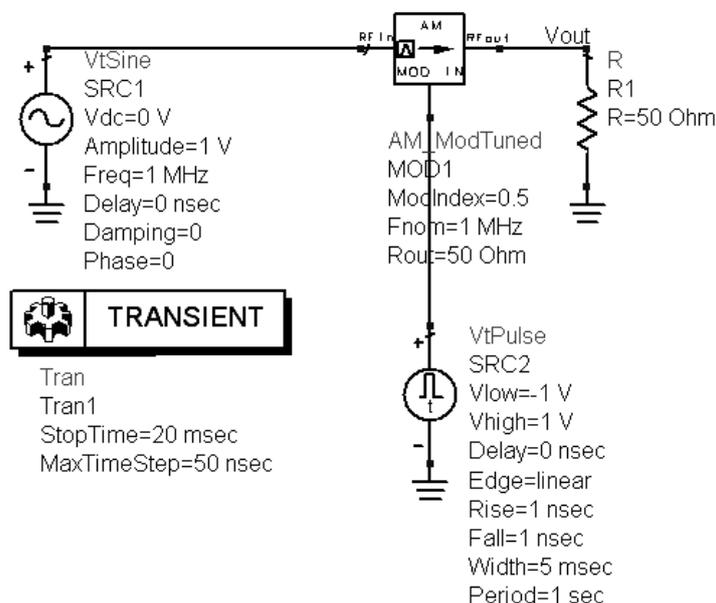


Рис. 19. Схемный проект с импульсным модулирующим сигналом

На рис. 20 приведены временная развертка сигнала, уравнение для Фурье-анализа и амплитудный спектр в *dB*. Маркеры определяют приблизительно ширину спектра. В данном случае базовая (минимальная) частота в преобразовании Фурье определяется интервалом анализа,

установленным в контроллере **Tran** по формуле $F_o=1/(StopTime)$. Максимальная частота определяется интервалом анализа по формуле:

$$F_{\text{макс}}=1/(2*\text{MaxTimeStep}).$$

Если заданное значение максимального шага анализа не соответствует временным изменениям сигнала, то программа выбирает его значение в автоматическом режиме. Выбранный шаг генерируется в окне статуса после запуска проекта на моделирование и будет приниматься во внимание при определении значения $F_{\text{макс}}$.

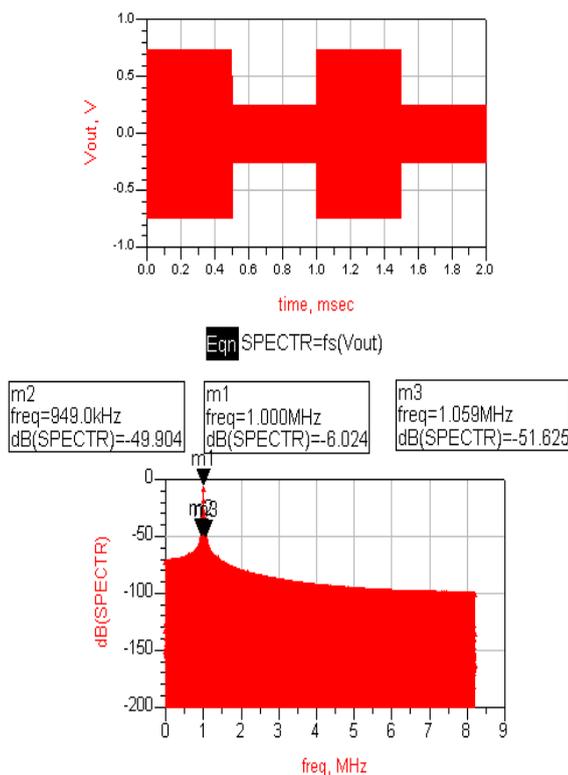


Рис. 20. Временная и спектральная характеристики АМ-сигнала при модуляции последовательностью импульсов

После вывода спектра можно локализовать его в окрестности несущей частоты, как описано в п. 3.2.

4.4 Формирование проекта для проведения исследований АМ-сигнала во временной области при импульсном модулирующем сигнале. Оценка основных характеристик

Схема проекта приведена на рис. 21.

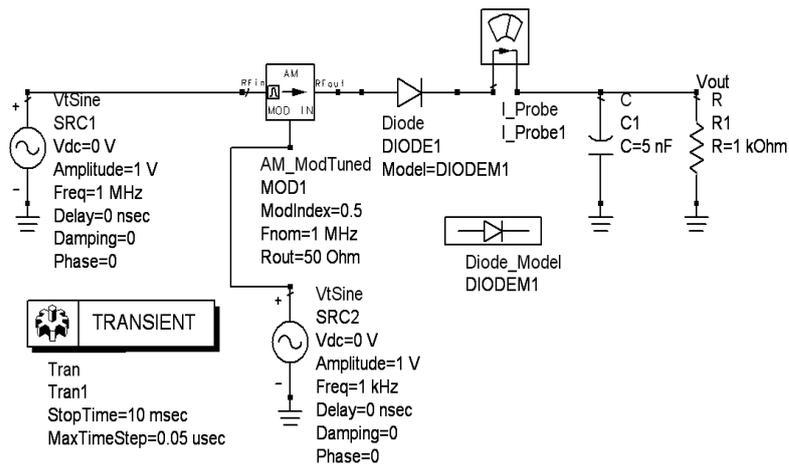


Рис. 21. Схемный проект детектора АМ-сигналов

В этом проекте необходимо разместить компоненты диода и его модели (**Diode** и **Diode_Model**), которые находятся в группе **Devices_Diodes**, и амперметра **I_Probe** из группы **Probe Components**.

На рис. 22 - 23 приведены временные развертки тока через диод в различных масштабах времени. На рис. 24 показана временная зависимость напряжения на выходе детектора.

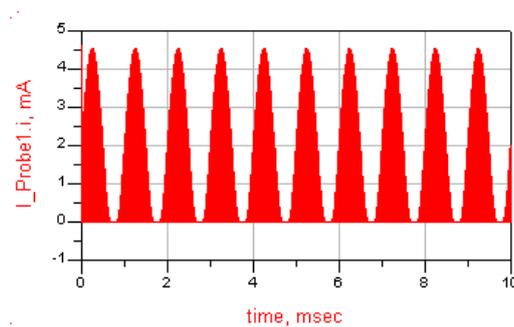


Рис. 22. Временная зависимость тока через диод на всем анализируемом интервале времени

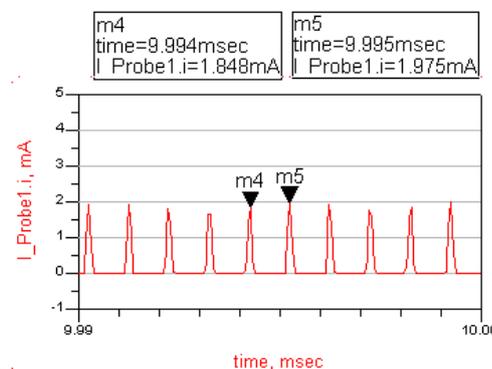


Рис. 23. Временная зависимость тока через диод в узком интервале времени

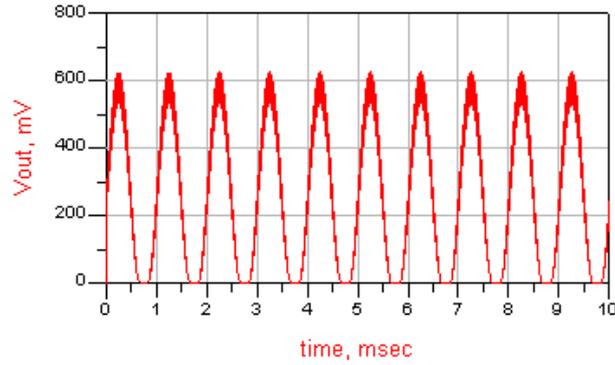


Рис. 24 Временная развертка напряжения на выходе детектора

Уравнение для проведения Фурье-анализа и амплитудный спектр приведены на рис. 25. Маркеры установлены на первых трех гармониках спектра.

$$\text{Eqn SPECTR}=\text{fs}(\text{Vout},\dots,9\text{e-}3,10\text{e-}3)$$

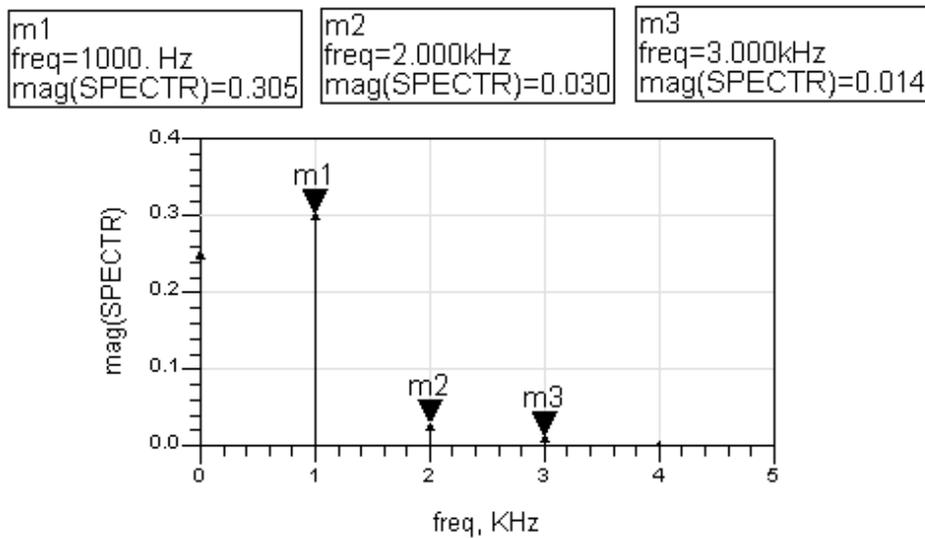


Рис. 25. Определение амплитудного спектра выходного напряжения

На рис. 26 приведено уравнение и результаты расчета коэффициента нелинейных искажений по установленным на рис. 20 маркерам.

$$\text{Eqn KG}=\text{sqrt}((\text{m2}^{**2}+\text{m3}^{**2})/(\text{m1}^{**2}+\text{m2}^{**2}+\text{m3}^{**2}))$$

freq	KG
<invalid>...	0.109

Рис. 26. Определение коэффициента нелинейных искажений

5. Содержание отчета

5.1. Цель работы, задание.

5.2. Теоретическая часть, включающая описание основных характеристик АМ - сигналов и принципов работы простейшего детектора АМ-сигналов.

5.3. Схемные проекты для проведения исследований.

5.4. Полученные в ходе моделирования и рассчитанные графические зависимости.

5.5. Выводы по каждому пункту проведенных исследований.

6. Контрольные вопросы

6.1. Выполните математическое описание АМ-сигнала. Дайте определение индексу модуляции и способам его определения. Какие факторы влияют на выбор несущей частоты?

6.2. Определите спектр АМ-сигнала для произвольного сигнала.

6.3. Определите спектр АМ-сигнала при однотоновой модуляции.

6.4. Каково должно быть соотношение частот несущего и модулирующего сигналов?

6.5. Принцип работы детектора АМ-сигнала.

6.6. Объясните назначение RC-цепи на выходе детектора и принципы выбора ее параметров.

6.7. К каким последствиям может привести увеличение частоты модуляции или уменьшение несущей частоты.

6.8. Почему на выходе детектора присутствует постоянная составляющая напряжения и как от нее избавиться.

7. Варианты параметров сигналов и элементов схемы

Таблица 2

Номер варианта	Частота несущей, МГц	Частота модуляции, кГц	Значение резистора, кОм	Значение емкости, нФ
1	1	2	2	1
2	2	10	1	1
3	0,5	0,5	1	2
4	4	20	2	0,5
5	1	10	4	1
6	2	1	2	2
7	0,5	1	2	4
8	2	5	2	1

Лабораторная работа №3. ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛОВ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

1. Цель работы

Изучение и исследование временных и спектральных характеристик сигналов с частотной модуляцией (ЧМ); изучение принципов детектирования ЧМ-сигналов.

2. Теоретическая часть

Частотно модулированное колебание можно записать в следующем виде:

$$a(t) = A_0 \cos \left[\int_0^t \omega(t) dt + \theta_0 \right], \quad \omega(t) = \omega_0 + ks(t), \text{ где}$$

A_0 – амплитуда модулированного колебания,

ω_0 – несущая частота,

$s(t)$ – модулирующее колебание,

k – коэффициент,

θ_0 – начальная фаза.

Девияция частоты – максимальное отклонение частоты от частоты несущего колебания, т.е. $\omega_d = \omega_{\max} - \omega_0$. Будем считать, что модулирующий сигнал является гармонической функцией тогда:

$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_d \cos(\Omega t),$$

где Ω – частота модулирующего сигнала.

В этом случае ЧМ – сигнал можно записать в следующем виде:

$$a(t) = A_0 \cos \left[\int_0^t (\omega_0 + \omega_d \cos(\Omega t)) dt + \Theta_0 \right] = A_0 \cos(\omega_0 t +$$

$$\frac{\omega_d}{\Omega} \sin(\Omega t) + \Theta_0) = A_0 \cos(\omega_0 t + m \sin(\Omega t) + \Theta_0),$$

где $m = \omega_d / \Omega$ – индекс модуляции.

Таким образом, индекс модуляции ЧМ - сигнала представляет собой максимальное отклонение фазы.

Для неискаженной передачи сообщения необходимо, чтобы ширина спектра сообщения была мала по сравнению с несущей ω_0 , а для этого необходимо, чтобы относительное изменение модулирующей функцией $\omega(t)$ было мало за один период несущего колебания T :

$$\frac{d\omega(t)}{dt} \ll \frac{\omega(t)}{T}.$$

Спектр ЧМ – сигнала

Рассмотренный выше ЧМ сигнал можно считать частным случаем сигнала с угловой модуляцией.

$$a(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \theta(t)),$$

Преобразуем косинус суммы:

$$a(t) = A_0 \cos \theta(t) \cos \omega_0 t - A_0 \sin \theta(t) \sin \omega_0 t.$$

$A_0 \cos \theta(t)$, $A_0 \sin \theta(t)$ - медленно изменяющиеся амплитуды.

Итак, ЧМ – сигнал можно рассматривать как сумму двух амплитудно-модулированных колебаний (квадрупольных). Для определения спектра каждого из них достаточно сдвинуть на ω_0 спектр огибающих амплитуд, т.к. $\cos \theta(t)$ и $\sin \theta(t)$ являются нелинейными функциями своего аргумента $\theta(t)$, то спектры этих функций могут существенно отличаться от спектра модулирующей функции $S(t)$ и при однотоновой модуляции возможно возникновение кратных и комбинированных частот. Однако при малых индексах модуляции ($m \ll 1$) можно положить $\theta(t) = \cos \Omega t$, $\sin \theta(t) \approx \theta(t) = m \cos \Omega t$, тогда

$$a(t) = A_0 \cos \omega_0 t - A_0 m \cos \Omega t \sin \omega_0 t = A_0 \cos \omega_0 t - \frac{A_m}{2} \sin(\omega_0 + \Omega)t - \frac{A_m}{2} \sin(\omega_0 - \Omega)t,$$

т.е. спектр, как и в случае с амплитудной модуляцией, состоит из несущей и двух боковых частей (но сдвинутых по фазе), а ширина спектра приближенно равна 2Ω .

Но при больших индексах модуляции ($m \gg 1$) за счет появления новых гармоник спектр расширяется и ширина спектра равна $2m\Omega = 2\omega_d$.

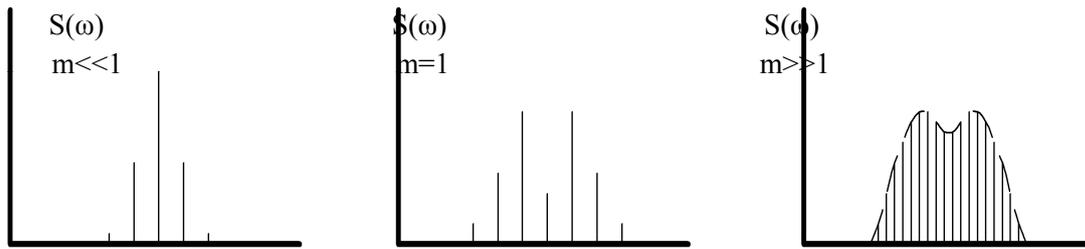


Рис. 27. Модуль спектральной плотности ЧМ-сигнала при различных значениях индекса модуляции

Частотное и фазовое детектирование

Напряжение на выходе частотного детектора должно воспроизводить закон изменения *мгновенной частоты* модулированного колебания. Представив последнее в форме

$$e(t) = E_0 \cos[\omega_0 t + \theta(t)],$$

получим ДЛЯ идеального частотного детектора следующую функциональную связь:

$$u_{\text{вых}}(t) = S_{\text{чд}} \frac{d\theta}{dt} = S_{\text{чд}} \Delta\omega(t),$$

где $S_{\text{чд}} = \text{const}$ — крутизна характеристики детектора, выраженная в вольтах на единицу угловой частоты;

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} - \text{мгновенное значение частотного отклонения входной}$$

э. д. с. Если пользоваться частотами $f = \omega / 2\pi$, то в выражении

$$u_{\text{вых}}(t) = S_{\text{чд}} \Delta f(t)$$

крутизна характеристики $S_{\text{чд}}$ будет иметь размерность В/Гц.

Предполагается, что $\Delta f(t)$, а следовательно, и $u_{\text{вых}}(t)$ являются «медленными» функциями времени. Для выделения сообщения из частотно-модулированного колебания, спектр которого состоит только из высокочастотных составляющих (несущая частота и боковые частоты модуляции), необходимо *нелинейное устройство*. Следовательно, частотный детектор обязательно должен включать в себя нелинейный элемент. Однако в этом случае в отличие от амплитудного детектора для образования частот сообщения одного лишь нелинейного элемента недостаточно. Действительно, из вольт-амперных характеристик нелинейных эле-

ментов видно, что при постоянстве амплитуды входного напряжения нелинейный элемент не реагирует на изменение частоты этого напряжения. Иными словами, нелинейность таких устройств, как диод, проявляется лишь при изменении величины действующего на них напряжения, а не при изменении частоты или в общем случае скорости изменения сигнала. Поэтому обычный частотный детектор представляет собой сочетание двух основных частей: 1) избирательной линейной цепи, преобразующей частотную модуляцию в амплитудную и 2) амплитудного детектора.

При правильном построении схемы частотного детектора изменение амплитуды входного сигнала не должно влиять на величину выходного напряжения. Поэтому в схему частотного детектора обычно входит устройство для ограничения амплитуды входной э. д. с. Иногда ограничение осуществляется уста-

новлением специального режима работы усилительного прибора, входящего в состав частотного детектора.

В качестве линейной цепи можно использовать любую электрическую цепь, обладающую неравномерной частотной характеристикой: цепи RL , RC , фильтры, колебательные контуры и т. д. В высокочастотной технике большое распространение получили колебательные цепи. Схема частотного детектора, содержащего простой колебательный контур, представлена на рис. 28. В данной схеме транзистор предотвращает шунтирование входным источником напряжения $e(t)$ колебательного контура. В идеальном случае на модельных задачах можно использовать источник тока в качестве модулирующего воздействия, упрощая схему детектора. Если резонансная частота контура ω_p отличается от средней частоты модулированного колебания ω_0 , то изменение амплитуды напряжения на контуре U_k повторяет в известных пределах изменение частоты входного напряжения, как показано на рис. 29.

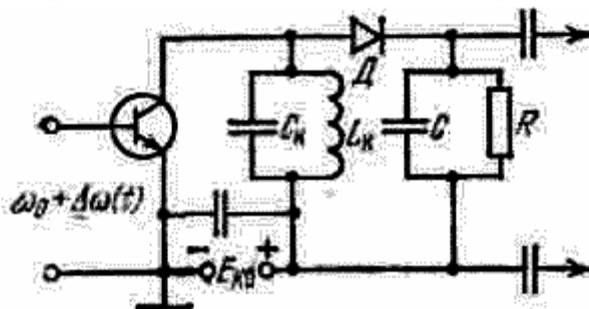


Рис. 28. Схема частотного детектора

Изменение амплитуды U_k , высокочастотного напряжения на контуре с помощью диода D преобразуется в низкочастотное напряжение, которое выделяется на нагрузке R, C (рис. 29). Отметим попутно, что при точной настройке контура на частоту $\omega_p = \omega_0$ сигнал искажается; частота изменения огибающей получается вдвое выше частоты полезной модуляции. В исходном режиме, т. е. при отсутствии модуляции, рабочая точка должна устанавливаться на скате резонансной кривой.

Недостатком рассмотренной схемы является необходимость настройки контура на частоту, отличную от частоты немодулированного колебания. Кроме того, одиночный колебательный контур имеет весьма ограниченный линейный участок на скате резонансной кривой. Поэтому на практике, как правило, применяют более сложные схемы детектирования.

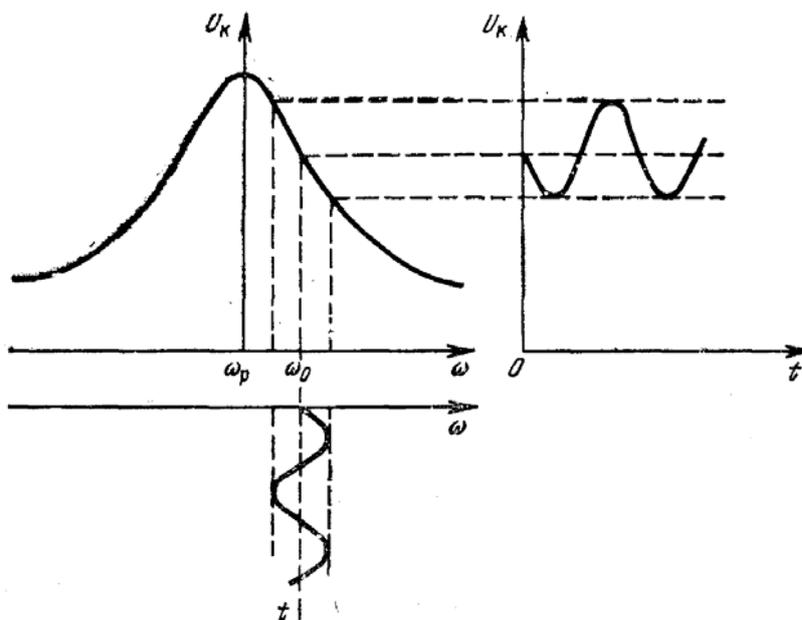


Рис. 29. Принципы преобразования ЧМ-сигнала в АМ-сигнал

3. Задание

3.1. Создать проект САПР ADS в рабочем каталоге. Установить аналоговый режим работы системы (команда главного меню Tools>ADS Setup>Analog RF only).

3.2. Подготовить схемный проект для проведения анализа источника ЧМ-сигнала во временной области при синусоидальном модулирующем сигнале заданной частоты. Установить индекс модуляции $m=$

10. Выполнить анализ на интервале 5 – 10 периодов модулирующего сигнала. Вывести временную развертку ЧМ-сигнала на выходе модулятора и с помощью маркеров наблюдать изменение частоты (периода) сигнала на некотором интервале анализа.

3.4. Выполнить спектральный анализ выходного сигнала. Вывести амплитудный спектр ЧМ-сигнала, локализованный в окрестности несущей частоты. С помощью маркеров определить ориентировочно полосу модулированного сигнала по максимальным значениям амплитудного спектра.

3.5. Повторить анализ п. 2.2 , 2.4 для значений индекса модуляции, равных 20, 1, 0,1, 0,01. Наблюдать за изменением полосы сигнала и его мощности (лучше всего – в dB).

3.6. Сформировать схемный проект модели детектора ЧМ – сигналов для проведения частотного анализа. Установить параметры выходного RC-фильтра. Установить исходные параметры колебательного контура, указанные в примере, и источник переменного тока на входе детектора. С помощью многовариантного частотного анализа определить такие параметры (L, C) колебательного контура, при которых частота несущего сигнала будет находиться приблизительно посередине резонансной характеристики напряжения на контуре. Полученные значения использовать в дальнейших исследованиях.

3.7. Подготовить проект для анализа ЧМ-детектора в режиме прохождения модулированных сигналов методами анализа во временной области. Установить значение индекса модуляции, равное 10.

3.8. Вывести на экран временные развертки выходного сигнала. Выполнить спектральный анализ выходного сигнала и определить коэффициент нелинейных искажений по формуле $K_{НИ} = \sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots) / (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots)}$, где V_i - гармоники амплитудного спектра выходного сигнала.

3.9. Повторить анализ п.2.7-2.8 при индексах модуляции, равных 20, 1, 0,1, 0,01. Построить графики зависимости коэффициента нелинейных искажений и амплитуды выходного сигнала от индекса модуляции.

3.10. Повторить анализ п.2.7-2.8 при значениях частоты несущего сигнала, смещенной на 20% выше и ниже заданного значения при $m=10$.

3.11. Меняя частоту модулирующего сигнала от 1 до 20 кГц и определяя амплитуду первой гармоники выходного сигнала рассчитать амплитудно-частотную характеристику ЧМ-детектора. Принять $m=10$.

4. Пример выполнения задания

4.1 Формирование проекта для проведения исследований ЧМ-сигнала во временной области при гармоническом модулирующем сигнале

На рис. 30 приведена схема проекта для проведения анализа.

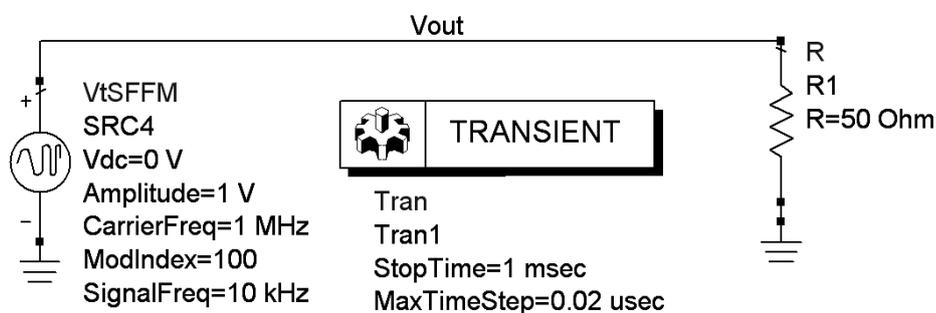


Рис. 30. Схемный проект для проведения исследований источника ЧМ-напряжения при гармоническом модулирующем сигнале.

В состав проекта включены следующие основные компоненты:

VtSFFM – источник напряжения, генерирующий ЧМ-сигнал. Компонента находится в группе **Sources_Time_Domain**. Параметры компонента: **ModIndex** – индекс модуляции, **CarrierFreq** – частота несущего сигнала, **Amplitude** – амплитуда несущего сигнала, **Signal_Freq** – частота модулирующего сигнала.. В данном случае нагрузкой является сопротивление 50 Ом, а для съема информации используется выходное напряжение с установленным именем **Vout**.

В контроллере **Tran** определить конечное время анализа (несколько периодов модулирующего сигнала) и максимальный шаг, размер которого определить значением не более $1/20$ периода несущего сигнала.

Выполнить моделирование.

4.2 Определение временных и спектральных характеристик ЧМ-сигнала

Активизировать окно просмотра выходных результатов (напряжение V_{out}).

Вывести временную зависимость выходного сигнала модулятора (рис. 31). На развертке установить маркеры в локальных максимумах огибающей и оценить изменение частоты несущей.

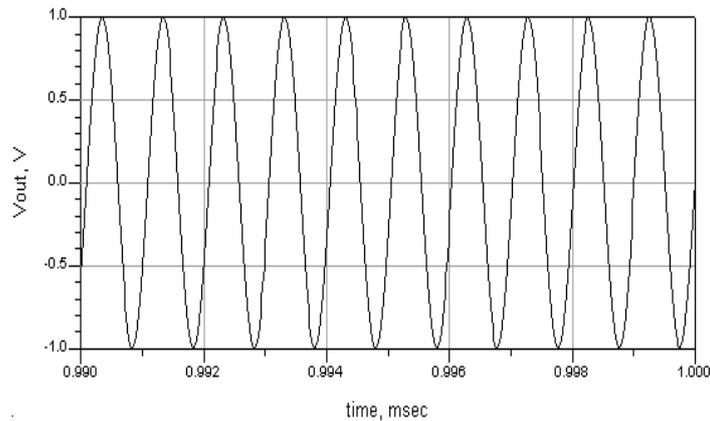


Рис. 31. Временная развертка ЧМ-сигнала

Сформировать уравнение для спектрального анализа с помощью разложения выходного отклика в ряд Фурье с применением функции $fs()$ (рис. 32) и определить амплитудный спектр и полосу частот, занимаемую ЧМ-сигналом.

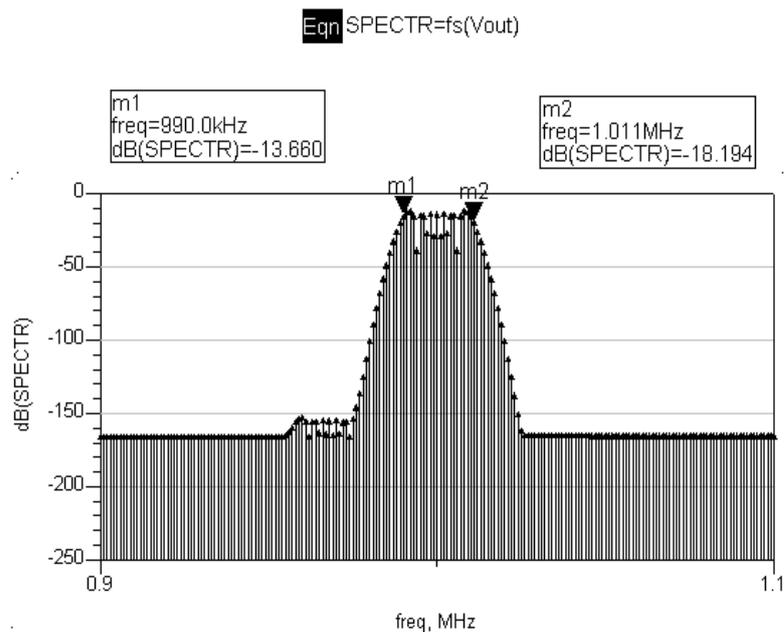


Рис. 32. Амплитудный спектр ЧМ-сигнала

Если заданное значение максимального шага анализа не соответствует временным изменениям сигнала то программа выбирает его значение в автоматическом режиме. Выбранный шаг генерируется в окне статуса после запуска проекта на моделирование и будет приниматься во внимание при расчете спектра.

4.3 Формирование проекта для определения параметров колебательного контура ЧМ-детектора методами частотного анализа. Результаты расчета амплитудно-частотных характеристик напряжения на контуре

Схема проекта приведена на рис. 33. В этом проекте необходимо разместить компоненты диода и его модели (**Diode** и **Diode_Model**), которые находятся в группе **Devices_Diodes**. Определить имя напряжения на контуре **Vout_contur** и напряжение на выходе детектора **Vout**.

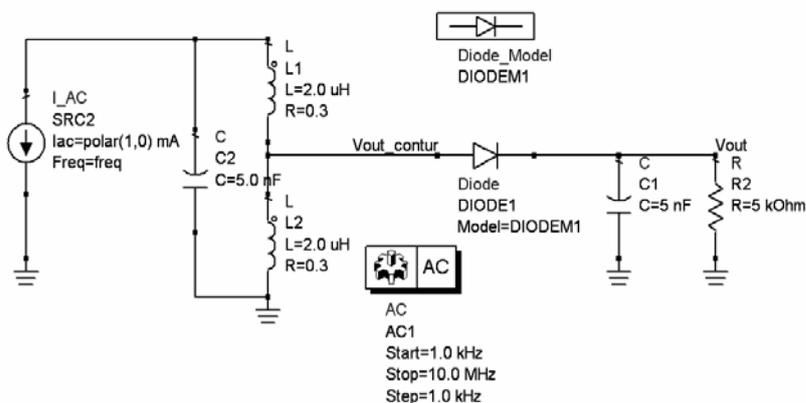


Рис. 33. Схемный проект для определения резонансной характеристики колебательного контура ЧМ-детектора

Результаты расчета амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) напряжения на контуре **Vout_contur** приведены на рис. 34. Из него видно, что выделенный маркерами участок характеристики соответствует наиболее оптимально частоте несущей 1,088 МГц.

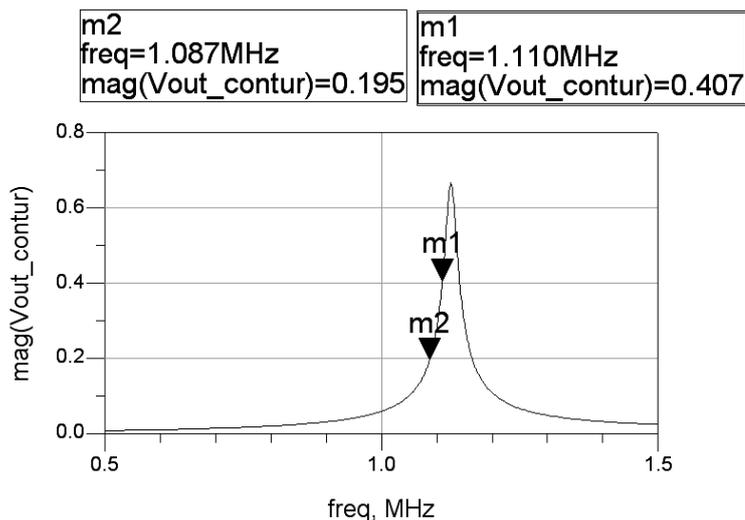


Рис. 34. АЧХ напряжения на контуре

4.4 Формирование проекта и результаты оценки временных и спектральных характеристик выходного сигнала ЧМ-детектора.

Схема проекта приведена на рис. 35. Временная развертка выходного сигнала приведена на рис. 36. С помощью маркеров можно убедиться в том, что период соответствует частоте модулирующего сигнала.

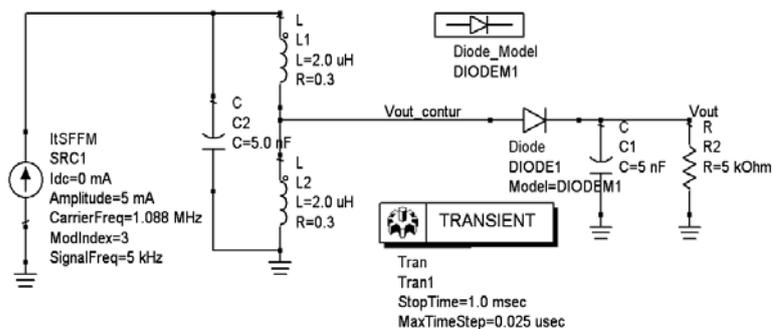


Рис. 35. Схемный проект детектора ЧМ-сигналов

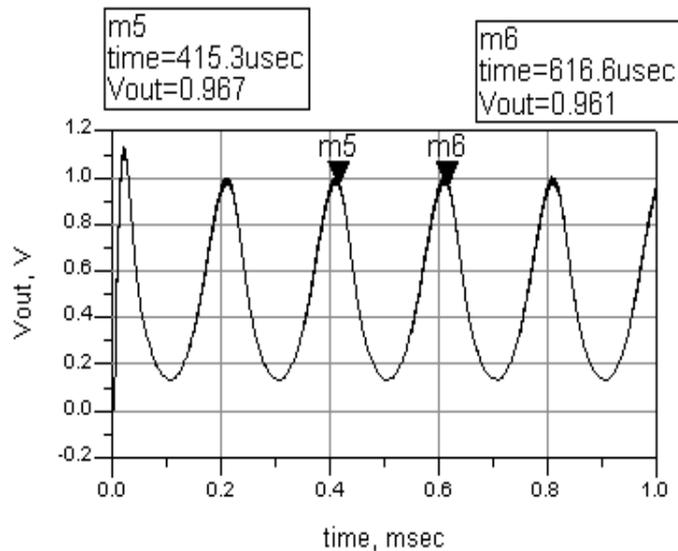


Рис. 36. Временная развертка напряжения на выходе детектора

Уравнение для проведения Фурье-анализа, амплитудный спектр и результаты расчета коэффициента нелинейных искажений приведены на рис. 37. Маркеры установлены на первых трех гармониках спектра.

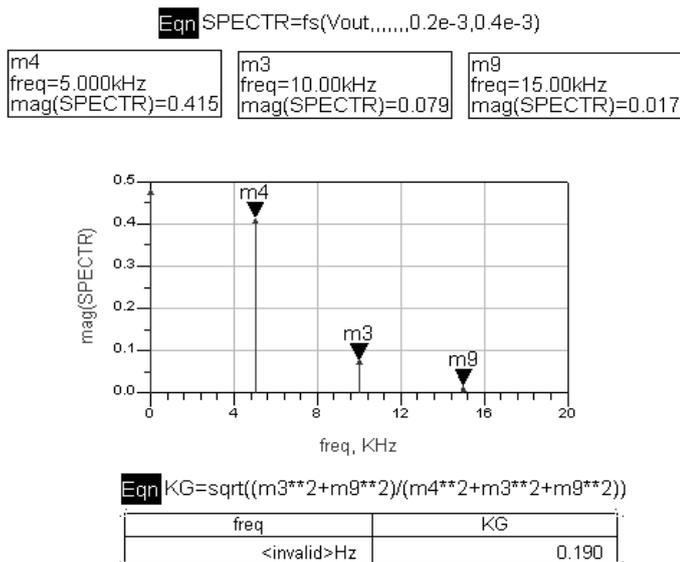


Рис. 37. Определение амплитудного спектра выходного напряжения и коэффициента нелинейных искажений

5. Содержание отчета

5.1. Цель работы, задание.

5.2. Теоретическая часть, включающая описание ЧМ-сигналов и принципов работы простейшего детектора ЧМ-сигналов.

5.3. Схемные проекты для проведения исследований.

5.4. Полученные в ходе моделирования и рассчитанные графические зависимости.

5.5. Выводы по каждому пункту проведенных исследований.

6. Контрольные вопросы

6.1. Выполните математическое описание ЧМ-сигнала. Дайте определение индексу модуляции и частоте девиации. Какие факторы влияют на выбор несущей частоты.

6.2. Выполните математическое описание ФМ-сигнала. Дайте определение индексу модуляции. Какие факторы влияют на выбор несущей частоты.

Приведите примеры сигналов АМ и ЧМ. Постройте их временные зависимости.

6.3. Определите спектр ЧМ-сигнала для случая однотоновой модуляции при большом значении индекса модуляции.

6.4. Определите спектр ЧМ-сигнала при однотоновой модуляции при малом значении индекса модуляции.

6.5. Принцип работы детектора ЧМ-сигнала.

6.6. Объясните назначение колебательного контура в ЧМ-детекторе и принципы выбора ее параметров.

7. Варианты параметров сигналов и элементов схемы

Таблица 3

Номер варианта	Частота несущей, МГц	Частота модуляции, кГц	Значение резистора, кОм	Значение емкости, нФ
1	1	2	2	5
2	2	4	1	5
3	2	0,5	1	10
4	4	10	2	2
5	1	1	4	1
6	2	1	2	2
7	0,5	0,5	2	4
8	2	5	2	2

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник / С.И. Баскаков.- М.: Высш. шк., 1988.-448 с.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1977.- 608 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
Лабораторная работа №1. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИОДИЧЕСКИХ И НЕПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ	3
Лабораторная работа №2. ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛОВ С АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ.....	12
Лабораторная работа №3. ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛОВ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ	29
РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	41