

А.В.Хохлов, Г.А.Окрокверццов, В.С.Маляев

**ИССЛЕДОВАНИЕ
АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ
И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ
В НЕЛИНЕЙНЫХ РАДИОСИСТЕМАХ**

*Учебное пособие для спецпрактикума по курсу
"Теоретические основы радиоэлектроники"*

Ц е л ь р а б о т ы: изучить временную и спектральную структуры однополональных и многополональных амплитудно-модулированных колебаний, методов их получения и детектирования в нелинейных радиосистемах.

Литература

1. Калинин В.И., Герштейн Г.М. Введение в радиофизику: М.: Гостехиздат, 1957, стр. 426 - 431.
2. Хохлов А.В. Нелинейные и параметрические радиотехнические цепи и системы с полупроводниковыми приборами: Учеб. пособие. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1994, стр. 11-26, 84-89, 107-111.
3. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. М.: Связь, 1972, стр. 17-22, 40-46, 79-87, 95-103.
4. Каяцкас А.А. Основы радиоэлектроники. Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1988, стр. 281-308.
5. Зернов Н.В., Карлов В.Г. Теория радиотехнических цепей. 2-ое изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, 1972, стр. 638-652.
6. Хохлов А.В. Теоретические основы радиоэлектроники. Саратов. Изд-во Саратов. ун-та, 2005.

Контрольные вопросы

1. Что такое модуляция радиосигналов? Какие виды модуляции известны? Что такое однополональная и многополональная амплитудная модуляция? Как определить коэффициент модуляции однополонального АМ-колебания по осциллограмме и спектрограмме процесса?
2. Каковы аналитические выражения для однополонального и многополонального АМ-колебаний и их спектров? Как определить ширину спектра АМ-колебаний?

Как влияет на структуру спектра величина коэффициента модуляции?

3. Почему амплитудная модуляция и детектирование АМ-сигналов относятся к нелинейным процессам? Как влияет характер нелинейности на качество амплитудной модуляции? Какими функциями можно аппроксимировать ВАХ НЭ?

4. Зачем на выход детектора АМ-колебаний включается RC -фильтр? Из каких соображений выбирается постоянная времени RC -фильтра?

Задания для самостоятельной работы

1. Считая частоту несущего колебания равной 11 кГц, а частоту модулирующего сигнала - 400 Гц, рассчитать минимальное и максимальное значения постоянной времени RC -фильтра на выходе детектора.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При передаче сигналов, несущих сообщения (обычно низкочастотные), с помощью радиоволн их спектры необходимо перенести в область высоких частот. Для этого достаточно изменить в соответствии с передаваемым сообщением параметры высокочастотного колебания, называемого *несущим*. Такое преобразование можно произвести в нелинейных системах. В качестве несущих чаще всего используются непрерывные гармонические колебания.

- Физический процесс изменения одного или нескольких параметров несущего колебания в соответствии с передаваемым сообщением, сопровождающийся нелинейным преобразованием низкочастотного спектра модулирующего сигнала в спектр в области высокочастотного несущего колебания, называется *модуляцией*.

Модуляция высокочастотного колебания по амплитуде, частоте или фазе называется *амплитудной (АМ), частотной (ЧМ) или фазовой (ФМ) модуляцией*. При этом ширина спектра модулирующего сигнала выбирается малой по сравнению с частотой несущего колебания, а сам сигнал оказывается медленной функцией времени по сравнению с несущим колебанием. В дальнейшем рассматривается только амплитудная модуляция гармонических колебаний. Обратным процессу модуляции является процесс детектирования (демодуляции). Об-

Детектирование (от лат. *detectio* - открытие, обнаружение) называется преобразование модулированного высокочастотного сигнала в низкочастотное колебание, соответствующее закону модуляции (восстановление передаваемого сообщения из модулированного сигнала).

- Модуляция и детектирование сопровождаются трансформацией частотных спектров и поэтому являются *нелинейными процессами*, т.е. могут быть реализованы в нелинейных или в линейных параметрических системах.

*4. По найденным выше значениям a_0 , a_1 и a_2 рассчитать коэффициент модуляции и сравнить его с измеренным по осциллограмме и спектрограмме.

Исследование "линейного" детектора АМ-колебаний

1. Нажать кнопку "ДЕТЕКТОР". При этом на 1 НЭ (3) поступает установленное напряжение смещения от схемы (6), выход сумматора (2) соединен со входом 1 НЭ (3), а его выход - со входом ПФ (5). Микроконтроллер активизирует ключи S_5 , подключающий выход ПФ (5) к входу 2 НЭ (4), выполняющему функции детектора, и S_4 , подключающий выход детектора к выходному разъему прибора. Загорается индикатор кнопки "ДЕТЕКТОР ВКЛ.", а на экране дисплея появляется надпись:

1 МОД. + ПФ + ДЕТ.
Выход детектора

2. Зарисовать осциллограммы и спектрограммы выходного напряжения детектора для однотонального и многотонального АМ-колебаний при нулевой постоянной времени детектора и объяснить происхождение различных составляющих в спектре сигнала.

3. Переключая постоянную времени RC -фильтра от нуля до максимального значения, наблюдать ее влияние на изменение осциллограмм и спектрограмм выходного напряжения. Зарисовать по две-три характерных осциллограммы и спектрограммы для однотонального и многотонального АМ-сигналов и объяснить причины происходящих изменений.

4. Рассчитать постоянную времени $\tau = RC$, которая может обеспечить достаточно хорошее детектирование. Сравнить полученные данные с результатами эксперимента.

Зарисовать осциллограммы и спектрограммы на выходе модулятора при различных уровнях несущего, модулирующего и суммарного сигналов и объяснить происхождение различных составляющих в их спектрах.

5. Нажать кнопку "ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР ВЫХОД". При этом на экране дисплея появляется надпись:

МОДУЛЯТОР 2

Выход после ПФ,

а на осциллограф и анализатор спектра поступает сигнал с выхода модулятора после фильтрации "лишних" составляющих.

Зарисовать осциллограммы и спектрограммы на выходе модулятора после фильтрации при различных уровнях несущего, модулирующего и суммарного сигналов, сопоставить их с полученными в п. 3 и объяснить происхождение различных составляющих в их спектрах.

*6. Установить генератор GFG-8219 в режим колебаний прямоугольной формы и, изменяя частоту модулирующего сигнала, наблюдать за изменением формы и спектра АМ-сигнала. Рассчитать и проверить экспериментально, при какой частоте модулирующего сигнала на выходе фильтра возникает однотоновое АМ-колебание.

2. Исследовать квадратичный модулятор АМ-сигналов на ПТ.

1. Нажать кнопки "МОД." и "1 НЭ". При этом все ключи возвращаются в исходное состояние, на клавиатуре загораются кнопки "МОД." и "1 НЭ", на экране дисплея появляется надпись:

МОДУЛЯТОР 1

Усм :-3.15 В Вход,

а осциллограф и анализатор спектра подключаются ко входу модулятора.

2. Чтобы исключить влияние переменного напряжения при измерении смещения ПТ, перевести регулятор "АМПЛИТУДА СУММ.СИГН." в крайнее левое положение и установить напряжение смещения ПТ в середине квадратичного участка ВАХ. Возвратить регулятор "АМПЛИТУДА СУММ.СИГН." в исходное состояние (см. п. 3 при исследовании диодного модулятора) и, используя потенциометры "АМПЛИТУДА НЕСУЩЕЙ" и "АМРГ" на передней панели функционального генератора, задать амплитуду суммарного сигнала в пределах квадратичного участка.

Оптимальными являются следующие амплитуды:

для однотоновой модуляции амплитуда несущей ~ 0.5 В, амплитуда модулирующей синусоиды ~ 0.75 В,

для многоотональной модуляции амплитуда несущей ~ 0.5 В, амплитуда первой гармоники прямоугольного напряжения ~ 1 В. Амплитуду сигналов контролировать с помощью клавиши "S" анализатора спектра.

*3. Регулируя амплитуду, частоту и форму модулирующих колебаний, выполнить п. 3 ÷ 5 из предыдущего задания.

Амплитудно-модулированные колебания и их спектры

Пусть гармоническое колебание $U(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ используется в качестве несущего, а модулирующий сигнал $s(t)$ является гармоническим (однотоновым) колебанием $s(t) = U_s \cos(\Omega t + \Phi_0)$ и выполняется условие $\Omega \ll \omega_0$. Тогда АМ-колебание называется *однотоновым*. При $\Phi_0 = 0$ имеем:

$$U_{AM}(t) = U_m (1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где $m = U_s/U_m$ - коэффициент амплитудной модуляции.

Спектральный состав сигнала можно получить, представляя произведение функций в (1) в виде суммы гармонических колебаний. Тогда

$$U_{AM}(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{mU_m}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0] + \frac{mU_m}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0]. \quad (2)$$

Спектр однотонового АМ-колебания линейчатый и эквидистантный. Он состоит из трех гармонических колебаний с близкими частотами.

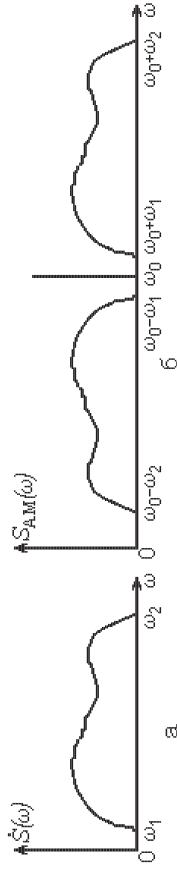


Рис. 1

Амплитудная модуляция гармонического колебания произвольным сигналом, обладающим сплошным спектром в области низких частот, сопровождается формированием в окрестности несущего колебания двух групп боковых колебаний (рис.1). Верхняя группа колебаний (от $(\omega_0 + \omega_1)$ до $(\omega_0 + \omega_2)$) является точной копией спектра модулирующего сигнала, сдвинутой в область радиочастот, а нижняя группа колебаний представляет зеркальное отражение спектра модулирующего сигнала относительно ω_0 , также смещенное в область радиочастот. Колебания с комбинационными частотами $(\omega_0 - \omega_i)$ и $(\omega_0 + \omega_i)$ распадаются попарно-симметрично относительно частоты несущего колебания. Полная ширина спектра АМ-процесса равняется удвоенной ширине спектра модулирующего сигнала [6, с.78-80].

Частным случаем многоотонального АМ-сигнала является высокочастотное колебание, промодулированное по амплитуде последовательностью прямоугольных импульсов [6, с.80-82],

Амплитудная модуляция как нелинейный процесс

При амплитудной модуляции сигналов происходит *перемножение двух функций*: высокочастотного колебания с частотой ω_0 и модулирующего гармонического или полигармонического сигнала. Эту процедуру можно осуществить в нелинейной системе при задании на вход суммы несущего и модулирующего сигналов и выделения на выходе их произведения. Спектр выходного сигнала содержит составляющие с частотами, отсутствовавшими у исходных колебаний. Количество и частоты новых составляющих зависят от вида нелинейного элемента и его вольт-амперной характеристики (ВАХ).

ВАХ нелинейных элементов (НЭ), получаемые экспериментально и представляемые в виде графиков или таблиц, неудобно использовать в расчетах, и для теоретического анализа их аппроксимируют аналитическими функциями. Наибольшее распространение в радиоэлектронике получили аппроксимации степенным многочленом и ломаной линией.

Аппроксимация степенным многочленом основана на разложении ВАХ НЭ в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки U_0 :

$$I = a_0 + a_1(U - U_0) + a_2(U - U_0)^2 + a_3(U - U_0)^3 + \dots = \sum_{k=0}^n a_k(U - U_0)^k, \quad (3)$$

где $a_k = \frac{1}{k!} \left. \frac{d^k I}{dU^k} \right|_{U=U_0}$. Коэффициент a_0 соответствует току покоя НЭ I_0 при $U = U_0$, а коэффициент a_1 совпадает с дифференциальной крутизной $S(U_0)$ ВАХ. Наличие квадратичного члена в аппроксимационной формуле ВАХ является условием проведения таких нелинейных преобразований, как амплитудная модуляция и детектирование АМ-сигналов.

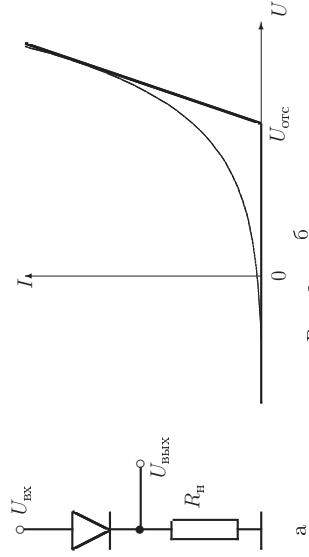


Рис. 2

Кусочно-линейная аппроксимация состоит в замене реальной характеристики НЭ приближенной, состоящей из отрезков прямых линий с различными наклонами. Например, в цепи (рис. 2,а) ВАХ полупроводникового диода удобно

Программное обеспечение анализатора спектра предусматривает точное измерение амплитуд и частот спектральных составляющих с помощью курсора. Для этого используется режим сканирования спектра (клавиша "S"). При нажатии клавиши на экране появляется вертикальная линия, которая плавно перемещается с помощью клавиш " \leftarrow " и " \rightarrow " и скачкообразно при использовании клавиш "CTRL \leftarrow " и "CTRL \rightarrow ". Клавиша "F1" обеспечивает необходимую мощность;

3) регулятор "АМПЛИТУДА СУММ.СИГН." рекомендуется устанавливать вблизи максимального значения. Для этого повернуть регулятор амплитуды в крайнее правое положение (по часовой стрелке), а затем повернуть его обратно на $5 \div 10^\circ$,

4) переключение установки из режима однотональных в режим многотональных АМ-колебаний и обратно рекомендуется выполнять переключая форму колебаний сигнала функционального генератора.

1. Исследовать диодный модулятор АМ-сигналов.

1. Подключить к выходному разъему установки с помощью коаксиального тройника осциллограф и ИВМ РС. Установить ИВМ РС в режиме анализатора спектра. Для этого загрузить программу и нажать клавишу **F4**.

2. Нажать кнопки "МОД.", затем "2 НЭ". При этом активизируются ключи S_6 , подключающий выход сумматора (2) ко входу 2 НЭ (4), и S_7 , подключающий выход НЭ (4) ко входу ПФ (5), а микроконтроллер отключает все вольтметры. На клавиатуре загораются индикаторы кнопок "МОД." и "2 НЭ", а на экране дисплея появляется надпись:

МОДУЛЯТОР 2

3. Установить на функциональном генераторе частоту колебаний $300 \div 400$ Гц и, используя потенциометры "АМПЛИТУДА НЕСУЩЕЙ", "АМПЛИТУДА СУММ.СИГН." и "АМРЛ" на передней панели функционального генератора, задать размах суммарного сигнала не более $1 \div 2$ В. Оптимальными являются следующие амплитуды:

для однотональной модуляции амплитуда несущей ~ 2 В, амплитуда модулирующей синусоиды ~ 0.75 В,

для многотональной модуляции амплитуда несущей ~ 2.2 В, амплитуда первой гармоники прямоугольного напряжения ~ 0.85 В. Амплитуду сигналов контролировать с помощью клавиши "S" анализатора спектра. Зарисовать осциллограммы и спектрограммы при различных уровнях несущего, модулирующего и суммарного сигналов и объяснить происхождение различных составляющих в их спектрах.

4. Нажать кнопку "ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР ВХОД". При этом на экране дисплея появляется надпись:

МОДУЛЯТОР 2

Выход НЭ до ПФ,

а на осциллограф и анализатор спектра поступает сигнал с выхода модулятора.

часовой стрелки), включить функциональный генератор и установить на нем синусоидальную форму сигналов.

2. Нажать кнопки "АЧХ" и "ВХОД ПФ". При этом ключи S_9 и S_{10} возвращаются в исходное состояние, активизируются ключи S_8 и S_3 . Ключ S_8 совместно с ключом S_6 подключает полосовой фильтр (5) через сумматор сигналов (2) к функциональному генератору GFG-8210, а ключ S_3 соединяет выход ПФ с выходным разъемом установки и позволяет контролировать синусоидальность напряжения на выходе ПФ.

Микроконтроллер подключает вольтметры V_1 и V_2 , на клавиатуре загорятся индикаторы кнопок "АЧХ" и "ВХОД", а на экране дисплея появятся надписи:

Вх. АЧХ ПФ Вых.
U:0.86 В U:1.64 В

3. Поддерживая с помощью регуляторов "АМПЛИТУДА СУММ.СИГН." и "АМPL" на передней панели функционального генератора напряжение ~ 1 В на входе ПФ, снять зависимость выходного напряжения от частоты сигнала в диапазоне от 9 до 14 кГц и построить АЧХ полосового фильтра. Особенно тщательно следует измерить АЧХ вблизи максимума коэффициента передачи.

Определить полосу пропускания ПФ на уровне 0,9 от максимального значения выходного напряжения и рассчитать центральную частоту ПФ.

Замечание. В дальнейшем, при нажатии кнопки "ВХОД" всегда активизируется ключ S_2 , который соединяет вход ПФ с выходным разъемом установки, а при нажатии кнопки "ВЫХОД" – ключ S_2 возвращается в исходное состояние, а активизируется ключ S_3 , который соединяет выходной разъем установки с выходом ПФ. Осциллограф фиксирует форму, а ИВМ РС – спектр сигналов, действующих на входе и выходе ПФ.

Исследование модуляторов однотональных и многоотональных АМ-колебаний

Исследование особенностей функционирования амплитудных модуляторов целесообразно начать с полупроводникового диода (2 НЭ).

Замечания. В дальнейшем используются следующие установки органов управления и правила обращения с приборами:

- 1) микропроцессорный комплекс осуществляет каскадное соединение модулятора и полосового фильтра в случае 2 НЭ или модулятора со схемой задания смещения, полосового фильтра и детектора в случае 1 НЭ;
- 2) наибольшая частота спектроанализатора составляет 35 кГц и может регулироваться в широких пределах. Клавиши "HOME" – "END" позволяют сжимать или растягивать изображение спектра, а клавиши " \uparrow ", " \leftarrow ", " \rightarrow " и " \downarrow " сменяют спектр. Клавиши \uparrow и \downarrow позволяют варьировать амплитуды спектральных составляющих.

аппроксимировать аналитическим выражением (рис. 2,б)

$$I(U) = \begin{cases} 0, & \text{при } U < U_{отс} \\ S(U - U_{отс}), & \text{при } U > U_{отс}, \end{cases} \quad (4)$$

где S - крутизна характеристики, $U_{отс}$ - напряжение излома. Кусочно-линейное представление обычно используется для аппроксимации нелинейных характеристик при больших амплитудах воздействий.

Однотональная амплитудная модуляция.

Пусть на НЭ действует сигнал в виде постоянного напряжения U_0 и суммы двух гармонических колебаний

$$U(t) = U_0 + U_m \cos \omega_0 t + U_\Omega \cos \Omega t, \quad (5)$$

а ВАХ НЭ аппроксимирована многочленом второй степени (*квадратичная нелинейность*). Тогда получим

$$\begin{aligned} I(t) &= a_0 + a_1(U_m \cos \omega_0 t + U_\Omega \cos \Omega t) + a_2(U_m \cos \omega_0 t + U_\Omega \cos \Omega t)^2 = \\ &= a_0 + a_1(U_m \cos \omega_0 t + U_\Omega \cos \Omega t) + a_2(U_m^2 \cos^2 \omega_0 t + U_\Omega^2 \cos^2 \Omega t) + 2a_2 U_m U_\Omega \cos \omega_0 t \cos \Omega t = \\ &= a_0 + \frac{a_2}{2}(U_m^2 + U_\Omega^2) + a_1(U_m \cos \omega_0 t + U_\Omega \cos \Omega t) + \frac{a_2}{2}U_m^2 \cos 2\omega_0 t + \frac{a_2}{2}U_\Omega^2 \cos 2\Omega t + \\ &\quad + a_2 U_m U_\Omega \cos(\omega_0 + \Omega)t + a_2 U_m U_\Omega \cos(\omega_0 - \Omega)t. \end{aligned} \quad (6)$$

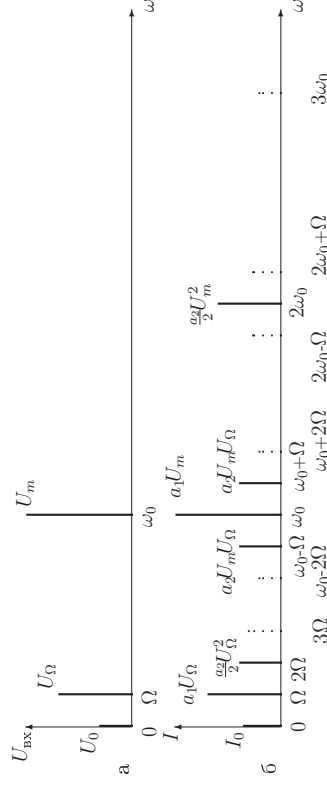


Рис. 3

Из (6) видно, что ток НЭ¹ содержит и гармоническое колебание с частотой несущей (ω_0) и *произведение* $2U_m \cos(\omega_0 t)U_\Omega \cos \Omega t$ (подчеркнуты), дающее составляющие с комбинационными частотами $(\omega_0 \pm \Omega)$, т.е. присутствуют все три тока НЭ содержит и другие ("лишние") составляющие.

¹Вместо тока нелинейного элемента часто рассматривается напряжение, создаваемое этим током на некотором сопротивлении нагрузки R_n , в качестве которого обычно выступает входная цепь фильтра.

Исследование характеристик нелинейных элементов и полосового фильтра

1. Снять и построить ВАХ первого НЭ.

1. Нажать кнопку "ВАХ". При этом активизируется ключ S_6 . Он отключает 1 НЭ (3) от сумматора сигналов (2), а через ключи S_9 и S_{10} на 1 НЭ (3) поступает регулируемое смещение от -5 В до нуля, вырабатываемое схемой (6). Микроконтроллер подключает вольтметры V_4 и V_5 ($V_5 = I_{ст}R_{н}$), на клавиатуре загораются индикаторы кнопок "ВАХ" и "1 НЭ", а на экране дисплея появляется надпись:

ВАХ 1 НЭ (ПТ)
U: -4.27В I: 0.01mA,

где U -напряжение V_4 , I - ток стока.

2. С помощью потенциометра "СМЕЩЕНИЕ РАБ.ТОЧКИ" изменить напряжение смещения через каждые 0.5 В от -5 В до нуля, фиксируя на экране дисплея напряжение $U_{зн}$ и ток $I_{ст}$ первого НЭ.

3. Используя формулу (12), аппроксимировать ВАХ 1 НЭ квадратичной зависимостью. Для этого выбрать напряжение отсечки -3.85 В и разделить величину удельной крутизны транзистора. Результаты аппроксимации построить совместно с экспериментально измеренной ВАХ. Определить пределы участка квадратичности ВАХ.

4. Представить аппроксимирующую зависимость в виде многочлена $I_{ст} = a_0 + a_1 U_{зн} + a_2 U_{зн}^2$ и определить величины коэффициентов a_0 , a_1 и a_2 .

2. Снять и построить ВАХ второго НЭ.

1. Повернуть ручку смещения раб. точки по часовой стрелке в крайнее положение и нажать кнопку "2 НЭ". При этом ключ S_6 возвращается в исходное состояние, отключая 2 НЭ (4) от сумматора сигналов (2), а активизированные ключи S_9 и S_{10} переключаются и соединяют его со схемой (6), вырабатываемой регулируемое смещение от -5 В до +5 В. Микроконтроллер подключает вольтметры V_3 и V_4 , на клавиатуре загораются индикаторы кнопок "ВАХ" и "2 НЭ", а на экране дисплея появляется надпись с некоторыми показаниями:

ВАХ 2 НЭ (ДИОД)
U: +4.12В I: 4.05mA

2. С помощью потенциометра "СМЕЩЕНИЕ РАБ.ТОЧКИ" изменить напряжение смещения от +5 В до -5 В, фиксируя на экране дисплея напряжение и ток 2 НЭ. Интервал изменения напряжения предлагается выбрать самостоятельно.

3. Аппроксимировать ВАХ 2 НЭ кусочно-линейной зависимостью. Результат аппроксимации построить совместно с экспериментально измеренной ВАХ. Определить напряжение отсечки тока.

3. Снять и построить АЧХ полосового фильтра.

1. Отключить генератор несущей (1) от сумматора (2). Для этого установить потенциометр "АМПЛИТУДА НЕСУЩЕЙ" в крайнее левое положение (против

Спектры входного воздействия и полный спектр выходного тока НЭ изображены на рис. 3,а и 3,б соответственно. В спектре выходного тока содержится одна постоянная составляющая и шесть гармонических составляющих (рис. 3,б, сплошные линии), в том числе два колебания с комбинационными частотами и два колебания с удвоенными частотами $2\omega_0$ и 2Ω . Эти составляющие возникают вследствие нелинейности рассматриваемой цепи, причем сигналы с комбинационными частотами ($\omega_0 \pm \Omega$) характеризуют *взаимодействие входных колебаний*. Взаимодействие входных сигналов не позволяет использовать принцип суперпозиции и представляет основную отличительную особенность нелинейных преобразований.

Чтобы выделить однонаправленное АМ-колебание, необходимо с помощью линейной частотно-избирательной цепи (фильтра), например, параллельного колебательного контура с полосой пропускания $\Delta\omega > 2\Omega$, значительно ослабить все составляющие спектра кроме несущего колебания и двух составляющих и бинационными частотами. Тогда, используя подчеркнутые в (6) слагаемые и принимая коэффициент передачи фильтра равным 1, на выходе фильтра получим

$$I_{\text{вых}}(t) = a_1 U_m (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t, \quad (7)$$

где $m = 2a_2 U_{\Omega} / a_1$ - коэффициент амплитудной модуляции.

Если аппроксимирующий ВАХ многочлен содержит $a_3(U - U_0)^3$, то в спектре тока $I(t)$ возникают дополнительные составляющие с частотами 3Ω и $3\omega_0$, а также с комбинационными частотами ($\omega_0 \pm 2\Omega$) и ($2\omega_0 \pm \Omega$), изображенные на рис. 3,б пунктирными линиями (на нижней строчке под рис. 3,б приведены их частоты), т.е. спектр выходного сигнала усложняется.

Многонаправленная амплитудная модуляция

С помощью квадратичной нелинейности можно создавать многонаправленные АМ-сигналы. Пусть модулирующий сигнал представляет последовательность прямоугольных импульсов [6, с.80-82]. Его спектр содержит только нечетные гармоники частоты повторения импульсов (Ω_I , $3\Omega_I$, $5\Omega_I$ и т.д.), а полный вещественный спектр воздействия принимает вид, показанный на рис. 4,а.

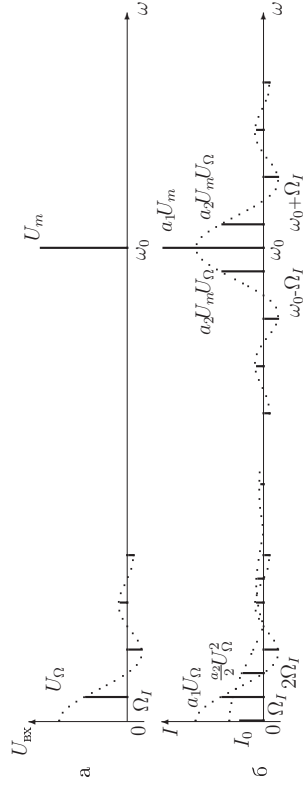


Рис. 4

реключения режимов, регуляторы постоянного смещения рабочей точки НЭ, амплитуды несущей и суммарного сигнала, переключатель постоянной времени РС-фильтра на выходе детектора и коаксиальные разъемы "Вход" для подключения функционального генератора и "Выход" для подключения осциллографа и ИВМ РС.

Основными элементами аналогового блока являются генератор несущего колебания с частотой ~ 11 кГц и регулируемой амплитудой (1), сумматор несущего и модулирующего сигналов с регулируемой амплитудой (2), два нелинейных элемента (полевой транзистор (3) и полупроводниковый диод(4)), полосовой фильтр с П-образной амплитудно-частотной характеристикой (5), схема задания регулируемого смещения рабочей точки нелинейного элемента (6) и магазин емкостей (7) для дискретного изменения постоянной времени РС-фильтра на выходе детектора.

Полосовой фильтр (рис. 9) представляет каскадное соединение двух настроенных на частоту 10 кГц и 12 кГц узкополосных активных РС-фильтров с многолетлевой обратной связью. Полевой транзистор используется только в качестве амплитудного модулятора, а полупроводниковый диод - как в качестве модулятора, так и в качестве демодулятора (детектора АМ-колебаний).

Блок цифровой обработки собран на программируемом микроконтроллере ATmega16L из семейства AVR. По программе, заданной с помощью внешнего программатора, он управляет инициализацией кнопок на передней панели прибора, коммутацией ключей в аналоговом блоке, коммутирует аналого-цифровые преобразователи вольтметров $V_1 \div V_5$ и вырабатывает сигналы дисплея индикатора.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Внимание! Перед включением прибора убедиться, что ручки всех регуляторов в крайнем левом положении, а переключатель постоянной времени детектора в положении "0 мс".

После нажатия кнопки "Сеть" на дисплее ЖКИ поочередно появляются следующие надписи:

Лабораторная работа
Амплитудная модуляция
Кафедра радиопизики и ИД,

загораются и потухают все индикаторы на кнопках. Это означает, что установка готова к проведению исследований.

При построении многогонального АМ-сигнала в цепи НЭ кроме спектральных составляющих воздействия возникают колебания с удвоенными частотами $2\Omega_I$, $6\Omega_I$, $10\Omega_I$, $14\Omega_I$ и т.д., а также $2\omega_0$ (эта составляющая на рис. 4б не представлена). Они значительно удалены от несущего колебания по оси частот и участвуют в формировании спектра АМ-сигнала. Колебания с комбинационными частотами $\omega_0 \pm (2i+1)\Omega_I$, образующиеся при взаимодействии несущего колебания со всеми гармониками модулирующего сигнала, располагаются справа и слева от ω_0 и составляют основной спектр многогонального АМ-колебания. Никаких "лишних" составляющих в этой области спектра нет. Использование полосового фильтра с соответствующей полосой пропускания обеспечивает решение рассматриваемой задачи и, при демодуляции, позволяет *полностью восстановить исходное сообщение*. Но если аппроксимирующий ВАХ многочлен содержит $a_3(U - U_0)^3$, то в спектре тока $I(t)$ возникают дополнительные составляющие с комбинационными частотами $\omega_0 \pm 2i\Omega_I$ и восстановить исходное сообщение не удастся. Полный спектр тока для этого случая предлагается построить самостоятельно.

- Для выполнения точной амплитудной модуляции при сколь угодно сложной форме модулирующих сигналов необходимо и достаточно чтобы ВАХ НЭ была квадратичной.

Детектирование АМ-сигналов как нелинейный процесс

При детектировании АМ-колебаний из сложного входного сигнала $U_{AM}(t) = U_m(1+ms(t)) \cos \omega_0 t$ необходимо выделить огибающую $U_s(t) = mU_m s(t)$ или в терминах спектральных представлений трансформировать спектр АМ-сигнала из области радиочастот в область низких частот. Низкочастотные составляющие в спектрах АМ-сигналов отсутствуют, но АМ-сигнал в цепи НЭ создает колебания с комбинационными, в том числе и низкими частотами.

Квадратичное детектирование АМ-сигналов

Пусть на вход НЭ с квадратичной ВАХ поступает ортогональный АМ-сигнал

$$U_{вх}(t) = U_m(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t = U_m \left[\cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t \right].$$

Подстановка этого выражения в формулу (3) квадратичной ВАХ НЭ дает

$$I(t) = a_0 + \frac{a_2}{2} U_m^2 \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) + a_1 U_m \left(\cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t \right) + \frac{a_2}{2} U_m^2 \left(\frac{2m \cos \Omega t}{2} + \underbrace{\frac{m^2}{2} \cos 2\Omega t + \left(1 + \frac{m^2}{4} \right) \cos 2\omega_0 t + m \cos(2\omega_0 - \Omega)t}_{\text{...}} \right) + \frac{a_2}{2} U_m^2 \left(m \cos(2\omega_0 + \Omega)t + \frac{m^2}{4} \cos(2\omega_0 - 2\Omega)t + \frac{m^2}{4} \cos(2\omega_0 + 2\Omega)t \right). \quad (8)$$

Задача детектора состоит в получении сообщения полезного сигнала $U_{дет}(t) = U_m \cos \Omega t$. Согласно (8) такая компонента присутствует в выходном

сигнале (подчеркнута) и ее амплитуда равна $a_2 m U_m^2$. Это следствие квадратичности НЭ. Так как сигнал на выходе НЭ с квадратичной характеристикой пропорционален U_m^2 , детектирование называется *квадратичным*. Коэффициент детектирования $k_{дет}$ имеет вид

$$k_{дет} = U_{дет} / m U_m = a_2 m U_m^2 R_{нэ} / m U_m = a_2 U_m R_{нэ},$$

где $R_{нэ}$ - сопротивление нагрузки детектора.

Однако в выходной сигнал (8) входит еще одна НЧ-компонента с частотой 2Ω (горизонтальная фигурная скобка). Это означает, что спектр выходного сигнала отличается от спектра передаваемого сообщения и имеют место нелинейные искажения. Коэффициент нелинейных искажений сообщения $k_{нл}$ можно ввести как отношение амплитуд гармоник выходного сигнала с частотами 2Ω и Ω . Тогда $k_{нл} = m/4$. Для полигармонических сообщений кривина еще более усложняется из-за перекрытия спектральных областей с частотами Ω_i и $2\Omega_i$. Квадратичное детектирование применялось при детектировании с использованием электронных ламп и в настоящее время не используется.

"Линейное" детектирование АМ-сигналов

Пусть ВАХ НЭ аппроксимирована кусочно-линейной зависимостью (4), а входной сигнал представляет собой однотональное АМ-колебание

$$U_{вх}(t) = U_{отс} + U_{АМ} = U_{отс} + U_m(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t = U_{отс} + U_m^* \cos \omega_0 t. \quad (9)$$

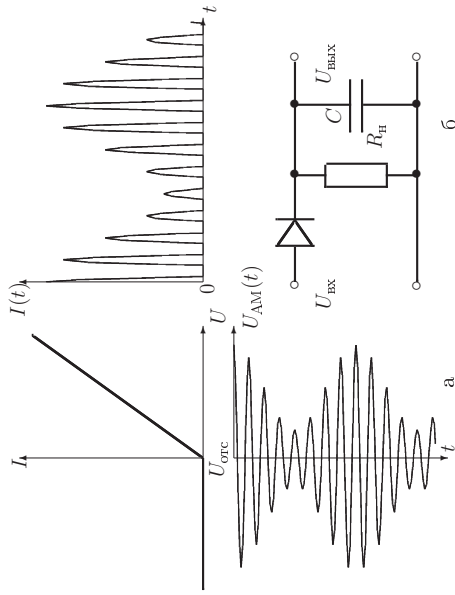


Рис. 5

В цепи НЭ сигнал испытывает ограничение на уровне $U_{отс}$ и вместо непрерывного сигнала возникает последовательность импульсов тока (рис. 5,а). Минимальный угол ϑ , при котором $U_m \cos \vartheta = U_{отс}$ называется *углом отсечки*. Подставляя (9) в (4), получим

$$I(t) = S U_m^* (\cos \omega_0 t - \cos \vartheta) = S U_m (1 + m \cos \Omega t) (\cos \omega_0 t - \cos \vartheta). \quad (10)$$

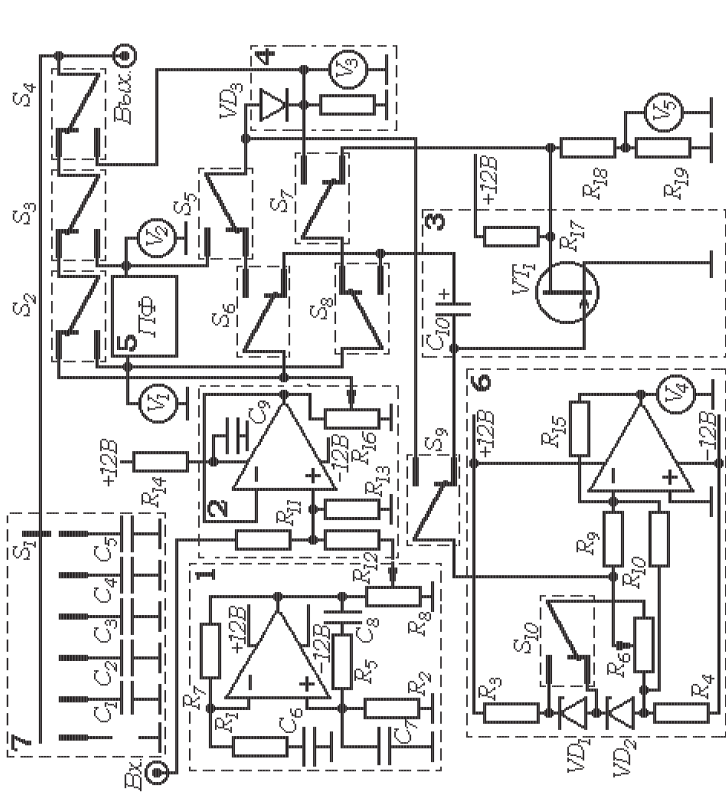


Рис. 7

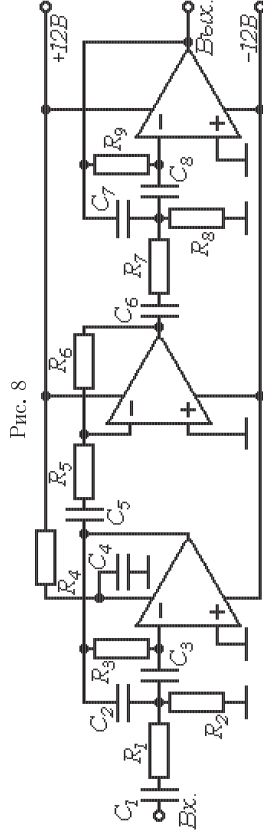


Рис. 8

Микропроцессорный комплекс состоит из трех блоков: 1) аналоговой обработки сигналов, 2) цифровой обработки, коммутации режимов и индикации и 3) блока питания. Блок-схема микропроцессорного комплекса изображена на рис. 7, принципиальные схемы аналогового блока и полосового фильтра представлены на рис. 8 и 9.

На передней панели прибора расположены дисплей жидкокристаллического индикатора (ЖКИ), отображающий выбранный режим работы прибора и величины измеряемых напряжений и токов, клавиатура из шести кнопок пе-

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

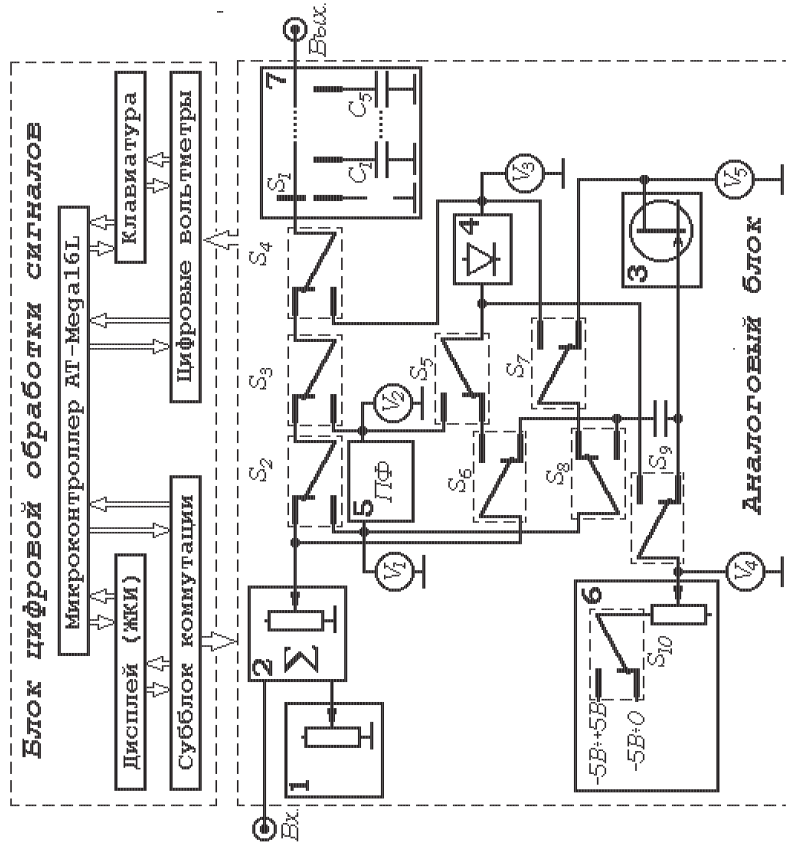


Рис. 7

Экспериментальная установка состоит из автономного микропроцессорного комплекса, функционального генератора сигналов GFG-8216, двухканального осциллографа GOS-620FG и компьютера IBM PC с аналого-цифровым преобразователем, используемого в качестве анализатора спектра.

Разложение этой последовательности импульсов тока в ряд Фурье имеет вид:

$$I(t) = I_0 + I_1 \cos \omega_0 t + I_2 \cos 2\omega_0 t + I_3 \cos 3\omega_0 t + \dots$$

Результат детектирования представляет только НЧ-составляющая тока НЭ, входящая в состав I_0 (все остальные члены ряда являются высокочастотными и отфильтровываются). Тогда

$$I_0 = SU_m^* \gamma_0(\vartheta) = SU_m \gamma_0(\vartheta) (1 + m \cos \Omega t),$$

где $\gamma_0(\vartheta) = \frac{\sin \vartheta - \vartheta \cos \vartheta}{\pi}$ - функция Берга нулевого порядка. Когда $U_{отс} = 0$, угол отсечки ϑ не зависит от амплитуды сигнала и равен $\pi/2$, а $\gamma_0(\pi/2) = 1/\pi$ [2, с.16]. Низкочастотная составляющая тока $I(t)$ приобретает амплитуду $S m U_m / \pi$, а выходное напряжение детектора после отфильтровывания всех высокочастотных составляющих удовлетворяет соотношению

$$U_{дет} = \frac{1}{\pi} S R_{нч} m U_m \cos \Omega t. \quad (11)$$

Таким образом, детектирование АМ-сигналов в цепях с кусочно-линейной ВАХ НЭ приближается к "идеальному", т.е. выходной сигнал детектора полностью повторяет огибающую АМ-сигнала, а детектор называется *идеальным* или *линейным*. Термин "линейное детектирование" неудачен. Любое детектирование сопровождается образованием новых спектральных составляющих и, следовательно, представляет нелинейную операцию, а "линейный детектор" выполняет ее так, что огибающая АМ-колебания превращается в НЧ-сигнал без искажений формы, т.е. линейно.

Схемы амплитудных модуляторов и детекторов

В качестве НЭ в модуляторах используются электронные лампы, полупроводниковые диоды и транзисторы, интегральные микросхемы. Главная задача состоит в том, чтобы удовлетворить требованию квадратичности ВАХ НЭ².

Оптимальными для создания управляемых НЭ с квадратичной ВАХ являются униполярные (полевые) транзисторы и с управляющим $p - n$ -переходом, и с изолированным затвором.

² Многие электронные лампы обладают протяженными участками с квадратичной зависимостью анодного тока от сеточного напряжения, и для небольших амплитуд переменного напряжения между сеткой и каждым анодным ток аппроксимируется квадратичной зависимостью. Многочисленные электронные лампы можно использовать в качестве аналоговых перемножителей сигналов, подавая несущее колебание на одну из сеток, а модулирующий сигнал - на другую. Однако высокие напряжения анодного питания, большие габариты и ряд конструктивных трудностей сделали модуляторы на электронных лампах неперспективными. Полупроводниковые приборы лишены указанных недостатков.

Как известно [2], вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов, а также входные характеристики биполярных транзисторов, описываются экспоненциальными зависимостями токов от напряжения $I_0 \exp(U/\varphi_T)$, где I_0 - тепловой ток прибора, а φ_T - температурный потенциал (при комнатной температуре $\varphi_T \approx 25$ мВ).

В области малых положительных значений U указанные характеристики удовлетворительно аппроксимируются квадратичной зависимостью. При больших U запирающий слой электронно-дырочного ($p - n$) перехода перестает существовать, ток с удовлетворительной точностью описывается законом Ома, а ВАХ становится линейной

Полевой транзистор - тонкая пластина из полупроводника, например, n -типа с двумя невыпрямляющими контактами на концах (*исток* и *сток*) и сильно-легированную область p^+ -типа (*затвор*). Затвор и основной канал образуют $p-n$ -переход, обедненный носителями заряда.

На $p-n$ -переход транзистора (рис. 6,а) всегда задается обратное смещение ($U_{ЗП} < 0$). С увеличением $|U_{ЗП}|$ толщина обедненного слоя возрастает, канал сужается, его сопротивление растет, а протекающий ток уменьшается. Обедненный слой полностью перекрывает канал при некотором напряжении $U_{ЗП} = U_{отс}$, и ток прекращается. Величиной тока в униполярном транзисторе управляет электрическое поле. Отсюда еще одно название - полевой транзистор (ПТ).

Другое важное свойство ПТ состоит в том, что

- $I_{Ст}(U_{ЗП})$ с высокой точностью аппроксимируется квадратичной функцией

$$I_{Ст} = \frac{S_0}{2}(U_{отс} - U_{ЗП})^2, \quad (12)$$

где S_0 - удельная крутизна полевого транзистора, т.е. передаточные (стоко-затворные) характеристики ПТ с $p-n$ -переходом (рис. 6,б) представляют собой параболы, вершины которых смещены на величину $|U_{отс}|$ от начала координат.

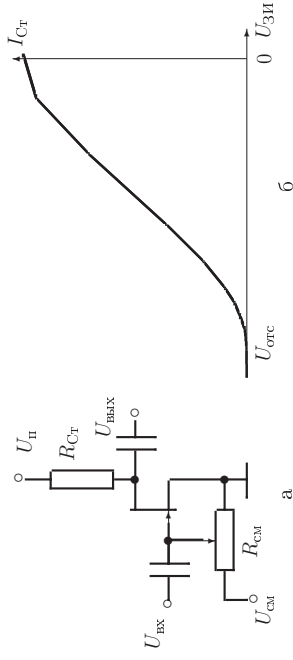


Рис. 6

Модулятор на полевом транзисторе с $p-n$ -переходом. Принципиальная электрическая схема амплитудного модулятора на ПТ с управляющим $p-n$ -переходом представлена на рис. 6,а. На затвор задается отрицательное смещение, соответствующее середине квадратичного участка стоко-затворной характеристики, а сумма напряжений несущего и модулирующего сигналов, выводится так, чтобы размах суммарного сигнала не выходил за пределы квадратичного участка характеристики ПТ.

В силу квадратичности характеристики напряжения, возникающее на нагрузке ПТ $R_{ст}$ после выделения полосовым фильтром представляет неискаженное АМ-колебание.

Амплитудный модулятор можно построить и на полупроводниковом диоде, но так как квадратичный участок ВАХ практически отсутствует, то получить неискаженное АМ-колебание значительно труднее.

Диодный детектор - наиболее распространенный тип детекторов АМ-сигналов. Электрическая принципиальная схема детектора изображена на рис. 5,б. Низкочастотные колебания на выходе детектора обычно выделяются с помощью RC -фильтра. Для этого сопротивление нагрузки обычно выделяется конденсатором C . Постоянная времени RC -цепи должна быть достаточно большой по сравнению с периодом несущей, чтобы зашунтировать высокочастотные колебания, но возможно малой по сравнению с периодом высшей гармоники передаваемого сообщения, чтобы не искажать спектр, а значит и форму сообщения. Поэтому при выборе элементов RC -фильтра исходят из условия

$$\frac{1}{\omega_0} \ll R_n C \ll \frac{1}{\Omega} \quad \text{или} \quad \frac{1}{\omega_0 C} \ll R_n \ll \frac{1}{\Omega C}$$

Выводы:

1. Амплитудная модуляция наиболее точно выполняются в НЭ с квадратичной ВАХ. Такими характеристиками обладают униполярные (полевые) транзисторы. Нелинейные цепи с полевыми транзисторами являются "идеальными" для неискаженной амплитудной модуляции при любой форме модулирующих сигналов.
2. Наилучшее детектирование АМ-колебаний удается получить в НЭ с кусочно-линейной ВАХ. Эта модель оптимальна для диодов при больших амплитудах напряжений.