

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НОВОСИБИРСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет

Кафедра радиоп физики

Модуляция и демодуляция

Методические указания к лабораторной работе практикума по
радиоэлектронике

Новосибирск, 1997

Лабораторная работа посвящена изучению методов модуляции и демодуляции (детектирования) сигналов. В методическом пособии разъясняется принцип работы модулирующих и демодулирующих схем.

В задачу студента входит изучение электронных схем для получения модулированных сигналов и их демодуляции, макетирование и настройка собранных схем.

Составители: Г.И. Кузин, А.Ф. Павлов

Рецензент: О.М. Грехов

Печатается по решению кафедры радиофизики

Оглавление

Введение.....	3
1. Амплитудная модуляция (АМ)	4
2. Частотная и фазовая модуляция (ЧМ, ФМ)	7
3. Детектирование модулированных колебаний	8
4. Практическая часть	10
5. Контрольные вопросы	12
<i>Приложение. Аналоговый интегральный перемножитель 526ПС1</i>	<i>13</i>
Литература	15

Введение

Модуляцией в общем случае называется изменение по заданному закону параметров какого-либо регулярного физического процесса. Например, для создания изображения в кинескопе телевизора ток луча изменяется с помощью специального электрода – модулятора.

Модуляция находит применение в измерительной технике. Наиболее прецизионные операционные усилители строятся по схеме МДМ (модулятор-демодулятор), что позволяет улучшить смещение нуля и температурный дрейф на несколько порядков (ОУ типа 140УД13).

В радиотехнике модуляция чаще всего применяется для переноса спектра сигнала. Для передачи сообщений (сигналов) на расстояние используются различные передающие среды и линии связи: эфир, провода и кабели, оптоволокно... Применение модуляции в системах связи диктуется, во-первых, необходимостью сопряжения частотных свойств сигнала и линии передачи (невозможно непосредственно передать по эфиру или оптоволокну низкочастотный сигнал, например речь); во-вторых, для передачи по линии связи одновременно нескольких сигналов (пара проводов может обеспечить несколько десятков телефонных переговоров, по эфиру мы получаем множество телевизионных и радиопрограмм). Кроме того, метод модуляции можно выбрать таким образом, чтобы свести к минимуму влияние различных помех и искажений, возникающих в передающей среде.

Процесс модуляции требует участия, по крайней мере, двух величин. Одна из них содержит всю передаваемую информацию и называется **модулирующим сигналом**, вторая представляет собой высокочастотное **несущее** колебание, которое модулируется посредством изменения одного или нескольких параметров. В подавляющем большинстве случаев в качестве несущей используется синусоидальное колебание, имеющее три параметра – *амплитуду, частоту и фазу*. В зависимости от изменяемого параметра различают три основных вида модуляции – **амплитудную, частотную и фазовую**.

В качестве несущего колебания могут использоваться также различные незатухающие функции, последовательности импульсов и даже шумы. Для последовательности импульсов параметрами модуляции могут быть амплитуда импульсов, длительность, частота следования. Например, в импульсных источниках питания и низкочастотных усилителях мощности для повышения КПД применяется широтно-импульсная модуляция – ШИМ.

Из всего спектра многочисленных видов модуляции практическая часть данной лабораторной работы содержит упражнения только с амплитудной и балансной модуляцией.

1. Амплитудная модуляция (АМ)

Одним из самых простых в технической реализации, а потому самым распространенным видом модуляции является амплитудная. Суть амплитудной модуляции состоит в следующем. Амплитуду высокочастотного несущего колебания изменяют по закону модулирующего сигнала следующим образом:

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

Для простоты в качестве модулирующего сигнала выбран синусоидальный. Величина m ($0 \leq m \leq 1$) называется коэффициентом глубины модуляции, Ω – частота модулирующего сигнала, ω_0 – частота несущей. Обычно $\Omega \ll \omega_0$.

На рис. 1 представлены последовательные операции при амплитудной модуляции и демодуляции (детектировании). Сигналы $a)$, $b)$ относятся к передатчику, сигналы $в)$, $г)$ – к приемнику.

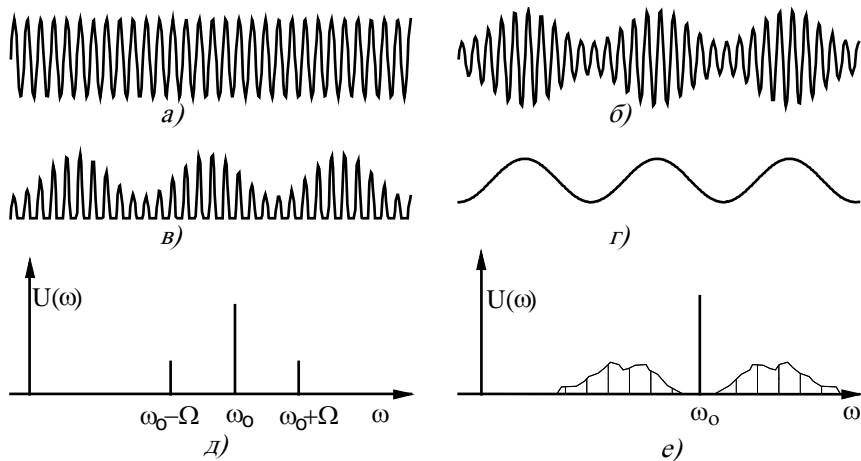


Рис. 1. Амплитудная модуляция. $a)$ – несущая; $б)$ – АМ-сигнал; $в), г)$ – детектирование; $д)$ – спектр однотонового АМ-сигнала; $е)$ – спектр при сложном модулирующем сигнале

Обычно АМ осуществляется путем нелинейного усиления суммы модулирующего колебания и несущей $U(t) = U_{мод}(t) + U_{нес}(t)$. Амплитудная характеристика нелинейного усилителя в первом приближении может быть представлена в виде

$$U_{вых}(t) = A \cdot U(t) + B \cdot U^2(t).$$

Для гармонического модулирующего сигнала $U_{мод}(t) = U_{\Omega} \cdot \cos \Omega t$ имеем:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вых}}(t) &= A \cdot (U_{\Omega} \cdot \cos \Omega t + U_{\omega} \cdot \cos \omega_0 t) + B \cdot (U_{\Omega} \cdot \cos \Omega t + U_{\omega} \cdot \cos \omega_0 t)^2 = \\
 &= A \cdot U_{\Omega} \cdot \cos \Omega t + \mathbf{A \cdot U_{\omega} \cdot \cos \omega_0 t} + B \cdot U_{\Omega}^2 \cdot \cos^2 \Omega t + B \cdot U_{\omega}^2 \cdot \cos^2 \omega_0 t + \\
 &+ \mathbf{2B \cdot U_{\Omega} U_{\omega} \cdot \cos \Omega t \cdot \cos \omega_0 t},
 \end{aligned} \quad (2)$$

где U_{ω} – амплитуда несущей.

Так как $\Omega \ll \omega_0$, то, применяя полосовой фильтр, можно отфильтровать низкочастотные составляющие и гармоники с удвоенной частотой несущей, так что в (2) останутся только два члена, выделенные жирным шрифтом. Вынося $\cos \omega_0 t$ за скобки, получим формулу (1).

Используя известную формулу для произведения $\cos \Omega t \cdot \cos \omega_0 t$, однотоновый АМ-сигнал можно представить в виде суперпозиции гармонических колебаний:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{АМ}}(t) &= A \cdot U_0 \cdot \cos \omega_0 t + 2B \cdot U_{\Omega} U_0 \cdot \cos \Omega t \cdot \cos \omega_0 t = \\
 &= A \cdot U_0 \cdot \cos \omega_0 t + B \cdot U_{\Omega} U_0 \cdot \cos(\omega_0 - \Omega)t + B \cdot U_{\Omega} U_0 \cdot \cos(\omega_0 + \Omega)t
 \end{aligned} \quad (3)$$

с несущей частотой ω_0 , нижней $(\omega_0 - \Omega)$ и верхней $(\omega_0 + \Omega)$ боковыми частотами. Спектр однотонового АМ-сигнала изображен на рис. 1, д.

Если несущая частота промодулирована не чистым тоном, а сигналом, занимающим некоторый спектр (речь, музыка, телевизионный видеосигнал), то с помощью преобразования Фурье можно показать, что обе боковые полосы симметрично отображают этот спектр (рис. 1, е), причем каждая из них содержит всю информацию о модулирующем сигнале и по ней этот сигнал можно восстановить полностью.

Несущее колебание никакой информации не несет, и наличие его в модулированном сигнале с энергетической точки зрения невыгодно. Так, амплитуда боковых частот АМ-сигнала при модуляции чистым тоном составляет $m/2$, а мощность каждой боковой $m^2/4$. Таким образом, даже при 100% модуляции ($m=1$) на обе боковые полосы приходится только половина мощности. Реально, во избежание перемодуляции на пиках сигнала и его искажения, величина m не превышает значения ~ 0.3 . При этом доля полезного сигнала составляет лишь 5% передаваемой мощности.

Для более эффективного использования мощности передатчика используют амплитудную модуляцию с подавлением несущей, так называемую **балансную модуляцию** (БМ). При балансной модуляции модулированный сигнал записывается в виде

$$U_{\text{БМ}}(t) = U_m \cdot \cos \Omega t \cdot \cos \omega_0 t = U_m/2 \cdot [\cos(\omega_0 - \Omega)t + \cos(\omega_0 + \Omega)t]. \quad (4)$$

Как видно из (4), спектр БМ-сигнала состоит только из двух боковых гармоник при полном отсутствии несущей. Осциллограмма и спектр БМ-сигнала для однотоновой модуляции приведены на рис. 2.

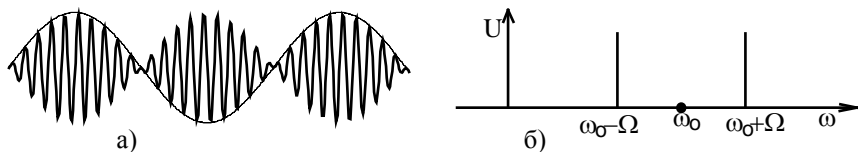


Рис. 2. Балансная модуляция: а) – осциллограмма модулированного сигнала; б) – спектр однотонового БМ-сигнала

В качестве простого АМ-модулятора можно использовать резонансный нелинейный усилитель, одно из схемных решений которого, используемое в данной работе, приведено на рис. 3.

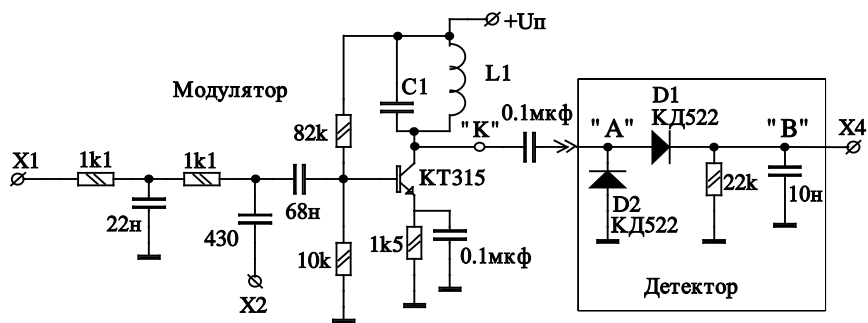


Рис. 3. Амплитудный модулятор и детектор

Работу схемы можно пояснить следующим образом. На вход X2 подается высокочастотный сигнал постоянной амплитуды (несущая), и транзисторный каскад работает как резонансный усилитель с максимальным коэффициентом усиления на частоте $\omega_0 \cong 1/\sqrt{L1 \cdot C1}$. Если на вход X1 подать низкочастотный сигнал достаточно большой амплитуды, то начинает сказываться нелинейность усиления транзистора, так что амплитуда высокочастотного колебания на выходе модулятора изменяется в соответствии с формулой (1). Можно сказать, что данный модулятор усиливает несущую, а модулирующий сигнал, смещая рабочую точку транзистора, меняет коэффициент усиления. Одновременно колебательный контур L1, C1 выполняет также функцию полосового фильтра (см. формулу (2)). Разумеется, полоса пропускания резонансного усилителя должна быть достаточной для прохождения всего спектра модулирующего сигнала.

Для реализации балансной модуляции (см. формулу (4)) нужно просто перемножить два сигнала – передаваемый и несущую, что можно сделать с помощью аналоговых перемножителей. Промышленностью выпускается большое число аналоговых перемножителей в интегральном исполнении. В настоящей работе для получения модуляции с подавленной несущей используется перемножитель типа 526ПС1. Работа такого перемножителя описана в приложении.

2. Частотная и фазовая модуляция (ЧМ, ФМ)

При частотной и фазовой модуляции полезный сигнал передается при помощи изменения соответственно частоты и фазы несущего колебания при постоянной амплитуде. Некоторая сложность в понимании этих видов модуляции заключается в том, что изменение во времени частоты приводит к изменению закона нарастания фазы и наоборот, поскольку частота и фаза несущего колебания связаны соотношением $\omega(t) = d\psi/dt$.

Пусть несущее колебание записывается в виде $U_{\text{нес}} = U_0 \cos(\omega t + \varphi)$. При фазовой модуляции полная **фаза** несущей связана с модулирующим сигналом $s(t)$ зависимостью

$$\psi(t) = \omega_0 t + k_1 \cdot s(t), \quad (5)$$

где ω_0 – частота несущей при отсутствии модулирующего сигнала.

ФМ-колебание запишется в виде

$$U_{\text{ФМ}}(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + k_1 \cdot s(t)]. \quad (6)$$

При частотной модуляции **частота** несущей определяется выражением (сравните с (5)):

$$\omega(t) = \omega_0 + k_2 \cdot s(t). \quad (7)$$

Поскольку полная фаза связана с мгновенной частотой соотношением

$$\psi(t) = \int_{-\infty}^t \omega(\tau) d\tau + \text{const}, \quad (8)$$

ЧМ-колебание можно записать в виде

$$U_{\text{ЧМ}}(t) = U_0 \cos \left[\omega_0 t + k_2 \int_{-\infty}^t s(\tau) d\tau \right]. \quad (9)$$

Вообще ЧМ и ФМ-колебания, которые часто объединяются общим термином **угловая модуляция**, с точностью до постоянной фазы описываются одним выражением

$$U(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + k \cdot s(t)]. \quad (10)$$

Колебание $U(t)$ можно рассматривать как сигнал, модулированный по фазе сигналом $s(t)$ или модулированный по частоте сигналом $d[s(t)]/dt$.

Для однотонального ЧМ-сигнала, исходя из (8), полная фаза имеет вид

$$\psi(t) = \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin(\Omega t + \varphi_0), \quad (11)$$

где $\Delta\omega$ – девиация частоты. Величина $m = \Delta\omega/\Omega$ называется **индексом** однотональной угловой модуляции и представляет собой девиацию фазы.

Таким образом, однотональный ЧМ-сигнал можно записать в виде

$$U_{\text{ЧМ}}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + m \cdot \sin \Omega t). \quad (12)$$

Аналитическая формула записи для ФМ аналогична, отличие же состоит в интерпретации индекса m . В случае ЧМ *девиация* $\Delta\omega$ пропорциональна амплитуде модулирующего сигнала и не зависит от его частоты. В случае же ФМ сам индекс m пропорционален амплитуде модулирующего сигнала, следовательно, девиация $\Delta\omega$ линейно растет с частотой Ω . Другими словами, параметрами однотоновой угловой модуляции являются $m = \text{const}$ для ФМ, $\Delta\omega = \text{const}$ для ЧМ. В случае ЧМ индекс модуляции зависит от частоты модулирующего сигнала: $m = \Delta\omega/\Omega$.

Спектральный анализ угловой модуляции требует более сложного математического аппарата, чем анализ АМ-сигналов. Подробное рассмотрение можно найти в литературе [2], [6].

Наиболее простой способ получения ЧМ/ФМ – включить в колебательный контур LC-генератора специальный диод – варикап, емкость которого зависит от приложенного к нему напряжения. Модулирующий сигнал меняет это напряжение и, соответственно, частоту и фазу несущей.

3. Детектирование модулированных колебаний

Детектированием называется процесс, обратный модуляции, когда детектор выделяет из модулированного колебания модулирующий сигнал. В настоящей работе рассматривается только детектирование АМ-сигнала. Другие виды детектирования описаны в литературе [2, 6].

Детектирование АМ и БМ-сигналов. Наиболее просто детектирование осуществляется при помощи нелинейного элемента, в качестве которого обычно используется диод. На рис. 3 приведена схема амплитудного детектора с удвоением напряжения. Подробно теория диодного детектора рассмотрена в литературе [1÷6].

Основным недостатком диодного амплитудного детектора является плохая работа на малых сигналах, так как вольтамперная характеристика диода в диапазоне напряжений смещения $0 \div 1$ В сильно нелинейная. Вследствие этого возникают нелинейные искажения сигнала, сужается динамический диапазон.

Этого недостатка лишен синхронный детектор (СД), представляющий собой линейную систему с периодически изменяющимися параметрами. Для работы СД требуется сформировать управляющий сигнал, *синфазный с несущим колебанием*.

Один из вариантов приведен на рис. 4, а (упрощенная схема). В качестве элементов с периодически изменяющимися параметрами используются диоды. Диоды попарно коммутируются переменным напряжением,

когерентным с несущим колебанием, которое подается на вход X2. На практике этот сигнал обычно получают выделением, усилением и ограничением по амплитуде несущего колебания. К зажимам X3 попеременно подключаются противофазные обмотки первого трансформатора (последовательно включенные противофазные обмотки второго трансформатора имеют нулевое реактивное сопротивление). При условии $\Delta\varphi = 0$ или $\Delta\varphi = \pi$ низкочастотная составляющая выходного сигнала имеет максимальное значение, а при $\Delta\varphi = \pm\pi/2$ равна нулю. Если амплитуда напряжения на входе X2 достаточно велика, то пары диодов либо включены, либо выключены. При этом выходное напряжение СД пропорционально амплитуде входного сигнала. Для нормальной работы данного СД трансформаторы должны обладать хорошей симметрией.

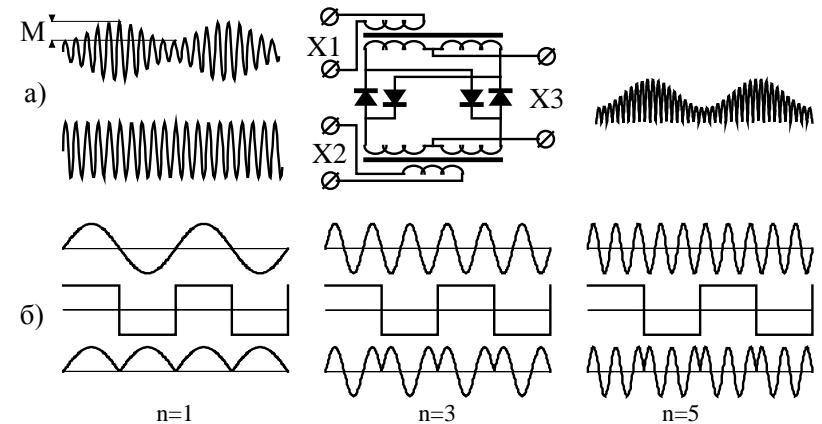


Рис. 4. Синхронный детектор

Отметим одну важную характеристику синхронного детектора, изображенного на рис. 4, а. Так как диоды работают в ключевом режиме, то действие переменного напряжения несущей (вход X2) эквивалентно действию прямоугольного сигнала со скважностью 2 (меандр). Такой сигнал, согласно преобразованию Фурье, представляется в виде суммы бесконечного числа нечетных гармоник, кратных ω_0 с амплитудами, пропорциональными $1/k$, где $k = 1, 3, 5, \dots$. Поскольку умножению функций времени соответствует свертка спектров, СД будет уверенно детектировать все частоты $k \cdot \omega_0$. Рисунок 4, б поясняет этот эффект, который приводит к тому, что такой СД "собирает" шумы, помехи, побочные сигналы. Избавиться от этого недостатка можно применяя полосовой фильтр на входе, который пропускает лишь частоты $\omega_0 - \Omega < \omega < \omega_0 + \Omega$, но при перестройке на другую частоту этот фильтр тоже нужно перестраивать.

Другой вариант реализации синхронного детектирования – произвести умножение АМ-сигнала на несущее колебание с помощью аналогового перемножителя. Пусть АМ-сигнал представлен в форме

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

Умножая его на $\cos \omega_0 t$, на выходе аналогового перемножителя имеем:

$$U_{AM}(t) \cdot \cos \omega_0 t = \frac{U_0}{2} + \frac{mU_0}{2} \cos \Omega t + \frac{U_0}{2} (1 + m \cdot \cos \Omega t) \cos 2\omega_0 t \quad (13)$$

Первый и третий члены этого выражения легко отфильтровываются с помощью разделительной емкости и ФНЧ, и остается только второй член, представляющий полезный сигнал.

При детектировании АМ-сигналов с подавленной несущей устройство приемника существенно усложняется, так как в месте приема необходимо синтезировать синусоиду, когерентную с подавленной несущей.

Детектирование ЧМ и ФМ-сигналов. Для демодуляции ЧМ-сигналов применяются частотные детекторы, состоящие из линейной частотно-зависимой цепи, преобразующей частотную модуляцию в амплитудную, и диодного амплитудного детектора. Частотно-зависимая цепь обычно представляет собой два связанных колебательных контура, настроенных на частоту несущей.

Для детектирования ФМ-сигналов применяются обычные частотные детекторы. Разница состоит в том, что на выходе детектора будем иметь производную по времени от модулирующего сигнала. Если дополнить схему интегрирующей цепочкой, то получим исходный сигнал. Заметим, что этот метод не годится, когда фаза изменяется скачкообразно или есть необходимость сравнения фазы с опорным колебанием. В этом случае применяются специальные фазовые детекторы.

4. Практическая часть

На монтажной плате собраны схемы модулятора, детектора и перемножителя.

Просьба не разбирать и не собирать заново эти схемы. Для выполнения работы следует соединить эти схемы между собой и с приборами, находящимися на рабочем столе (генераторы, источник питания, осциллограф).

4.1. Амплитудный модулятор и диодный детектор. Подключите к схеме модулятора (рис. 3) на вход X2 напряжение от генератора синусоидального сигнала амплитудой $\sim 0,05$ в. Изменяя частоту генератора в пределах от 130 до 200 кГц, найдите частоту, при которой значение сигнала на выходе будет максимальным.

Подключите ко входу X1 модулирующий сигнал частотой $100 \div 1000$ Гц и амплитудой 0.1В от второго генератора синусоидального сигнала. С помощью осциллографа наблюдайте модулированный сигнал в точке "К".

Соберите на макетной плате схему амплитудного детектора по рис. 3. Наблюдайте сигналы в точках "А" и "В" детектора. Установите глубину

модуляции $m = 50\%$. Измерьте по осциллографу амплитуду сигнала на выходе детектора и размах изменения амплитуды сигнала на входе (величина "М" на рис. 4). Их отношение называется **коэффициентом детектирования** $k_{\text{дет}}$. Измерьте $k_{\text{дет}}$ в режиме большого ~ 5 В и малого ~ 1.5 В сигнала (имеется в виду максимальный размах напряжения в точке "К"). Сравните нелинейные искажения синусоиды на выходе детектора.

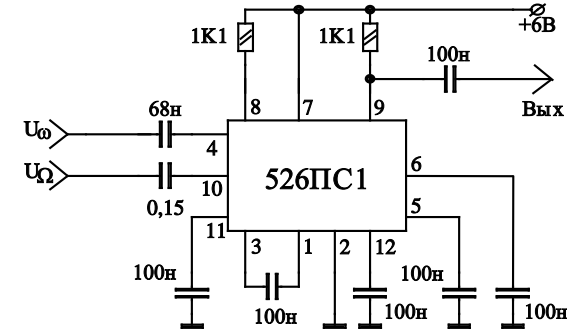


Рис. 5. Балансный модулятор

4.2. Балансный модулятор. Подайте на вход U_{ω} перемножителя (рис. 5) сигнал от генератора синусоидального сигнала амплитудой 0.05 В, частотой несколько сотен килогерц. Ко входу U_{Ω} подсоедините сигнал от второго генератора частотой несколько сотен герц, амплитудой 0.1 В. Зарисуйте полученную балансную модуляцию. Измените частоту Ω до значения приблизительно в 5÷10 раз меньше ω_0 . Обратите внимание на фазу несущей в момент перехода через ноль.

4.3. Синхронное детектирование АМ-сигнала. Уменьшите Ω до первоначальной (100÷1000 Гц) и снова подайте сигналы с частотой Ω и ω_0 на входы транзисторного модулятора (рис. 3). Вход U_{ω} перемножителя последовательно с сопротивлением 51 кОм соедините с выходом модулятора.

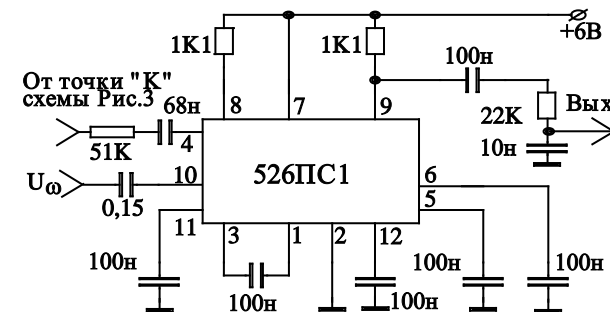


Рис. 6. Синхронный детектор

На второй вход перемножителя подайте несущую частоту ω_0 от того же генератора (рис. 6). На выходе получите протектированный сигнал. Снова измерьте $k_{дет}$ в режиме большого и малого сигнала, как в п. 4.1. Сравните результаты.

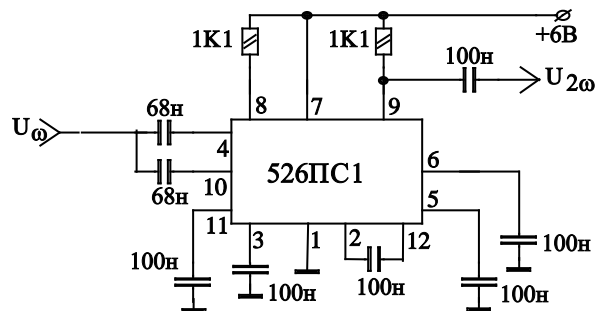


Рис. 7. Удвоитель частоты

4.4. Умножитель частоты. На аналоговых перемножителях легко реализуются также широкодиапазонные умножители частоты. Например, для удвоения частоты нужно на оба входа подать один и тот же синусоидальный сигнал $U_x = U_y = U \cdot \cos(\omega_0 t)$, тогда выходное колебание запишется в виде

$$U_{\text{вых}} = AU^2 \cos^2 \omega_0 t = \frac{AU^2}{2} + \frac{AU^2}{2} \cos 2\omega_0 t. \quad (14)$$

Постоянная составляющая отфильтровывается разделительным конденсатором и остается удвоенная частота. Такой умножитель частоты не требует перестраиваемых резонансных цепей и обладает большим частотным диапазоном.

Подайте сигнал частотой ω_0 на оба входа, согласно схеме (рис. 7). Наблюдайте удвоение частоты.

5. Контрольные вопросы

1. Перечислите виды модуляции. Какие параметры несущего колебания связаны с передаваемым сигналом?
2. Какая полоса в частотном диапазоне требуется для качественной передачи музыки (20 Гц ÷ 20 кГц) при обычной амплитудной модуляции?
3. От чего зависит распределение мощности в спектре однотонового АМ-сигнала?
4. Как будет работать схема детектора, изображенного на рис. 3, если *a)* диод D2 убрать; *б)* диод D1 заменить резистором 10 кОм?
5. Объясните принцип работы синхронного детектора.

Дополнительные вопросы

- Придумайте и нарисуйте схему амплитудного модулятора.
- В чем заключаются сложности устройства приемников при использовании АМ-сигнала с подавленной несущей?

Приложение. Аналоговый интегральный перемножитель 526ПС1

Упрощенная схема перемножителя показана на рис. 8. В этом перемножителе применен метод нормировки токов. Перемножители с нормировкой токов обладают наилучшей совокупностью таких параметров, как линейность, широкополосность, температурная стабильность, прямая передача входного сигнала на выход по сравнению с перемножителями на управляемых сопротивлениях, с переменной крутизной или логарифмическими. Как правило, они обладают дифференциальным входом, а следовательно, дополнительной схемотехнической универсальностью.

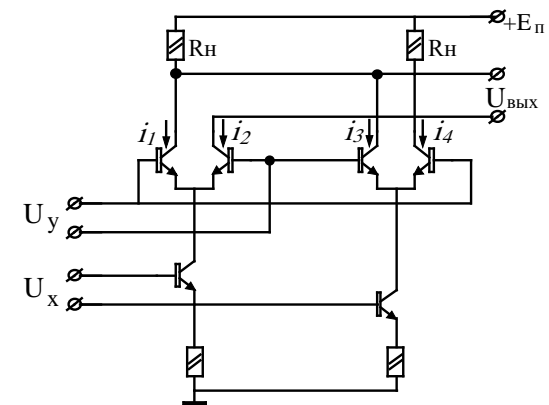


Рис. 8. Аналоговый перемножитель 526ПС1 (упрощенная схема)

Выходное напряжение определяется формулой

$$U_{\text{вых}} = R_n(i_1 + i_3) - R_n(i_2 + i_4). \quad (\text{П1})$$

Если оба входных напряжения равны нулю, т.е. $U_x = U_y = 0$, то все токи одинаковы: $i_1 = i_2 = i_3 = i_4$. В этом случае $U_{\text{вых}} = 0$.

Если же, например, $U_y = 0$, а $U_x > 0$, то токи i_1 и i_2 увеличатся, а токи i_3 и i_4 уменьшатся. При малом U_x связи между токами и напряжениями можно представить в виде

$$i_1 = i_2 = i_0(1 + K_x U_x); i_3 = i_4 = i_0(1 - K_x U_x), \quad (\text{П2})$$

где K_x – коэффициент пропорциональности. Подставив (П2) в (П1), получим, что и в этом случае $U_{\text{вых}} = 0$. При $U_x = 0$ и $U_y > 0$

$$i_1 = i_2 = i_0(1 - K_y U_y); i_3 = i_4 = i_0(1 + K_y U_y), \quad (\text{П3})$$

также $U_{\text{вых}} = 0$. Если оба напряжения не равны нулю, то

$$\begin{aligned} i_1 &= i_0(1 + K_x U_x) \cdot (1 + K_y U_y); \\ i_2 &= i_0(1 + K_x U_x) \cdot (1 - K_y U_y); \\ i_3 &= i_0(1 - K_x U_x) \cdot (1 - K_y U_y); \\ i_4 &= i_0(1 - K_x U_x) \cdot (1 + K_y U_y). \end{aligned} \quad (\text{П4})$$

Подставив (П4) в (П1), получим $U_{\text{вых}} = 4 \cdot K_x \cdot K_y \cdot i_0 \cdot U_x U_y$, то есть выходное напряжение пропорционально произведению входных напряжений.

Технические характеристики 526ПС1 (при $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$, $f = 10 \text{ МГц}$)

Напряжение источников питания _____ $U_{\text{н.п.}} = 6 \pm 0.6 \text{ В}$;
 Потребляемый ток _____ $I_{\text{пот}} < 5 \text{ мА}$;
 Коэффициент подавления сигнала по входу _____ $K_{\text{ос.вх.}} > 8 \text{ дБ}$;
 Коэффициент подавления опорного сигнала _____ $K_{\text{ос.оп.}} > 65 \text{ дБ}$;
 Верхняя граничная частота _____ $f_{\text{г}} \approx 40 \text{ МГц}$.

Литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. М.: Высшая школа, 1991.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986.
3. Каяцкас А.А. Основы радиоэлектроники. М.: Высшая школа, 1988.
4. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. М.: Радио и связь, 1985.
5. Основы радиоэлектроники. Под редакцией Г.Д. Петрухина. М.: Изд-во МАИ, 1993.
6. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. школа, 1988.

Подписано в печать 26.02.1997	Формат 60x84 1/16
Печать офсетная. Уч.-изд.л. – 1.	Тираж 100 экз.
Заказ №	
Редакционно-издательский отдел Новосибирского университета. Участок оперативной полиграфии НГУ. 630090, Новосибирск, 90, ул. Пирогова, 2.	

