

Содержание

1. Введение.....	4
2. Способы амплитудной модуляции.....	5
2.1. Управление амплитудой генерируемых колебаний в самом автогенераторе.....	5
2.2. Управление амплитудой высокочастотных колебаний в отдельном внешнем устройстве.....	6
3. Способы детектирования амплитудно-модулированных колебаний.....	8
3.1 Амплитудный диодный детектор.....	8
3.2 Синхронный детектор.....	12
4. Задание.....	15
4.1. Генератор опорного (несущего) колебания.....	15
4.2. Модулятор.....	15
4.3. Последовательный диодный детектор.....	17
4.4. Синхронный детектор.....	18
Приложение.....	20
Список литературы.....	23

1. Введение

Амплитудная модуляция (АМ) – это процесс медленного изменения амплитуды несущего колебания высокой частоты. Обычно, несущим колебанием является синусоидальное колебание: $X(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$. В этом случае формула амплитудно-модулированного колебания будет иметь вид:

$$X(t) = A_0 (1 + f(t)) \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1)$$

В формуле (1) $f(t)$ – модулирующий сигнал, который должен удовлетворять двум условиям: $f(t) > -1$ – т.к. амплитуда колебаний положительна по определению и $|df(t)/dt| \ll \omega_0$ – это условие медленности изменения амплитуды. Выделяется важный частный случай – гармоническая АМ: $X(t) = A_0 (1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, причем, $\Omega \ll \omega_0$ и $0 < m < 1$. Константа m называется коэффициентом модуляции.

Обратный процессу модуляции процесс преобразования модулированного высокочастотного колебания, в результате которого получается низкочастотный модулирующий сигнал $f(t)$, называется детектированием (демодуляцией) модулированного колебания.

Процессы модуляции и демодуляции широко используются в технике радиосвязи как по эфиру, так и по искусственным каналам связи, а также находят применение в физическом и техническом эксперименте при формировании, приеме, усилении и преобразовании сигналов в экспериментальных установках.

2. Способы амплитудной модуляции

Как следует из формулы (1), модулятор должен осуществить перемножение низкочастотного модулирующего сигнала и несущего колебания. Существует много способов амплитудной модуляции. Их можно разбить на два класса: 1) управление амплитудой генерируемых колебаний в самом автогенераторе и 2) управление амплитудой высокочастотных колебаний в отдельном внешнем устройстве. Способы первого класса используются в основном в автогенераторных датчиках физических величин, а способы второго класса – в системах связи, а также при усилении и преобразовании сигналов в экспериментальных установках.

2.1. Управление амплитудой генерируемых колебаний в самом автогенераторе

Рассмотрим автогенератор, схема которого изображена на рис. 1. Это известная схема автогенератора с эмиттерной связью на дифференциальной паре Т1 и Т2, причем эмиттеры питаются от генератора тока на транзисторе Т3.

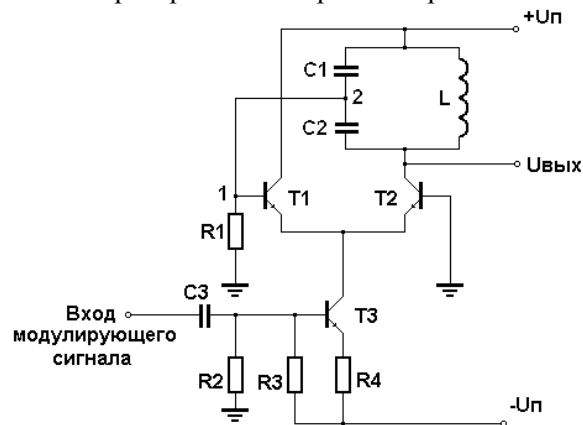


Рис. 1. Схема автогенератора с управляемой амплитудой колебаний

Генератор тока управляется модулирующим сигналом (напряжением) $f(t)$. Как следует из приведенной схемы, ток генератора тока при условии $R_4 \gg r_e$ будет зависеть от модулирующего сигнала по формуле

$$I = I_0 + f(t)/R_4, \quad (2)$$

где I_0 – ток в отсутствие модулирующего сигнала, а r_e – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода транзистора Т3, равное u_T/I_0 (u_T – тепловой потенциал).

В этом автогенераторе амплитуда A генерируемых колебаний при достаточно большом коэффициенте усиления по петле обратной связи и при выполнении условия $A < U_n$ зависит от тока I по формуле

$$A = 2R_{\text{экв}} I / \pi, \quad (3)$$

где $R_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление колебательного контура при резонансе. Подставляя в формулу (3) выражение для тока (2), приходим к выводу, что в данной схеме автогенератора можно осуществлять амплитудную модуляцию генерируемых высокочастотных колебаний низкочастотным модулирующим сигналом $f(t)$.

2.2. Управление амплитудой высокочастотных колебаний в отдельном внешнем устройстве

Если в схеме на рис. 1 разорвать цепь обратной связи (исключить соединение точки 1 схемы с точкой 2 так, что точка 1 схемы будет входом), то автогенератор превратится в узкополосный усилитель колебаний высокой частоты. Усилитель будет работать в линейном режиме при достаточно малой амплитуде входного сигнала ($u_{\text{вх}} < 2u_T$, на практике $u_{\text{вх}} \leq 30$ мВ). Коэффициент усиления усилителя пропорциона-

лен крутизне транзистора Т2, а она линейно зависит от тока I . Следовательно, изменяя ток по формуле (2), можно осуществлять амплитудную модуляцию высокочастотного колебания, поданного на вход усилителя.

Однако эта схема модулятора имеет недостатки.

1. Принципиальным является наличие колебательного контура, настроенного на частоту несущего колебания, т.к. иначе на выходе, наряду с модулированным высокочастотным колебанием, присутствовал бы и модулирующий низкочастотный сигнал. В связи с этим, при изменении частоты несущего высокочастотного колебания нужно перестраивать и колебательный контур.
2. Имеется ограничение на амплитуду несущего колебания; при превышении этого ограничения линейность модулятора по входу несущего колебания нарушается.
3. Область частот модулирующего низкочастотного сигнала ограничена полосой пропускания колебательного контура.

С помощью дифференциальных пар транзисторов можно создать устройства, лишенные этих недостатков и осуществляющие перемножение двух произвольных входных сигналов в широком интервале амплитуд. Они выпускаются электронной промышленностью в виде интегральных микросхем. О том, как устроены эти микросхемы, можно узнать из соответствующих книг (например, из [3]). Ознакомиться со схемотехникой интегральных перемножителей можно также по описанию к лабораторной работе № 91 кафедры радиотехники [4].

С помощью интегрального перемножителя также можно осуществлять амплитудную модуляцию. Для этого на один вход перемножителя нужно подать несущее колебание, а на другой – сумму постоянного и модулирующего сигналов. Постоянное смещение должно обеспечивать постоянство знака суммы сигналов на модулирующем входе. Изменяя величину смещения можно изменять коэффициент модуляции. Перемножитель используется в радиотехнике и для многих других целей. В этой лабораторной работе используется микросхема К525ПС2.

3. Способы детектирования амплитудно-модулированных колебаний

3.1. Амплитудный диодный детектор

Как следует из самого названия, в этом детекторе используется безынерционное устройство, проводящее электрический ток только в одном направлении – твердотельный или вакуумный диод, – а выходной сигнал должен быть пропорционален амплитуде входного. На практике безынерционность и способность проводить электрический ток только в одном направлении выполняются только приближенно, а пропорциональность выходного сигнала амплитуде входного возможна только при достаточно большом входном сигнале.

В амплитудном диодном детекторе ток диода заряжает конденсатор и выходным сигналом является напряжение на конденсаторе либо сумма входного колебания и напряжения на конденсаторе. Две основных схемы амплитудных диодных детекторов изображены на рис. 2. На рис. 2а изображен последовательный, а на рис. 2б – параллельный диодный детектор. В последовательном диодном детекторе выходным сигналом является напряжение на конденсаторе, а в параллельном – сумма входного напряжения и напряжения на конденсаторе.

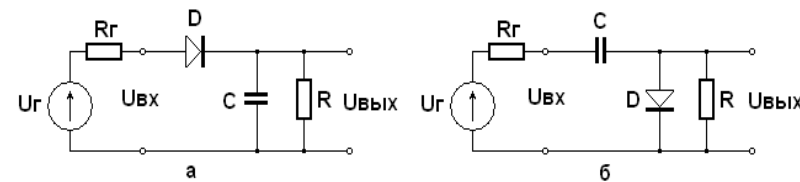


Рис. 2. Схемы амплитудных диодных детекторов: а – последовательный диодный детектор, б – параллельный диодный детектор

Несмотря на простоту схем на рис. 2, их точный анализ оказывается весьма непростым из-за наличия в схемах диода

Д. Обычно ограничиваются только анализом вышеприведенных схем при синусоидальном напряжении U_r и модели идеального диода. Это означает, что ток через диод может протекать только в одном направлении и его сопротивление при этом равно R_d . При изменении направления тока диод переключается, и его сопротивление становится равным бесконечности. Обратный переход в проводящее состояние происходит когда напряжение на диоде меняет знак с запирающего на отпирающее.

Следовательно, как при включенном, так и при выключенном диоде схемы на рис. 2 являются линейными и можно найти решение в общем виде для каждого из этих двух интервалов времени. Для нахождения установившегося вынужденного периодического решения (установившегося выходного напряжения детектора) на всем периоде нужно правильно «сшить» решения, соответствующие разным состояниям диода, а для этого необходимо решить систему трансцендентных алгебраических уравнений.

Рассмотрим, например, последовательный детектор. Будем считать, что ЭДС генератора сигнала в схеме рис. 2а изменяется по закону косинуса $U_r = A \cos \varphi$, где $\varphi = \omega t$, а фазы переключения диода обозначим φ_1 и φ_2 ($\varphi_1 < \varphi_2$). Тогда на интервале зарядки безразмерное напряжение на конденсаторе будет изменяться по закону

$$E_3 = K_3 \cos(\varphi + \varphi_3) + E_{30} \exp\left(\frac{\varphi_1 - \varphi}{\theta_3}\right), \quad \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2, \quad (4)$$

а на интервале разрядки – по закону:

$$E_p = E_{p0} \exp\left(\frac{\varphi_2 - \varphi}{\theta_p}\right), \quad \varphi_2 \leq \varphi \leq 2\pi + \varphi_1. \quad (5)$$

$$\text{В формулах (4) и (5) } K_3 = \frac{R}{R + R_r + R_d} \frac{1}{\sqrt{1 + \theta_3^2}} \text{ и}$$

$\varphi_3 = -\arctg \theta_3$ – модуль и фаза вынужденной компоненты решения на интервале зарядки,

$\theta_3 = \omega R(R_r + R_d)C / (R + R_r + R_d)$ и $\theta_p = \omega RC$ – безразмерные постоянные времени зарядки и разрядки конденсатора, а $E = U_c / A$.

В моменты переключения диода напряжение на конденсаторе равняется ЭДС генератора, отсюда получаются уравнения:

$$\cos \varphi_1 = K_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_3) + E_{30}, \quad (6)$$

$$\cos \varphi_2 = K_3 \cos(\varphi_2 + \varphi_3) + E_{30} \exp\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\theta_3}\right), \quad (7)$$

$$\cos \varphi_2 = E_{p0}, \quad (8)$$

$$\cos \varphi_1 = E_{p0} \exp\left(\frac{\varphi_2 - 2\pi - \varphi_1}{\theta_p}\right). \quad (9)$$

Константы E_{30} и E_{p0} входят в уравнения линейным образом и легко выражаются через φ_1 и φ_2 , а для фаз переключения диода получаем систему уравнений:

$$\cos \varphi_1 = (\cos \varphi_2) \exp\left(\frac{\varphi_2 - 2\pi - \varphi_1}{\theta_p}\right). \quad (10)$$

$$\cos \varphi_2 = K_3 \cos(\varphi_2 + \varphi_3) + (\cos \varphi_1 - K_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_3)) \exp\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\theta_3}\right). \quad (11)$$

Такие уравнения можно решить численно. В приложении приведены листинги программ, написанных в системе компьютерной математики MATLAB, позволяющих вычислить вынужденное выходное напряжение, коэффициент передачи k_d и входное сопротивление $R_{вх}$ ($R_{вх}$ и k_d будут определены ниже) последовательного и параллельного амплитуд-

ного диодного детектора по значениям R_r, R_d, R, C и частоты входного синусоидального напряжения.

Нетрудно убедиться, что при любых значениях R_r, R_d, R и C имеется детекторный эффект – в составе $U_{\text{вых}}$ появляется постоянное напряжение $U_{0\text{вых}}$, пропорциональное амплитуде входного сигнала. Отношение $U_{0\text{вых}}$ к амплитуде ЭДС входного сигнала A называется коэффициентом передачи детектора k_d (для схем на рис. 2 $k_d < 1$) $k_d = U_{0\text{вых}} / A$. (12)

Однако на практике при детектировании АМ-колебаний $U_{0\text{вых}}$ должно отслеживать изменение амплитуды входного сигнала, а k_d должно быть, по возможности, больше. Для достижения этих результатов нужно стремиться к выполнению следующих неравенств:

$$\Omega < \frac{1}{RC} \ll \omega \quad \text{и} \quad R_r \ll R, R_d \ll R. \quad (13)$$

В неравенствах (13) Ω – максимальная частота в спектре модулирующего сигнала, а ω – частота несущего колебания. При выполнении неравенств (13) АМ-детекторы можно рассчитывать по приближенным формулам (см., например, книгу Е.И. Манаева [1]); на практике параметры детектора (в том числе k_d) часто определяют экспериментально.

При расчете детектора также важно знать, насколько сильно он нагружает источник сигнала. Для этого вводят понятие входного сопротивления детектора $R_{\text{вх}}$. $R_{\text{вх}}$ это такой резистор, при котором генератор сигнала, нагруженный на этот резистор, затрачивает ту же мощность, как и в случае нагрузки генератора детектором. Значения $R_{\text{вх}}$ для последовательного и параллельного детекторов легко определить в предельном случае $k_d \rightarrow 1$. В этом случае для последовательного

детектора $R_{\text{вх}} = R/2$, а для параллельного – $R_{\text{вх}} = R/3$. Эти значения могут служить ориентирами для $R_{\text{вх}}$ при k_d , близких к единице. В общем случае $R_{\text{вх}}$ приходится определять численно либо экспериментально.

3.2. Синхронный детектор

С теоретической точки зрения синхронный детектор проще диодного, но на практике его применение требует более сложных аппаратных средств, а главное, требует вспомогательного «опорного» синусоидального колебания, когерентного с несущим колебанием АМ сигнала. В одном из вариантов синхронного детектора он состоит из перемножителя и фильтра нижних частот (см. рис. 3). Пусть АМ-сигнал дан формулой (1),

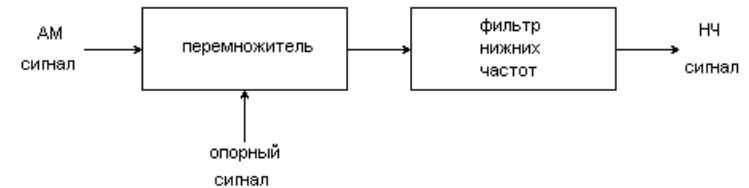


Рис.3. Блок-схема синхронного детектора с перемножителем

а опорное колебание – формулой $Y(t) = B_0 \cos(\omega_0 t)$. После перемножения получим сигнал

$$\frac{A_0 B_0 \cos \varphi_0}{2} (1 + f(t)) + \frac{A_0 B_0 (1 + f(t))}{2} \cos(2\omega_0 t + \varphi_0). \quad (14)$$

После фильтра нижних частот второй член в формуле (14) исчезнет и останется только первый член, содержащий модулирующий сигнал и константу, умноженные на $A_0 B_0 \cos(\varphi_0)/2$. Из формулы (14) также следует, что сдвиг фаз между опорным колебанием и несущей АМ-сигнала не

должен равняться или быть близким к $\pi/2$, т.к. в противном случае НЧ-сигнал будет отсутствовать или будет очень мал. Лучше всего, чтобы опорное колебание и несущая были синфазны, но и небольшая расфазировка почти не ухудшает результат. Следует также отметить, что увеличение амплитуды опорного колебания приводит к пропорциональному увеличению продетектированного сигнала (эффект усиления при гетеродинировании).

Часто используемой разновидностью синхронного детектора является детектор по схеме на рис. 3, в которой перемножитель заменен на коммутатор, управляемый опорным колебанием. Например, если опорное колебание и несущая синфазны и коммутатор пропускает входной АМ-сигнал при положительных значениях опорного колебания, а иначе – не пропускает, то на выходе коммутатора будут присутствовать только положительные полуволны входного сигнала и, следовательно, будет детекторный эффект со значением k_d равным $1/\pi$. Если коммутатор такой, что используются и отрицательные полуволны сигнала, то значение k_d удваивается. Коммутаторный синхронный детектор также чувствителен к разности фаз между опорным колебанием и несущей, а его выходной сигнал не зависит от амплитуды опорного колебания.

Важным преимуществом синхронного детектора над амплитудным является его лучшая помехоустойчивость. Пусть на входе синхронного детектора наряду с полезным присутствует мешающий сигнал, спектр которого не перекрывается со спектром полезного сигнала. После синхронного детектирования взаимное расположение спектров сигнала и помехи сохраняется, а спектр сигнала располагается в районе нулевой частоты. Таким образом, сигнал помехи после детектора располагается на частотах более высоких, чем частоты полезного сигнала. С помощью фильтра низких частот этот мешающий сигнал может быть легко подавлен. Эта особенность синхронного детектора является причиной его широкого

применения в приборах и экспериментальных установках для детектирования слабых узкополосных сигналов на фоне помех и шумов.

Из формулы (14) следует также другая приятная особенность синхронного детектора: его способность успешно детектировать так называемые перемодулированные и балансно-модулированные сигналы. У этих сигналов нарушается условие $f(t) > -1$, так что амплитудный множитель в формуле (1) может менять знак. Строго говоря, такие сигналы уже нельзя считать амплитудно-модулированными, и детектировать их с помощью амплитудных диодных детекторов оказывается невозможно.

Реализовать синхронный детектор можно с помощью схемы на рис. 1 если разорвать цепь обратной связи и заменить колебательный контур параллельной RC -цепочкой. При выборе постоянной времени этой цепочки нужно руководствоваться неравенством (13), а значение R должно быть таким, чтобы на нем падала примерно половина напряжения питания. Опорное колебание можно подать в точку 1 схемы, а АМ-сигнал, на вход модуляции. Если опорное колебание имеет небольшую амплитуду (не более 20 мВ), то схема работает как синхронный детектор с перемножителем, а если амплитуда опорного колебания большая (более 500 мВ) – то как синхронный детектор с коммутатором. Если АМ-сигнал слабый (единицы милливольт или меньше), то целесообразно подать его в точку 1 схемы, а опорное колебание большой амплитуды – на вход модуляции. В этом случае схема будет работать как синхронный детектор с перемножителем. Разумеется, синхронный детектор можно также построить по блок-схеме на рис. 3, используя интегральную микросхему К525ПС2. При этом безразлично, на какой вход схемы подавать опорное колебание, а на какой АМ-сигнал.

4. Задание

4.1. Генератор опорного (несущего) колебания

В левой части лабораторного макета соберите генератор

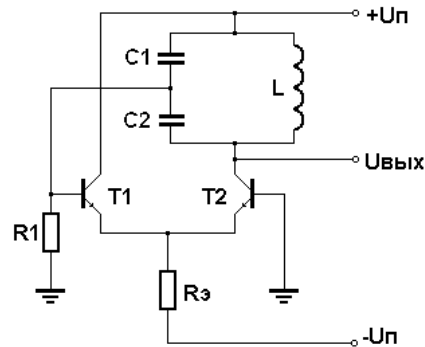


Рис. 4. Схема генератора опорного (несущего) колебания

опорного (несущего) колебания по схеме на рис. 4. На этой схеме: $+U_n = 12$ В, $-U_n = -12$ В, транзисторы T_1 и T_2 – микросборка 159НТ, $L \approx 100 \div 50$ мкГн, $C_2 \approx 1000$ пФ, $C_1 \approx 30 C_2$, $R_1 \approx 1$ кОм. Подберите резистор R_3 ($R_3 > 10$ кОм) так, чтобы амплитуда колебаний составляла на выходе около 8 В. Измерьте частоту колебаний f_0 .

4.2. Модулятор

Соберите модулятор по схеме на рис. 5. На этой схеме: DA – микросхема K525ПС2, резисторы R_1 и R_2 равны друг другу и составляют примерно 30 кОм, $+U_n = 12$ В, $-U_n = -12$ В, конденсатор C – разделительный – около 0.1 мкФ. На ножку № 13 (вход Y) микросхемы через разделительный конденса-

тор C подайте несущее колебание (выходное напряжение генератора опорного (несущего) сигнала). Ножку № 7 (вход X) микросхемы соедините с выходом компьютерного генератора сигналов.

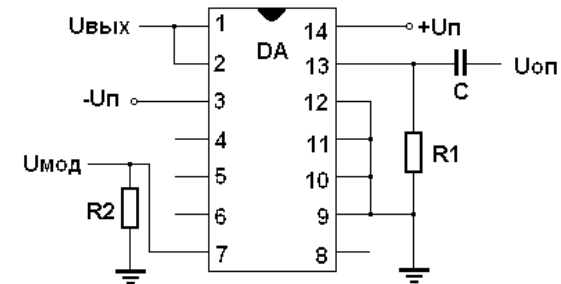


Рис. 5. Схема модулятора

4.2.1. Снятие модуляционной характеристики

В собранной и работающей схеме измерьте с помощью осциллографа амплитуду опорного напряжения на ножке № 13 (вход Y) микросхемы. Зафиксируйте это значение в рабочей тетради. Установите амплитуду колебаний генератора сигналов равной нулю, и, изменяя величину постоянного смещения на выходе генератора сигналов в диапазоне от -4 В до $+4$ В, измеряйте с помощью осциллографа выходное напряжение модулятора. Постройте модуляционную характеристику (зависимость выходного напряжения от величины постоянного смещения). Отметьте напряжение смещения, при котором выходное напряжение равно нулю. В идеале, это напряжение должно тоже равняться нулю, но на практике всегда существует небольшое смещение.

Снимите модуляционную характеристику при другом значении амплитуды опорного сигнала. Для этого измените (уменьшите) значение резистора R_3 в схеме генератора опорного (несущего) колебания. Выясните, как влияет уровень несущего сигнала на модуляционную характеристику.

4.2.2. Наблюдение модуляции

Установите величину постоянного смещения на выходе генератора сигналов, соответствующую примерно середине модуляционной характеристики. На этом фоне подавайте синусоидальный модулирующий сигнал с частотой около 10 кГц.

Постепенно увеличивая амплитуду модулирующего сигнала наблюдайте АМ-сигнал на выходе модулятора. Установите зависимость коэффициента модуляции от величины смещения и амплитуды модулирующего сигнала.

Если амплитуда модулирующего сигнала больше постоянного смещения, то наступает режим перемодуляции. При этом огибающая выходного сигнала уже не повторяет формы модулирующего сигнала. Уменьшите величину смещения и проведите наблюдения перемодулированных выходных сигналов, в том числе при смещении, соответствующем нулю модуляционной характеристики. Последний режим носит название «балансная модуляция».

4.3. Последовательный диодный детектор

Соберите последовательный диодный детектор по схеме на рис. 2а и подключите его к выходу модулятора. При расчете элементов детектора используйте неравенства (13). Выберите частоту модуляции около 10 кГц. Выходное сопротивление модулятора (R_r) мало и его можно считать равным нулю. Диод D – германиевый диод типа Д9.

4.3.1. Снятие характеристики детектора

Так же, как и в п. 4.2.1 задания, установите амплитуду колебаний генератора сигналов равной нулю и, изменяя величину постоянного смещения на выходе генератора сигналов, изменяйте амплитуду выходного напряжения модулятора в пределах от 0 до 4 В и измеряйте ее с помощью осциллографа. Одновременно измеряйте постоянное напряжение на выходе

детектора. Постройте характеристику детектора (зависимость постоянного напряжения на выходе детектора от амплитуды выходного напряжения модулятора). Выясните, в каком интервале амплитуд выходного напряжения модулятора постоянное напряжение на выходе детектора пропорционально амплитуде выходного напряжения модулятора, определите коэффициент передачи детектора.

Измените схему, включив последовательно с выходом модулятора резистор, моделирующий выходное сопротивление генератора, величиной порядка $0.2 \div 0.5$ от величины сопротивления детектора R . Снимите характеристику детектора в этом случае. Сделайте заключение о влиянии сопротивления генератора на характеристику детектора.

4.3.2. Детектирование модулированных колебаний

В соответствии с п. 4.2.2 задания получите модулированные колебания. Постепенно увеличивая коэффициент модуляции, наблюдайте на осциллографе как модулированные колебания, так и колебания на выходе детектора. Определите, при каком коэффициенте модуляции колебания на выходе детектора начинают искажаться. Убедитесь в том, что амплитудный диодный детектор не позволяет правильно детектировать перемодулированные колебания.

Проведите аналогичные наблюдения для измененных схем детектора. Для схемы с добавочным резистором R_r (как в п. 4.3.1) и для схемы с увеличенной в несколько раз емкостью конденсатора детектора. Сделайте заключение о влиянии этих элементов на работу детектора.

4.4. Синхронный детектор

Соберите синхронный детектор по схеме на рис. 6. На этой схеме: DA – микросхема К525ПС2, резисторы R_1 и R_2

равны друг другу и составляют примерно 30 кОм, $+U_{\pi}=12$ В, $-U_{\pi}=-12$ В, конденсаторы C_1 и C_2 – разделительные – около 0.1 мкФ. На ножку № 13 (вход Y) микросхемы через разделительный конденсатор C_1 подайте несущее колебание (выходное напряжение генератора опорного (несущего) сигнала). Ножку № 7 (вход X) микросхемы соедините через разделительный конденсатор C_2 с источником сигналов (с выходом модулятора или с выходом компьютерного генератора сигналов). Резистор

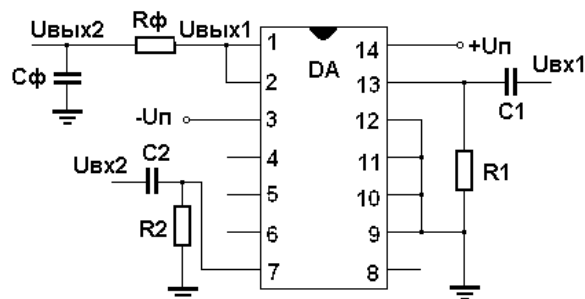


Рис. 6. Схема синхронного детектора

R_{ϕ} и конденсатор C_{ϕ} образуют фильтр нижних частот. Частота среза этого фильтра должна быть выше частоты модуляции (напомним, что в данной работе частота модуляции принята около 10 кГц).

4.4.1. Частотная характеристика синхронного детектора

Подайте через разделительные конденсаторы опорный сигнал на схемы модулятора и синхронного детектора. С помощью резистора R_s в схеме генератора опорного (несущего) сигнала установите амплитуду опорного сигнала на уровне 5÷7 В. Ножку № 7 (вход X) микросхемы синхронного детектора

соедините через разделительный конденсатор C_2 с выходом компьютерного генератора сигналов. Установите амплитуду выходного напряжения компьютерного генератора сигналов на уровне около 4 В. Изменяя частоту компьютерного генератора сигналов в пределах от $f_0 - 70$ кГц до $f_0 + 70$ кГц (f_0 – частота колебаний генератора опорного (несущего) сигналов), измеряйте с помощью осциллографа амплитуду колебаний $U_{\text{вых}2}$ на выходе синхронного детектора. Постройте зависимость этой амплитуды от частоты компьютерного генератора сигналов.

4.4.2. Детектирование модулированных колебаний

Ножку № 7 (вход X) микросхемы синхронного детектора соедините через разделительный конденсатор C_2 с выходом модулятора, а выход компьютерного генератора сигналов присоедините ко входу X (ножка № 7) микросхемы модулятора. В соответствии с п.4.2.2 задания получите амплитудно-модулированные колебания. Наблюдайте колебания на выходах $U_{\text{вых}1}$ и $U_{\text{вых}2}$ синхронного детектора. Сравните эти наблюдения с формулой (14) настоящего описания.

В соответствии с п. 4.2.2 установите в модуляторе режим перемодулированных колебаний. Наблюдайте колебания на выходах $U_{\text{вых}1}$ и $U_{\text{вых}2}$ синхронного детектора. Убедитесь в том, что синхронный детектор успешно детектирует такие колебания (в частности, балансно-модулированные колебания).

4.4.3. Дополнительное задание

Студенты, успешно справившиеся с заданием, могут дополнительно, по своему желанию, собрать схему синхронного детектора по рекомендации, содержащейся в последнем абзаце на с.14 и проделать с ней опыты аналогичные описанным в пп. 4.4.1 и 4.4.2.

Приложение

Ниже приводятся листинги программ `detser.m` и `det-shun.m`, написанных в системе компьютерной математики MATLAB, позволяющих вычислить вынужденное выходное напряжение, коэффициент передачи k_d и входное сопротивление $R_{вх}$ последовательного и параллельного амплитудного диодного детектора по значениям R_r, R_d, R, C и частоты входного синусоидального напряжения. Программы находятся в рабочей папке MATLAB-а `work`. Они открываются в окне Editor-а и запускаются из этого окна.

```
f=input('введите частоту колебаний (в герцах) f=');
omega=2*pi*f;
Rg=input('введите сопротивление генератора (в омах) Rg=');
Rd=input('введите сопротивление диода (в омах) Rd=');
R=input('введите сопротивление детектора (в омах) R=');
C=input('введите емкость детектора (в фарадах) C=');
dch=omega*R*C; ch=omega*R*(Rg+Rd)*C/(R+Rg+Rd);
K=R/((R+Rg+Rd)*sqrt(1+ch*ch)); adch=-atan(ch);
a1=0; a2=0; t1=1; t2=1;
while (abs(t1-a1)+abs(t2-a2))>1e-4
    t1=a1; t2=a2;
    x=(cos(a2))*exp((a2-a1-2*pi)/dch);
    y=K*cos(a2+adch)+(exp((a1-a2)/ch))*(cos(a1)-
K*cos(a1+adch));
    a1=-acos(x); a2=acos(y);
end
u=zeros(1,201); a=zeros(1,201); v=zeros(1,201);
for m=1:201
    a(m)=a1+(m-1)*pi/100;
    if a(m)<a2
        u(m)=K*cos(a(m)+adch)+(exp((a1-a(m))/ch))*(x-
K*cos(a1+adch));
        v(m)=cos(a(m))-u(m);
    else
        u(m)=y*exp((a2-a(m))/dch);
        v(m)=0;
    end
end
```

```
plot(a,u,'r',a,cos(a),'b');
KD=sum(u)/201;
Req=(201*R*Rg/(2*Rg*sum(u.*u)+2*R*sum(v.*v)))-Rg;
str=sprintf('series detector Kd = %0.4g, Req = %0.4g',KD,Req);
title(str);

f=input('введите частоту колебаний (в герцах) f=');
omega=2*pi*f;
Rg=input('введите сопротивление генератора (в омах) Rg=');
Rd=input('введите сопротивление диода (в омах) Rd=');
R=input('введите сопротивление детектора (в омах) R=');
C=input('введите емкость детектора (в фарадах) C=');
dch=omega*(R+Rg)*C; Z=Rd*R/(Rd+R); ch=omega*(Rg+Z)*C;
Kch=1/sqrt(1+ch*ch); ach=-atan(ch);
Kdch=1/sqrt(1+dch*dch); adch=-atan(dch);
a1=0; a2=0; t1=1; t2=1;
while (abs(t1-a1)+abs(t2-a2))>1e-5
    t1=a1; t2=a2;
    x=Kch*cos(a2+ach)+exp((a1-a2)/ch)*(cos(a1)-
Kch*cos(a1+ach));
    y=Kdch*cos(a1+adch)+exp((a2-a1-2*pi)/dch)*(cos(a2)-
Kdch*cos(a2+adch));
    a2=acos(x); a1=-acos(y);
end
u=zeros(1,201); a=zeros(1,201); v=zeros(1,201);
w=zeros(1,201);
for m=1:201
    a(m)=a1+(m-1)*pi/100;
    if a(m)<a2
        u(m)=(Z/(Z+Rg))*(cos(a(m))-(Kch*cos(a(m)+ach)+exp((a1-
a(m))/ch)*(cos(a1)-Kch*cos(a1+ach)))));
        v(m)=u(m); w(m)=0;
    else
        u(m)=(R/(R+Rg))*(cos(a(m))-(Kdch*cos(a(m)+adch)+exp((a2-
a(m))/dch)*(cos(a2)-Kdch*cos(a2+adch)))));
        v(m)=0; w(m)=u(m);
    end
end
plot(a,u,'r',a,cos(a),'b');
KD=-sum(u)/201;
Req=(201*Z*Z*R*R/(2*(sum(w.*w)*Z*Z*(R+Rg)+sum(v.*v)*R*R*(Z+Rg)
)))-Rg;
str=sprintf('shunt detector Kd = %0.4g, Req = %0.4g',KD,Req);
title(str);
```

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. *Манаев Е.И.* Основы радиоэлектроники. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
2. *Габидулин Э.М., Куклев Л.П.* Генерирование синусоидальных колебаний и нелинейные преобразования сигналов: Учебное пособие. – М.: Изд-во МФТИ, 1980. – 92 с.

Дополнительная

3. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника / Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
4. Нелинейные преобразования сигналов с применением аналогового перемножителя. Лабораторная работа по курсам: *Радиотехника, Радиотехника и схемотехника, Введение в электронику* / Сост. Л.П. Куклев, А.Л. Ларин. – М.: МФТИ, 2002. – 36 с.