

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

**Физический факультет  
Практикум кафедры физики колебаний**

**Описание задачи**

**СИНХРОННЫЙ ДЕТЕКТОР**

**Составил А.В. Степанов**

**Москва 2022 г.**

## ПРИНЦИП СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Синхронное детектирование основано на операции умножения сигналов. Основные элементы детектора – умножитель и фильтр низких частот.

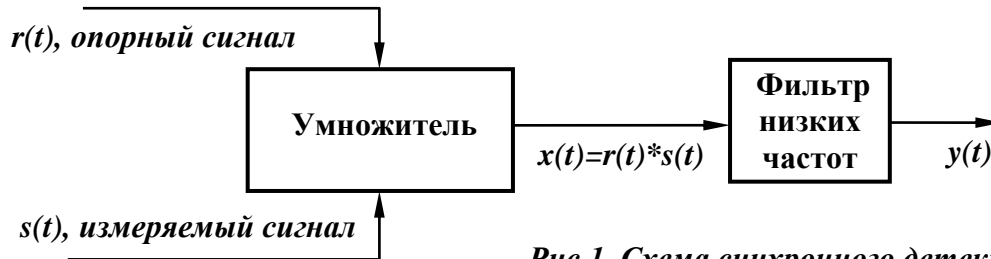


Рис.1. Схема синхронного детектора.

Пусть на входы умножителя подаются два гармонических сигнала: так называемый опорный сигнал с постоянными частотой и амплитудой  $r(t) = R \cdot \sin(\omega_R t)$  и измеряемый сигнал  $s(t) = R \cdot \sin(\omega t)$ . Тогда выходной сигнал умножителя имеет вид:

$$x(t) = r(t) \cdot s(t) = R \cdot S \cdot \{ \cos[(\omega_R - \omega) + \varphi] - \cos[(\omega_R + \omega) + \varphi] / 2$$

В результате умножения появляются гармонические составляющие на суммарной  $(\omega_R + \omega)$  и разностной  $(\omega_R - \omega)$  частотах.

В синхронном детекторе используется составляющая на разностной частоте. Ее выделяет фильтр низких частот (ФНЧ), включенный на выходе умножителя. Фильтр пропускает сигналы с частотами ниже частоты среза фильтра  $\omega_C$  и подавляет более высокочастотные сигналы. Частота среза устанавливается намного меньшей, чем опорная частота  $\omega_R$ . Поэтому ненулевой отклик на выходе фильтра дают лишь те сигналы, частоты которых близки к опорной частоте (отличаются от опорной частоты на величину, не превышающую частоту среза фильтра низких частот).

В случае, когда частота сигнала точно равна опорной частоте (сигналы на входах умножителя синхронны - отсюда название детектора), в результате умножения появляется составляющая с нулевой разностной частотой, т.е. постоянная составляющая. На выход фильтра проходит только эта постоянная составляющая.

Для фильтра с коэффициентом передачи в полосе пропускания, равным единице, выходной сигнал равен:

$$y_S(t) = \text{const} = R \cdot S \cdot \cos(\varphi) / 2 .$$

Т.о. выход синхронного детектора пропорционален амплитуде входного сигнала и зависит от фазового сдвига относительно опорного сигнала.

Если изменить фазу опорного сигнала на  $\pi/2$ , т.е. взять его в виде  $r(t) = R \cos(\omega_R t)$ , то в синхронном режиме выходной сигнал будет равен:

$$y_C(t) = \text{const} = R \cdot S \cdot \sin(\varphi) / 2 .$$

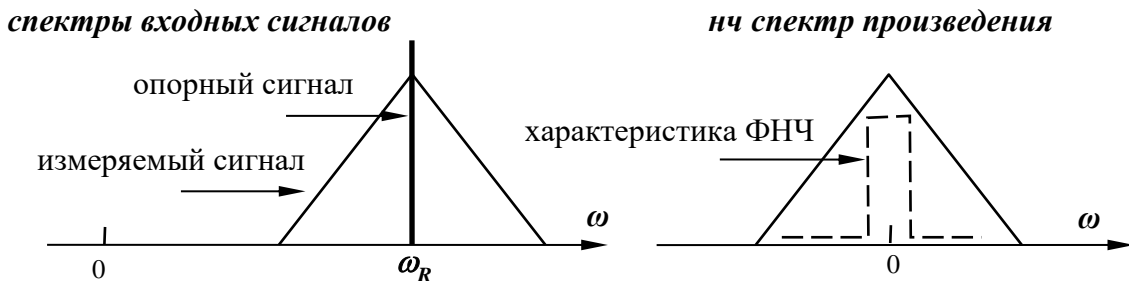
Сигналы  $y_S$  и  $y_C$  пропорциональны квадратурным составляющим  $S \cdot \cos(\varphi)$  и  $S \cdot \sin(\varphi)$  измеряемого гармонического сигнала  $s(t)$  и позволяют отдельно определить его фазу и амплитуду:

$$S^2 = y_S^2 + y_C^2 , \quad \text{tg}(\varphi) = y_C / y_S .$$

В общем случае сигнал  $s(t)$  может быть негармоническим и иметь непрерывный спектр  $s(\omega)$ . Тогда работу синхронного детектора можно качественно пояснить так: в результате умножения на гармонический опорный сигнал  $r(t)$  происходит сдвиг спектра

$s(\omega)$  по оси частот на величину, равную частоте опорного сигнала  $\omega_R$ , а фильтр “вырезает” из сдвинутого спектра область низких частот  $|\omega| < \omega_c$ .

Таким образом, синхронный детектор действует как полосовой фильтр, который настроен на частоту опорного сигнала и имеет полосу пропускания, равную частоте среза фильтра низких частот.



**Рис.2. Преобразование спектра в синхронном детекторе.**

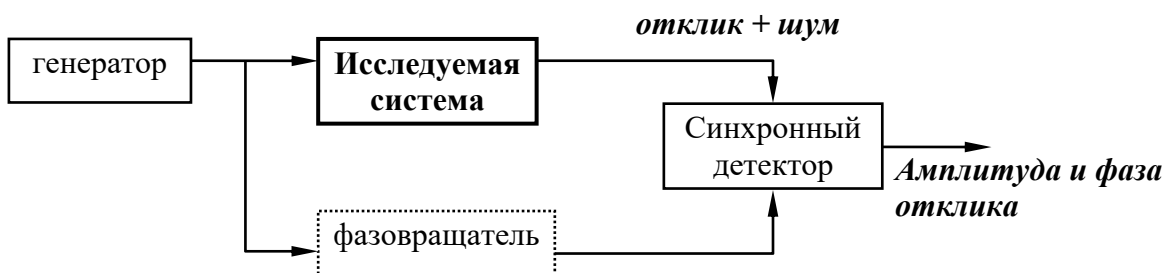
Частотная избирательность синхронного детектора определяется полосой пропускания фильтра низких частот и может быть сделана очень высокой, трудно достижимой путем прямой фильтрации сигнала. Например, при частоте опорного сигнала 1МГц и частоте среза фильтра 1Гц добротность колебательного контура, который бы обеспечивал избирательность, равную избирательности синхронного детектора, должна составлять порядка  $10^6$ .

Таким образом, синхронный детектор обладает свойствами, важными для обработки сигналов:

- чувствителен к фазе и амплитуде измеряемого сигнала,
- обладает высокой частотной избирательностью.

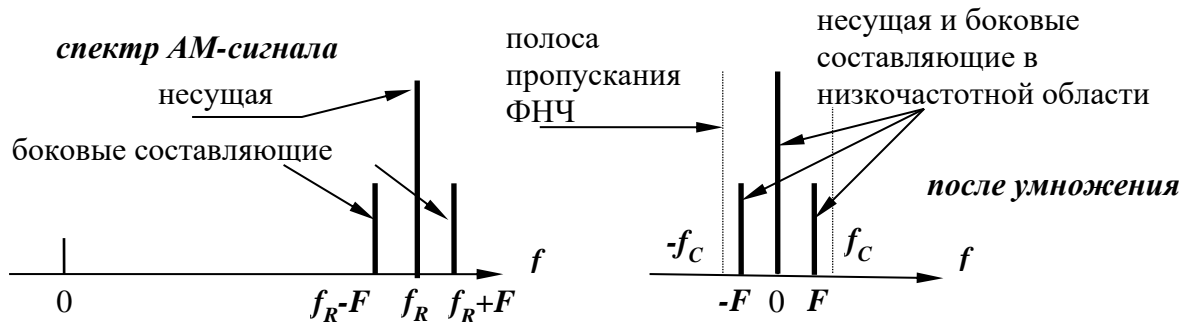
Благодаря этому синхронное детектирование широко используется в технике связи, разнообразной измерительной аппаратуре, при проведении экспериментальных исследований.

Типичный пример использования синхронного детектора - регистрация слабого сигнала от исследуемой системы на фоне шумов и помех (Рис.3). На систему подается переменное воздействие от генератора. Слабый зашумленный отклик системы усиливается и поступает на синхронный детектор. Опорным сигналом служит выход генератора. При необходимости компенсации фазового сдвига, возникающего в исследуемой системе, в цепь сигнала или в цепь опорного сигнала включают фазовращатель - устройство, позволяющее регулировать фазу сигнала. Выделение сигнала из шума происходит за счет высокой частотной избирательности синхронного детектора. Может регистрироваться как амплитуда отклика, так и сдвиг фазы, возникающий в исследуемой системе.



**Рис.3. Схема регистрации слабого сигнала.**

Синхронный детектор может использоваться для детектирования сигналов с различными видами модуляции - амплитудной, частотной и фазовой. Для этого опорный сигнал настраивается на частоту несущей модулированного сигнала, а полоса пропускания фильтра низких частот делается шире полосы боковых составляющих сигнала. В результате умножения спектр сигнала смещается в низкочастотную область, причем несущая переносится на нулевую частоту. Фильтр низких частот пропускает боковые составляющие (модулирующий сигнал) и подавляет помехи и шумы, лежащие вне полосы частот модулирующего сигнала. Для иллюстрации на Рис.4 показано преобразование спектра при детектировании сигнала, амплитуда которого модулирована по гармоническому закону с частотой  $F$ .



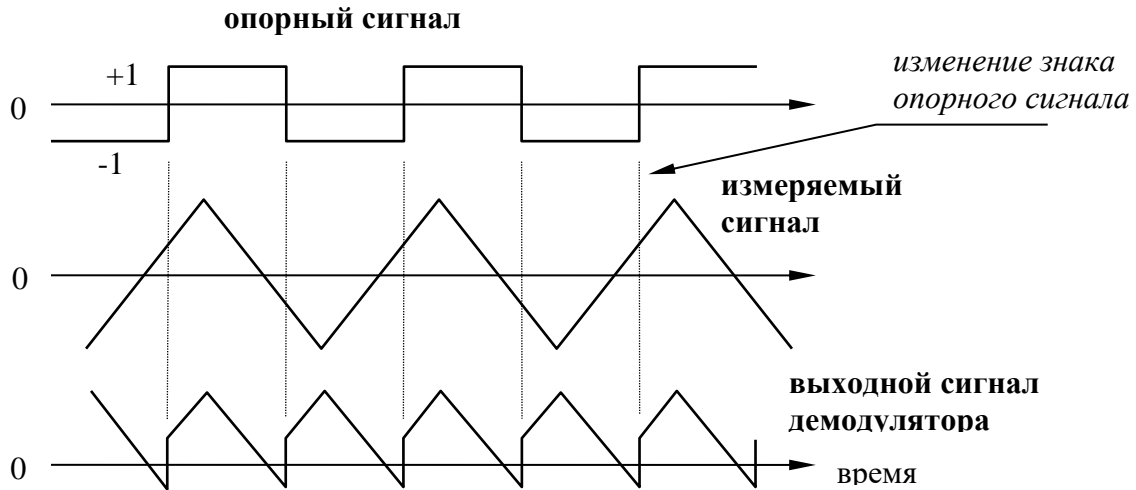
**Рис.4. Преобразование спектра при детектировании АМ сигнала ( $f_R$  - частота несущей,  $F$  - частота модуляции).**

Умножение сигналов в синхронном детекторе производится с помощью электронных устройств с управляемыми параметрами, например с помощью усилителя, коэффициент усиления которого изменяется под действием опорного сигнала. Широко применяются специальные интегральные микросхемы аналоговых умножителей сигналов, выполняющие операцию умножения с высокой точностью.

Опорный сигнал синхронного детектора не обязательно должен быть гармоническим. Важно лишь, чтобы его частота совпадала с частотой измеряемого сигнала. Тогда величина постоянной составляющей, возникающей на выходе умножителя, будет по-прежнему пропорциональна амплитуде измеряемого сигнала (в силу линейности операции умножения по отношению к сигналу). Зависимость же постоянной составляющей от разности фаз измеряемого и опорного сигналов определяется конкретной формой этих сигналов.

На практике часто используется разновидность синхронного детектора, в котором опорный сигнал имеет форму меандра. В этом случае операция умножения на опорный сигнал сводится к изменению знака сигнала в соответствии со знаком опорного сигнала и может быть сравнительно просто реализована с помощью различных электронных переключателей (диодных, транзисторных, специальных интегральных схем). Такой вид умножителя также называется балансным модулятором или демодулятором - в зависимости от функции, выполняемой умножителем.

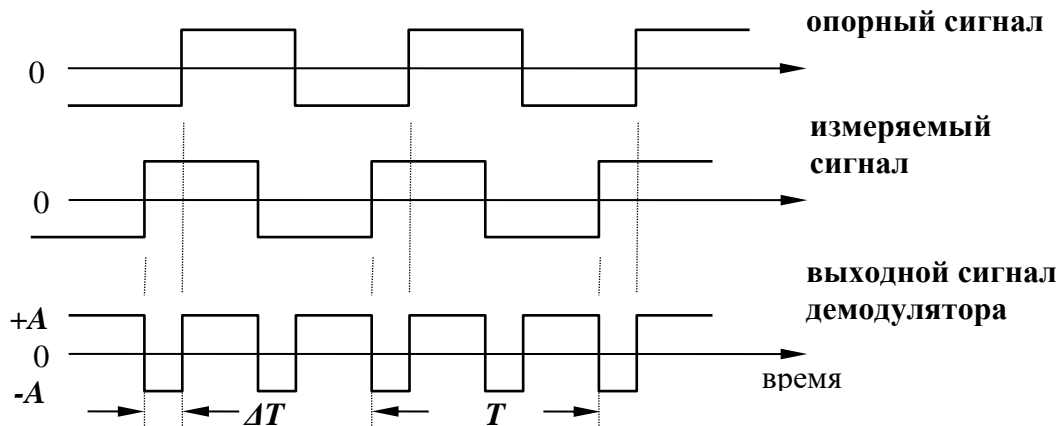
Рис.5 иллюстрирует преобразование сигнала в балансном демодуляторе. В качестве примера взят сигнал пилообразной формы. Асимметрия выходного сигнала демодулятора относительно нуля указывает на наличие постоянной составляющей, а уменьшение периода вдвое - на появление второй гармоники. Постоянная составляющая соответствует нулевой разностной частоте перемножаемых сигналов, а вторая гармоника - суммарной частоте.



*Рис.5. Преобразование сигнала в балансном демодуляторе.*

Особенность синхронного детектора с прямоугольным опорным сигналом, а также с периодическим опорным сигналом другой формы заключается в том, что в результате умножения в низкочастотную область переносятся составляющие сигнала, лежащие вблизи частот всех гармоник опорного сигнала  $\omega_R$ ,  $2\omega_R$ ,  $3\omega_R$  и т.д. В случае узкополосного сигнала это ухудшает отношение сигнал/шум детектора по сравнению со случаем гармонического опорного сигнала. Это объясняется тем, что вместе с полезным сигналом на выход детектора попадают составляющие шума и помех на кратных частотах, где сигнал отсутствует. От этого недостатка обычно избавляются с помощью предварительной фильтрации сигнала с помощью селективного фильтра с относительно невысокой добротностью, который устраняет шумы и помехи на кратных частотах.

В различных системах регистрации фазы, т.е. в случаях, когда амплитуда сигнала не несет полезной информации, оба сигнала, подаваемых на синхронный детектор, предварительно преобразуют в сигналы прямоугольной формы с фиксированной амплитудой. Преобразование осуществляется, например, с помощью амплитудных ограничителей или компараторов. Постоянная составляющая, возникающая в результате перемножения двух прямоугольных сигналов одинаковой частоты, линейно зависит от разности фаз.



*Рис.6. Умножение прямоугольных сигналов.*

На Рис.6 показано перемножение симметричных сигналов прямоугольной формы, имеющих разные фазы (измеряемый сигнал опережает опорный). Фазовый сдвиг  $\varphi$ , временной сдвиг  $\Delta T$  и период  $T$  сигналов связаны простой пропорцией:

$$\varphi/2\pi = \Delta T/T.$$

Из рисунка легко видеть, что постоянная составляющая, равная среднему значению выходного сигнала, линейно зависит от временного сдвига сигналов  $\Delta T$  и, следовательно, от разности фаз  $\varphi$ . При нулевой разности фаз (нулевом сдвиге  $\Delta T$ ) постоянная составляющая принимает максимальное значение  $A$  ( $A$  - амплитуда прямоугольного выходного сигнала). Для противофазных сигналов (разность фаз равна  $+\pi$  или  $-\pi$ ) эта составляющая минимальна и равна  $-A$ . При разности фаз  $+\pi/2$  или  $-\pi/2$  сигналы взаимно ортогональны, и среднее значение на выходе равно нулю. На Рис.7 представлена результирующая фазовая характеристика.

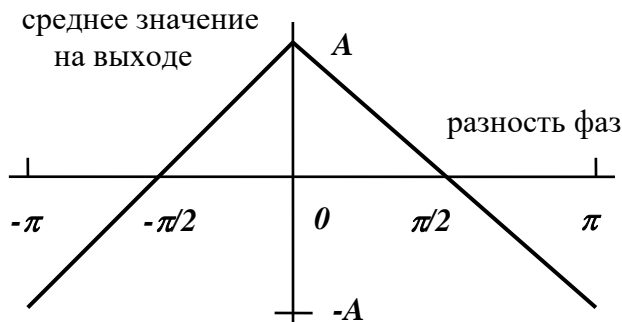


Рис.7. Фазовая характеристика детектора.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка включает сам синхронный детектор, а также элементы для получения модулированного сигнала: генератор, управляемый напряжением, (ГУН) и фильтр-модулятор. Основные узлы установки, элементы управления, входные и выходные сигналы изображены на лицевой панели установки и на Рис.8,11.

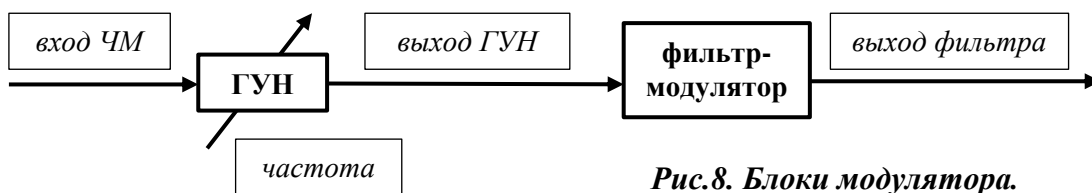


Рис.8. Блоки модулятора.

ГУН вырабатывает симметричный прямоугольный сигнал, частота которого зависит от управляющего напряжения. Зависимость близка к линейной. Постоянная составляющая управляющего напряжения вырабатывается внутри установки и регулируется потенциометром на лицевой панели установки (**Частота**). Переменное напряжение, подаваемое на **вход ЧМ** от внешнего источника/генератора, добавляется к управляющему напряжению и модулирует частоту выходного сигнала ГУН.

Диапазон перестройки частоты ГУН составляет примерно 12...20 кГц. Частота внешнего модулирующего сигнала должна быть намного ниже частоты ГУН. Амплитуда модулирующего сигнала задает размах изменения частоты (коэффициент модуляции).

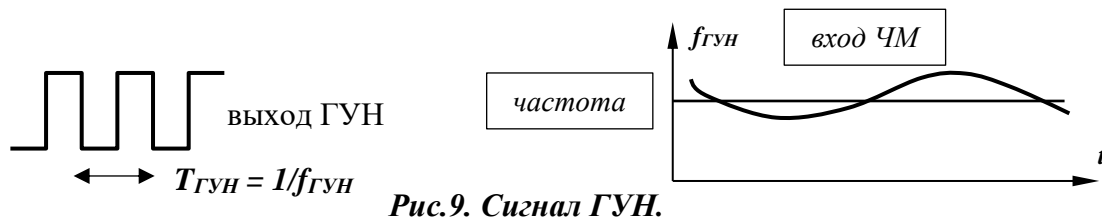


Рис.9. Сигнал ГУН.

**Фильтр-модулятор** служит для дополнительной амплитудной и фазовой модуляции частотно-модулированного сигнала ГУН. Фильтр является электронным аналогом обычного колебательного LCR – контура и имеет схожие АЧХ и ФЧХ.

При изменении частоты ГУН изменяется амплитуда сигнала на выходе фильтра, а также сдвиг фаз между входным и выходным сигналом фильтра. Таким образом, частотная модуляция сигнала генератора приводит к амплитудной и фазовой модуляции выходного сигнала фильтра. Коэффициенты модуляции амплитуды и фазы определяются размахом изменения частоты и крутизной соответствующих АЧХ и ФЧХ фильтра.

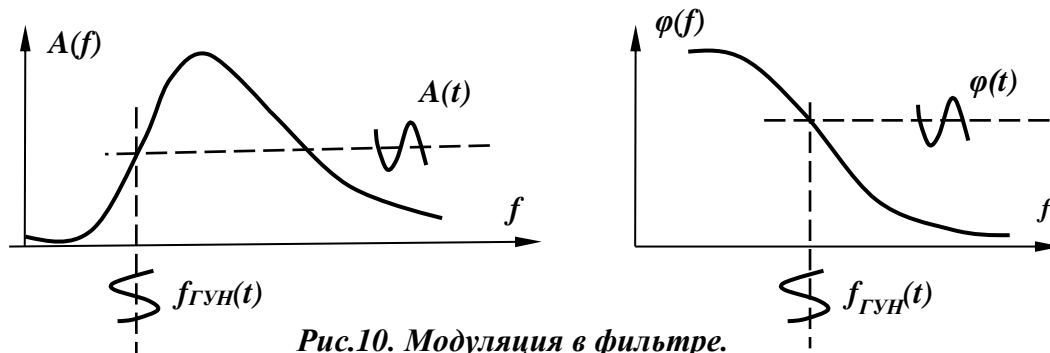


Рис.10. Модуляция в фильтре.

Резонансная частота фильтра  $f_0$  примерно настроена на центральную частоту ГУН (16 кГц). Вследствие относительно узкой полосы фильтра на его выход проходит в основном первая гармоника прямоугольного сигнала ГУН, и поэтому форма сигнала на выходе фильтра близка к гармонической.

**СИНХРОННЫЙ ДЕТЕКТОР** включает следующие блоки: сумматор сигналов, компаратор, умножитель (демодулятор) и фильтр низких частот.

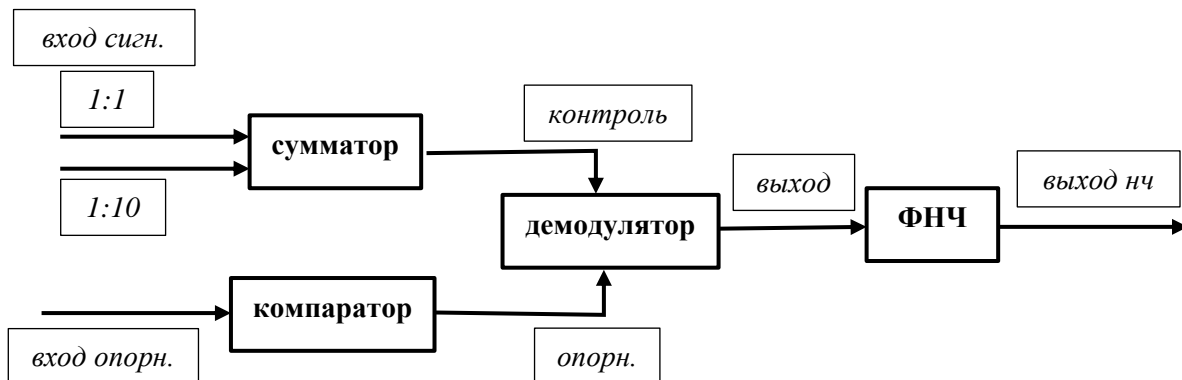


Рис.11. Блоки синхронного детектора.

**Сумматор** складывает сигналы, подаваемые на его входы **1:1** и **1:10**, с коэффициентами 1 и 0.1 (ослабление). Выход сумматора (**Контроль**) инвертирован относительно входа и является сигнальным входом демодулятора.

**Компаратор** сравнивает напряжение, подаваемое на его вход (**Вход опорн.**), с потенциалом земли. При отрицательном напряжении компаратор вырабатывает логический выходной сигнал, равный единице (уровень 5В), а при положительном напряжении выходной сигнал компаратора равен нулю. Выходной сигнал компаратора является опорным сигналом демодулятора.

**Демодулятор** сделан на усилителе, коэффициент передачи ( $K$ ) которого определяет сигнал компаратора: при логической единице  $K=1$ , а при логическом нуле  $K=-1$ .

В результате работы сумматора, компаратора и демодулятора происходит умножение входного сигнала (Входы 1:1, 1:10) на знак опорного сигнала (Вход опорн.).

**Фильтр низких частот (ФНЧ)**, включенный на выходе демодулятора, является фильтром Баттерворта второго порядка с амплитудно-частотной характеристикой:

$$|K(f)|^2 = K_0^2 / (1 + (f/f_c)^4).$$

Коэффициент усиления фильтра в полосе пропускания  $K_0$  примерно равен 1.6, частота среза  $f_c$  составляет примерно 100 Гц.

Упрощенные схемы блоков установки приведены в Приложении.

При выполнении работы дополнительно используются промышленные измерительные приборы (генератор низкой частоты, генератор шума, осциллограф), с работой которых следует ознакомиться по отдельным описаниям.

## УПРАЖНЕНИЯ

### 1. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОДУЛЯТОРА.

1.1 Калибровка частотной шкалы ГУН. Подключите осциллограф к выходу ГУН и определите значения частоты для разных положений регулятора частоты в диапазоне от -1.5 до +1.5. Шкала регулятора частоты встроенного генератора примерно линейна и соответствует изменению управляющего напряжения от 2В до 4В. Определите коэффициент преобразования управляющего напряжения в частоту.

1.2. Измерение амплитудно-частотной характеристики фильтра-модулятора. Получите зависимость амплитуды выходного сигнала фильтра от частоты ГУН. Для измерения амплитуды используйте осциллограф.

1.3. Измерение фазовой характеристики фильтра-модулятора. Определите сдвиг фаз между входным и выходным сигналами фильтра для разных положений регулятора частоты ГУН. Сдвиг фаз  $\varphi$  измеряйте с помощью осциллографа по временному сдвигу  $\Delta T$  между входным и выходным сигналами:

$$\varphi = 2\pi \Delta T / T, \quad T - \text{период сигнала.}$$

Для облегчения измерения временного сдвига можно подать выходной синусоидальный сигнал фильтра на компаратор и определять временной сдвиг между двумя прямоугольными сигналами: входным сигналом фильтра и выходным сигналом компаратора. При этом необходимо учитывать инверсию (сдвиг фазы на  $\pi$ ) сигнала в компараторе.

### 2. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ДЕТЕКТОРА.

2.1. Изучение амплитудной характеристики детектора. Схема измерения показана на Рис.12. На опорный и сигнальный (1:1) входы детектора подается напряжение внешнего генератора с частотой примерно 10 кГц, входное переменное напряжение и выходное постоянное напряжение детектора измеряются осциллографом.



Изменяя амплитуду напряжения генератора в пределах от 0 до 2В, проверьте, что выходное постоянное напряжение линейно зависит от амплитуды входного напряжения. Определите коэффициент передачи детектора - отношение выходного напряжения к амплитуде входного сигнала.

Зарисуйте/сфотографируйте форму сигналов в узлах детектора (на опорном и сигнальном входах демодулятора, его выходе).

Убедитесь, что при изменении частоты генератора в широких пределах напряжение на выходе синхронного детектора не изменяется.

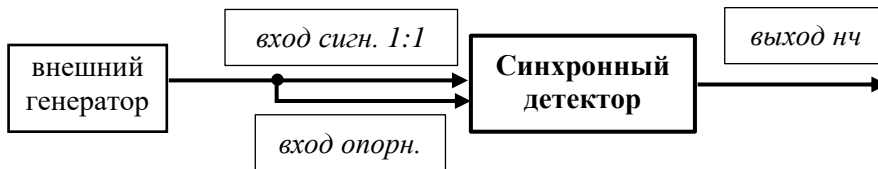


Рис.12.

2.2. Изучение фазовой характеристики детектора. Схема измерения показана на Рис.13. На сигнальный вход детектора подается прямоугольное входное напряжение фильтра, синусоидальный выходной сигнал фильтра подается на опорный вход. Разность фаз регулируется путем изменения частоты ГУН. Изменение амплитуды выходного сигнала фильтра при изменении частоты не играет роли, т.к. для опорного входа существенен лишь знак входного сигнала.

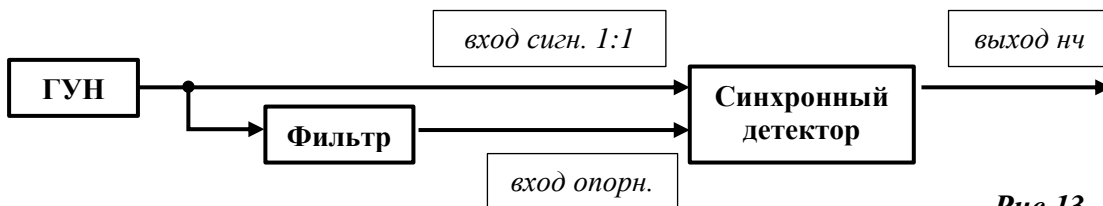


Рис.13.

Зарисуйте/сфотографируйте форму сигналов в различных узлах детектора (на опорном и сигнальном входах демодулятора, его выходе). Проследите за изменением формы сигнала на выходе демодулятора при изменении частоты ГУН (сдвига фаз фильтра).

Измерьте величину постоянного напряжения на выходе детектора для тех же значений частоты ГУН, что и в упражнении 1.3 (т.е. при известных фазовых сдвигах). Убедитесь в линейности фазовой характеристики детектора, определите ее наклон.

2.3. Измерение полосы пропускания детектора. Схема измерения показана на Рис.14. На опорный вход подается сигнал ГУН, источником сигнала служит внешний низкочастотный генератор. При перестройке частоты внешнего генератора вблизи частоты ГУН (точность настройки должна быть порядка 100 Гц) на выходе детектора будет наблюдаться гармонический сигнал. Его частота равна разности частот входных сигналов детектора. Изменение разностной частоты сопровождается изменением амплитуды выходного сигнала в соответствии с амплитудно-частотной характеристикой фильтра низких частот детектора.



Рис.14.

Перестраивая частоту внешнего генератора, измерьте частоту и амплитуду сигнала на выходе детектора. Тем самым определите АЧХ низкочастотного фильтра детектора.

### 3. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА.

Конфигурация экспериментальной установки для выполнения этого упражнения приведена на Рис.15. С помощью внешнего генератора производится частотная модуляция сигнала ГУН. Она вызывает амплитудную и фазовую модуляцию сигнала на выходе фильтра. Выход фильтра одновременно подключен к обоим входам детектора, поэтому изменения частоты и фазы входного сигнала не влияют на выходной сигнал детектора (важны разность частот и разность фаз). Амплитудная модуляция вызовет появление переменного сигнала на выходе детектора.

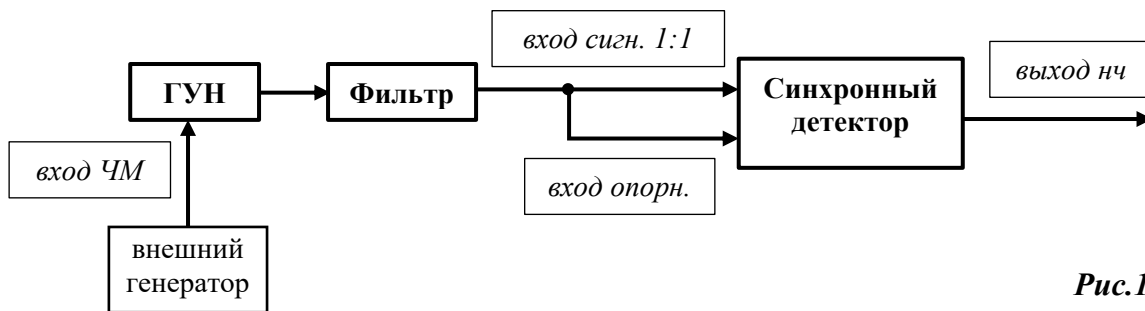


Рис.15.

Установите частоту модулирующего сигнала в пределах полосы пропускания детектора (упражнение 2.3). Амплитуду сигнала выберете такой, чтобы соответствующая амплитуда изменения частоты встроенного генератора была намного меньше ширины резонансной кривой фильтра (упражнение 1.2). Ориентировочное значение амплитуды - 100 мВ, частоты - 50 Гц.

Измерьте зависимость амплитуды выходного сигнала детектора от частоты настройки ГУН. Объясните полученный результат, используя амплитудную характеристику фильтра (упражнение 1.2).

### 4. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ФАЗО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА.

Конфигурация экспериментальной установки показана на Рис.16. Отличие от предыдущего упражнения заключается в том, что на опорный вход детектора подается выходной сигнал фильтра, а на сигнальный вход - входной сигнал фильтра. Поэтому входные сигналы детектора имеют разность фаз, изменяющуюся в соответствии с модулирующим напряжением. Амплитудная модуляция выходного сигнала фильтра не сказывается, т.к. этот сигнал подается на опорный вход детектора.

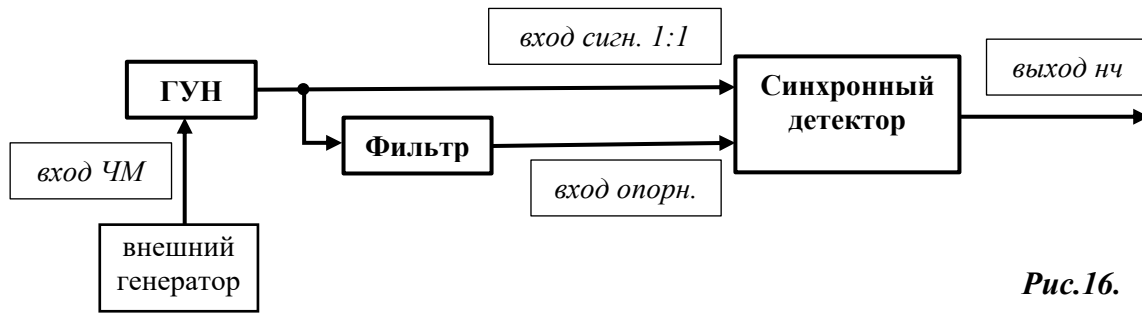


Рис.16.

Установите частоту и амплитуду модулирующего напряжения аналогично предыдущему упражнению и измерьте зависимость амплитуды выходного сигнала детектора от частоты настройки ГУН. Для объяснения результата используйте фазовую характеристику фильтра (упражнение 2.2).

### 5. РЕГИСТРАЦИЯ СИГНАЛА НА ФОНЕ ПОМЕХИ.

Схема измерения показана на Рис.17. Она представляет собой схему детектирования амплитудно-модулированного сигнала (Рис.15), в которой в качестве сигнального входа детектора используется вход 1:10, а ко входу 1:1 подключен генератор шума, создающий помеху.

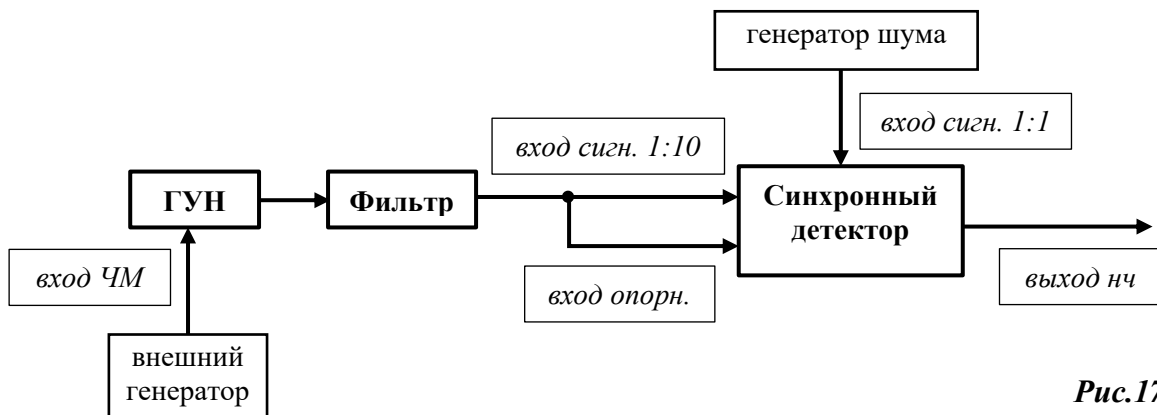


Рис.17.

Вначале, при отключенном генераторе шума установите частоту модулирующего сигнала в пределах полосы пропускания детектора и настройте частоту встроенного генератора на склон резонансной характеристики фильтра. При этом глубина амплитудной модуляции будет наибольшей, и амплитуда сигнала на выходе детектора максимальной. Установите наибольшую амплитуду модулирующего сигнала, при которой отсутствуют искажения выходного сигнала. Измерьте размах сигнала на выходе детектора. Ориентировочное значение частоты внешнего генератора- 50 Гц, амплитуды - 300 мВ.

Подключите генератор шума ко входу 1:1. На выходе будет наблюдаться сигнал, искаженный шумом. Изменяя выходное напряжение генератора шума, добейтесь увеличения среднего размаха сигнала на выходе детектора примерно в 1.5 раза по сравнению с измеренным ранее. Это соответствует отношению сигнал/шум на выходе детектора, примерно равному единице. Операцию удобно проводить при минимальной скорости развертки или при отключенной развертке осциллографа.

Подключите осциллограф ко входу демодулятора (точка КОНТРОЛЬ) и поочередно измерьте средний размах входного шума (при отключенном от входа 1:10

сигнале) и размах сигнала модуляции на входе (при отключенном от входа 1:1 шуме). Определите отношение сигнал/шум на входе детектора.

Зарисуйте/сфотографируйте форму сигналов на входе и выходе детектора в отсутствие и при наличии шума. Объясните наблюдаемое изменение отношения сигнал/шум в результате синхронного детектирования.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие устройства необходимы для синхронного детектора и какие функции они выполняют?
2. Чем обусловлена высокая чувствительность метода синхронного детектирования?
3. Влияет ли форма сигнала и опорного сигнала на величину выходного сигнала синхронного детектора?
4. Для каких сигналов амплитудная и фазовая характеристики синхронного детектора (зависимости величины выходного сигнала от амплитуды и фазы входного) линейны?
5. Почему одно и то же устройство называют модулятором или демодулятором?
6. В каком смысле синхронный детектор является широкополосным устройством и в каком - узкополосным?
7. В упражнениях 3,4 при перестройке частоты ГУН наблюдаются максимумы выходного сигнала детектора. С чем это связано?

### ЛИТЕРАТУРА

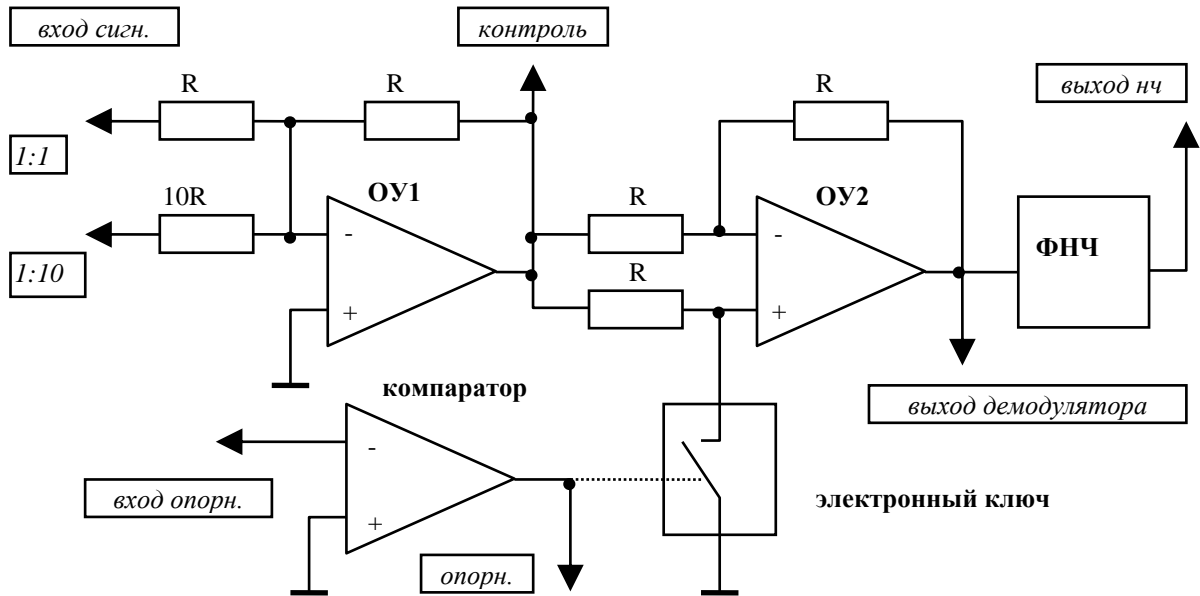
1. Основы радиофизики. Под ред. Логгинова А.С. М.: УРСС, 1996.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 1993.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: Мир, 1982

### ПРИЛОЖЕНИЕ. Упрощенные схемы блоков установки.

Умножитель (демодулятор), собран на операционном усилителе ОУ2 и электронном ключе. Под действием управляющего сигнала ключ замыкает (или размыкает) неинвертирующий вход ОУ2 на землю. При замкнутом ключе ОУ2 работает по схеме инвертирующего усилителя с коэффициентом усиления  $K = -1$ , а при разомкнутом ключе - по схеме неинвертирующего усилителя с  $K = 1$ .

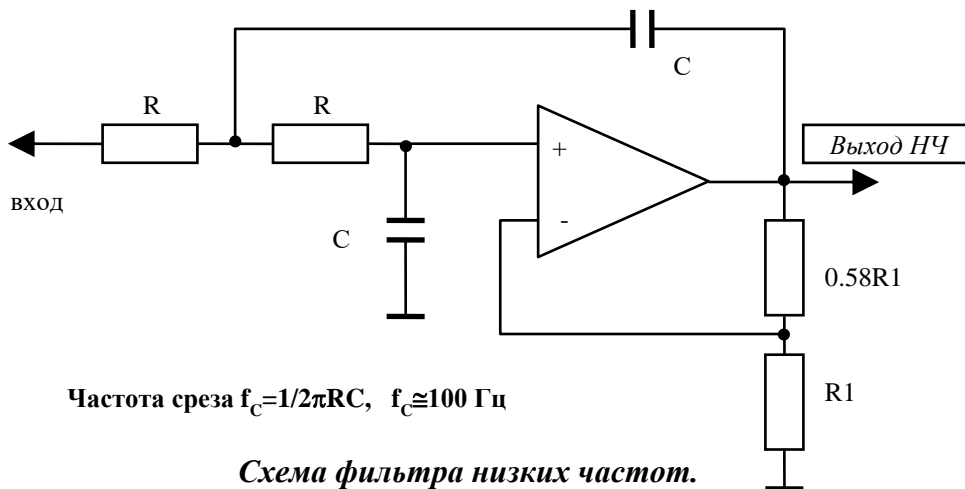
Ключ управляется выходным сигналом компаратора, который сравнивает напряжение, подаваемое на опорный вход, с нулевым потенциалом.

На сигнальном входе демодулятора включен инвертирующий усилитель-сумматор на операционном усилителе ОУ1. Выходной сигнал усилителя (точка *контроль*) равен сумме, взятой с противоположным знаком, сигнала на входе 1:1 и ослабленного в 10 раз сигнала на входе 1:10.



*Схема синхронного детектора.*

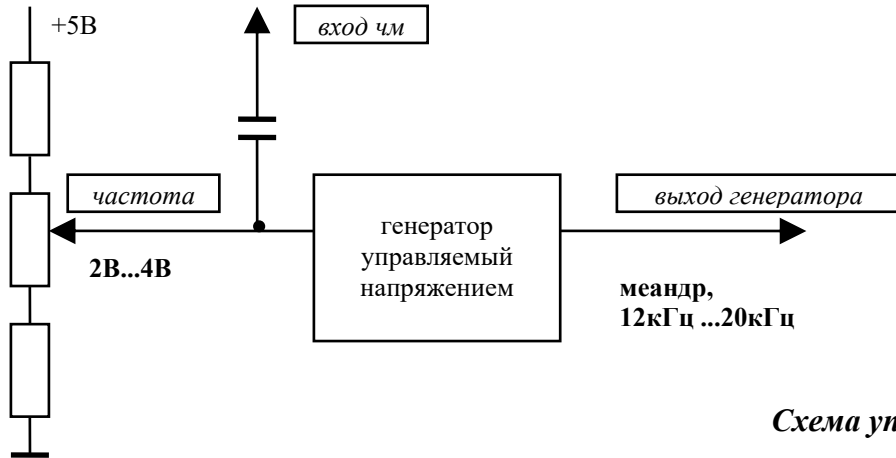
Выходной сигнал демодулятора поступает на фильтр низких частот. Фильтр собран на операционном усилителе и представляет собой активный фильтр Баттерворта второго порядка. Коэффициент усиления фильтра в полосе пропускания  $K_0$  примерно равен 1.6, частота среза  $f_c$  составляет примерно 100 Гц.



*Схема фильтра низких частот.*

ГУН собран на специализированной интегральной микросхеме, вырабатывающей выходной сигнал прямоугольной формы. Частота генерируемых колебаний зависит от величины напряжения, подаваемого на управляющий вход микросхемы.

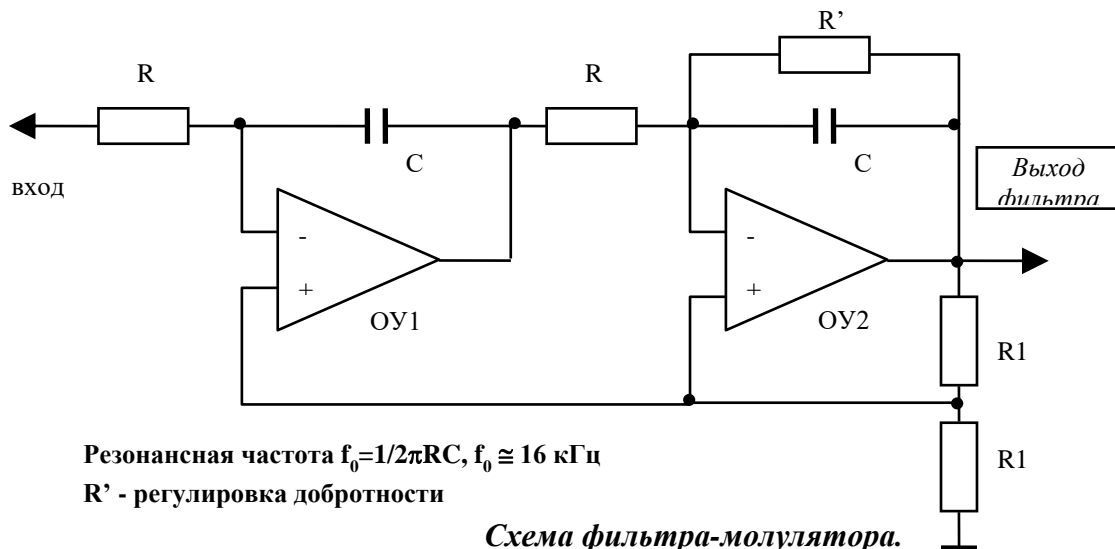
Постоянная составляющая напряжения на управляющем входе, задается с помощью потенциометра и может регулироваться в пределах 2В...4В. Середине этого диапазона соответствует частота порядка 16кГц. Со входа частотной модуляции на микросхему подается переменное напряжение от внешнего источника.



*Схема управления ГУН.*

Фильтр-модулятор состоит из двух интегрирующих звеньев, охваченных положительной обратной связью, и имеет амплитудную и фазовую характеристики, аналогичные характеристикам LCR - контура.

Резонансная частота фильтра  $f_0$  примерно настроена на центральную частоту генератора (16 кГц).



*Схема фильтра-модулятора.*