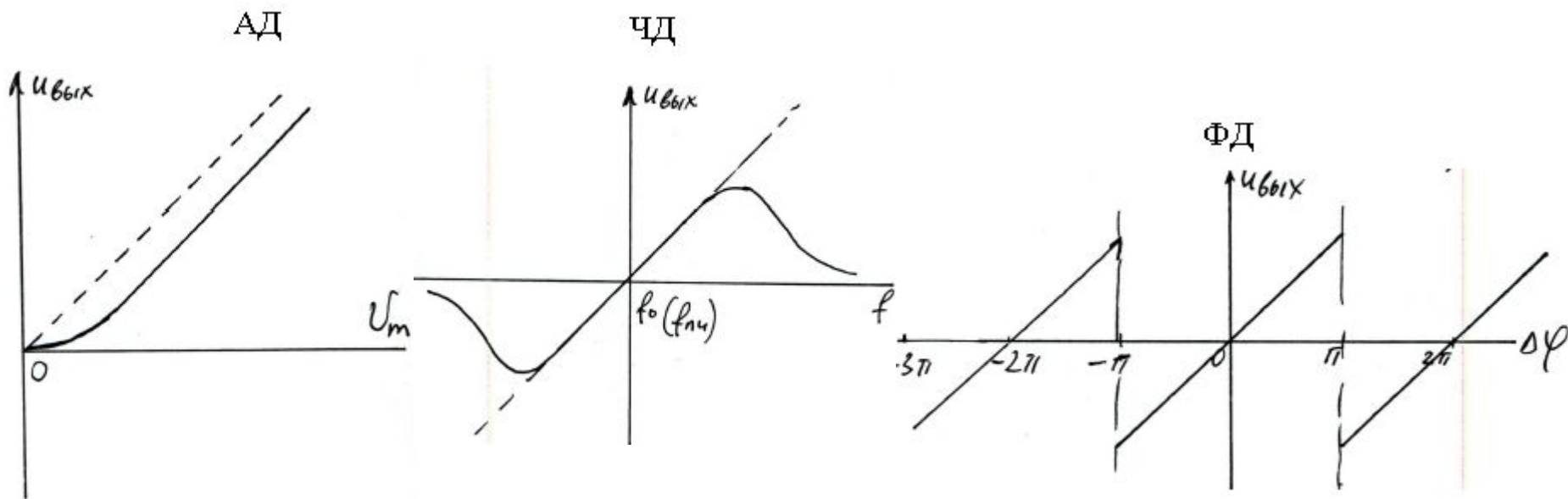


## Детекторы

Детектор – устройство, преобразующее модулированный высокочастотный сигнал в низкочастотное напряжение, соответствующее переданному сообщению

В зависимости от вида модуляции детектируемого сигнала различают АД, ЧД, ФД, детектор сигнала однополосной модуляции и т.д.

Детекторная характеристика – зависимость выходного напряжения от того параметра сигнала, на который детектор реагирует. Детекторная х-ка должна быть линейной с возможно большей крутизной.

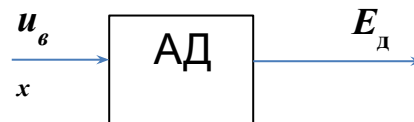
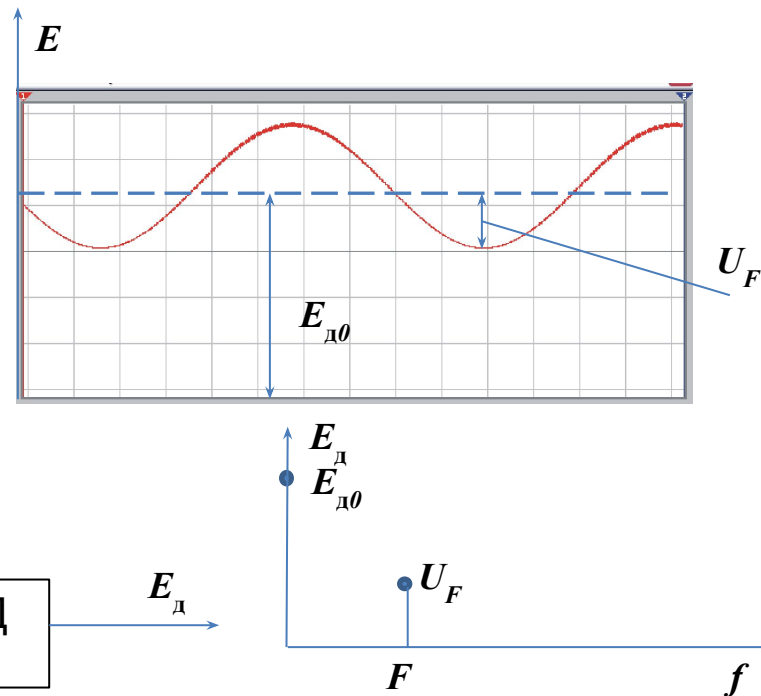
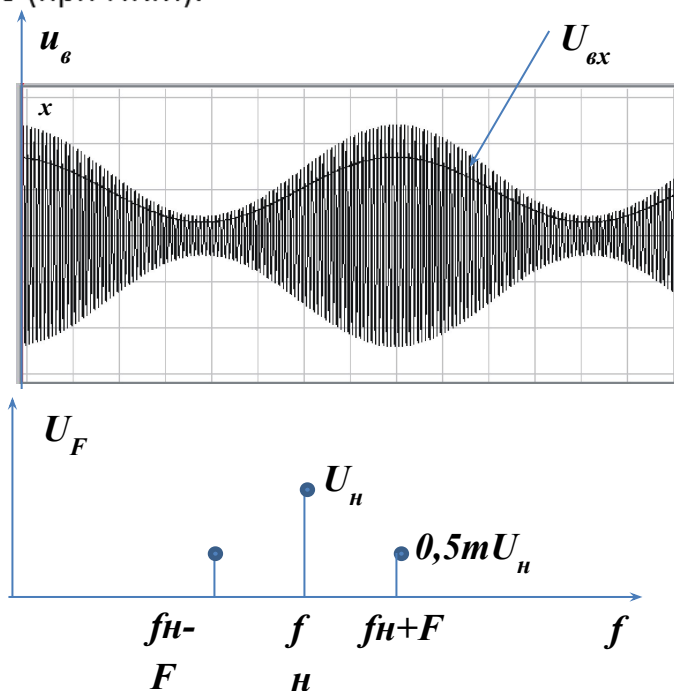


Вид радиосигнала	Непрерывный квазигармонический	Радиоимпульсный	Видеоимпульсный
Вид модуляции	АМ, ЧМ, ФМ	АИМ, ЧМ, ШИМ, ВИМ	АИМ, ШИМ, ФИМ, ИКМ
Вид детектора	АД, ЧД, ФД	Пиковые детекторы и детекторы радиоимпульсов	Пиковые детекторы, детекторы видеоимпульсов (цифровые и аналоговые) и декодеры.

**Непрерывные квазигармонические сигналы** - сообщение заложено в модуляцию амплитуды  $U_{вх}$ , или частоты  $f_{вх}$ , или фазы  $\varphi_{вх}$ .

**Радиоимпульсные сигналы** - сообщение передается с помощью модуляции: пикового напряжения  $U_{пик}$ , частоты  $f_{вх}$  или длительности импульса  $\tau_{и}$  (при ШИМ), времени начала импульса  $t_{ни}$  (ВИМ).

**Видеоимпульсные сигналы** - модуляция осуществляется изменением пикового значения  $U_{пик}$  (АИМ), длительности импульса  $\tau_{и}$  (при ШИМ), времени начала импульса  $t_{ни}$  (ФИМ), а также при изменении комбинации импульсов в группе (при ИКМ).



## Схема простейшего амплитудного модулятора, выполненного на аналоговом перемножителе

Аналоговый перемножитель относится к параметрическим цепям, так как коэффициент передачи по одному из двух его входов зависит от напряжения на другом его входе.

На вход X перемножителя поступает модулирующее (гармоническое) низкочастотное напряжение  $u(t) = U_m \cos(\Omega t)$ . Кроме переменного низкочастотного напряжения на этот вход дополнительно подается постоянное напряжение  $U_0$ , т.е.

$$u(t) = U_0 + U_m \cos(\Omega t) = U_0 (1 + m \cos(\Omega t))$$

где  $m = \frac{U_m}{U_0}$  - коэффициент амплитудной модуляции.

На второй вход Y перемножителя поступает высокочастотное напряжение несущей:

$$u_{\text{нес}}(t) = U_{\text{нес}} \cos(\omega t)$$

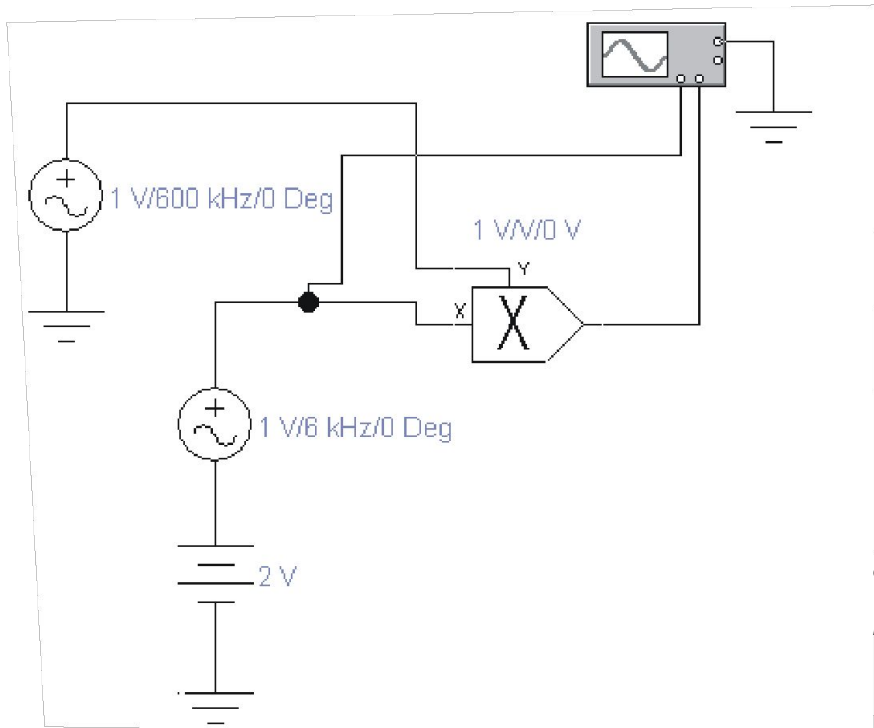
Напряжение на выходе аналогового перемножителя имеет вид:

$$z(t) = k[U_0 + u(t)]u_{\text{нес}}(t)$$

где  $k$  - коэффициент перемножителя,

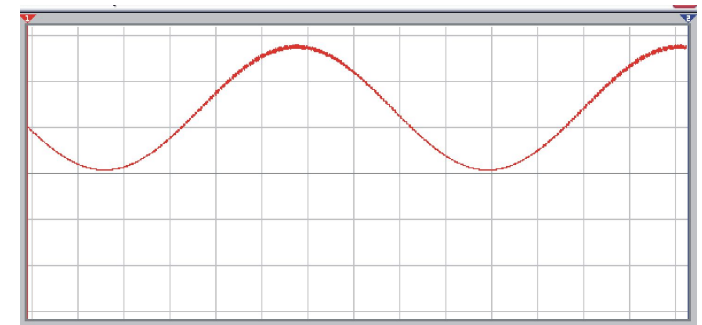
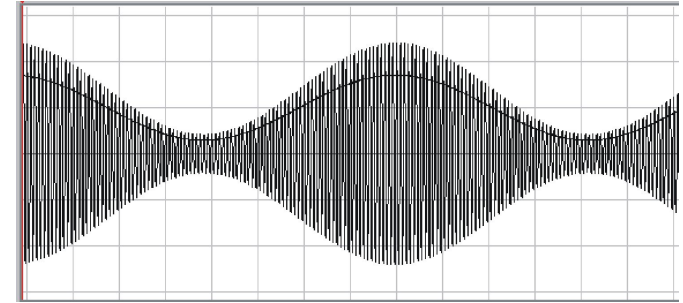
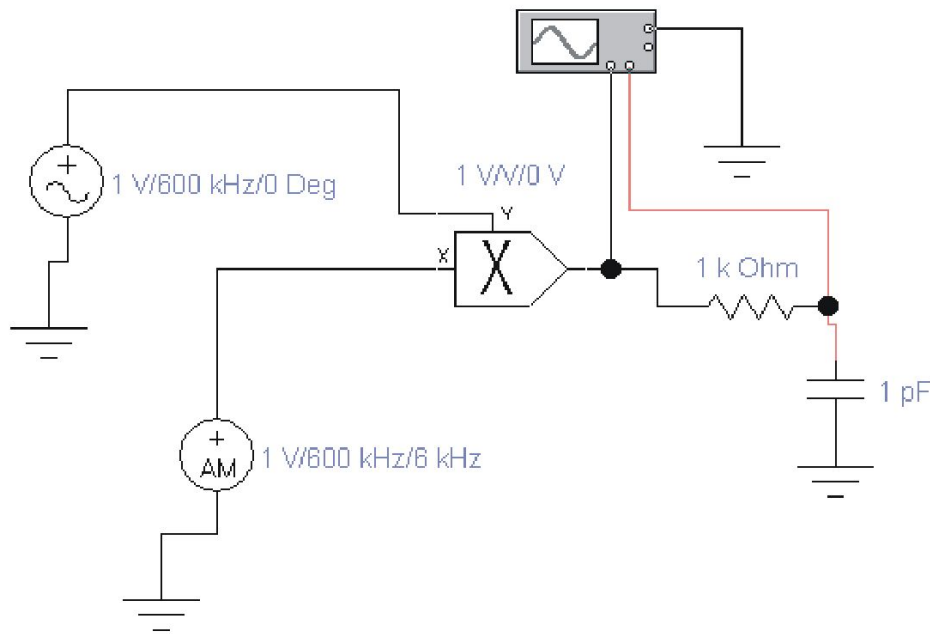
$$z(t) = kU_0 u_{\text{нес}}(t) + ku(t)u_{\text{нес}}(t)$$

$$z(t) = kU_0 u_{\text{нес}} [1 + m \cos(\Omega t)] \cos(\omega t)$$



ил  
и

## Детектор АМ-сигналов на аналоговом умножителе



Синхронное детектирование осуществляется путем умножения сигнала на опорное напряжение

$$u_{\text{нес}}(t) = U_{\text{нес}} \cos(\omega t)$$

Получаемое на выходе детектора напряжение содержит составляющую с частотой  $2\omega$ , которая подавляется фильтром

нижних частот:

$$u(t) = U_0 + U_m \cos(\Omega t)(0,5 + 0,5 \cos 2\omega t) =$$

$$= U_0 (1 + m \cos(\Omega t))(0,5 + 0,5 \cos 2\omega t)$$

## Детекторы амплитудно-модулированных сигналов

АД можно разделить на 2 класса:

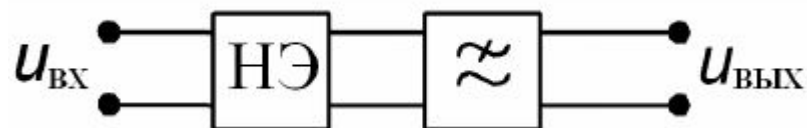
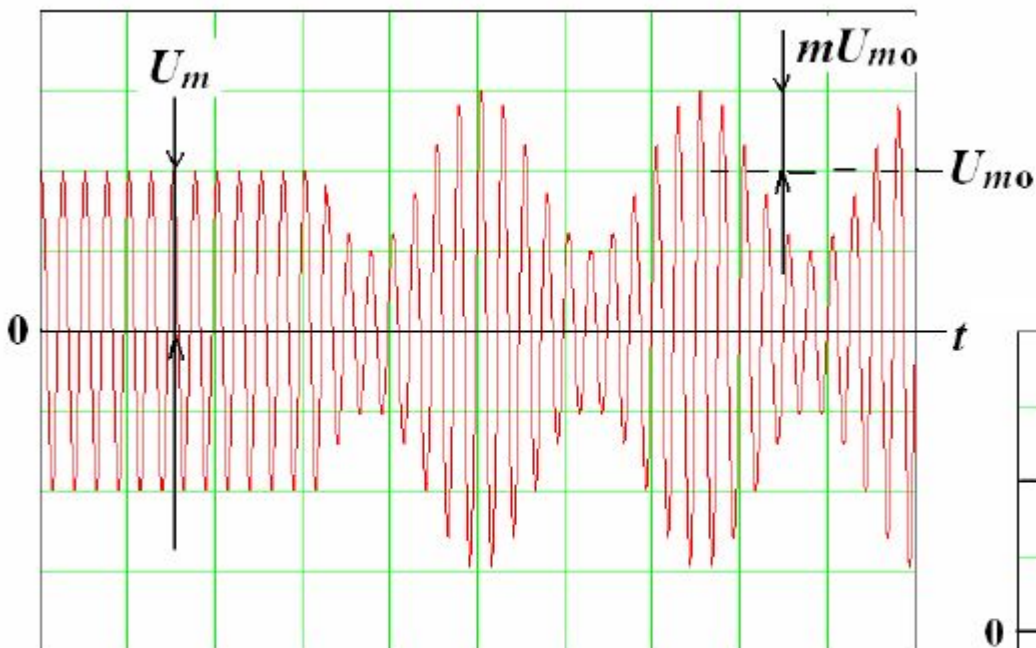
- АД на основе эффекта выпрямления (детекторы огибающей)
- АД на основе эффекта преобразования частоты (синхронные детекторы)

### 1. Детекторы огибающей

#### 1.1. Принцип работы и схемы

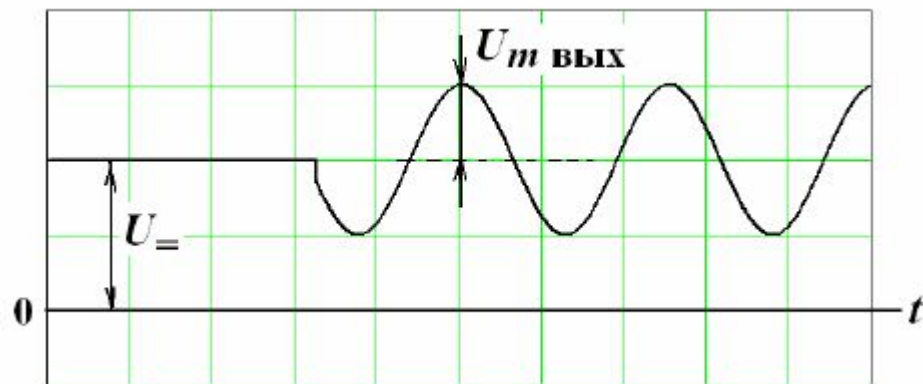
$$u_{\text{ВХ}} = U_m \cos(\omega \cdot t)$$

$$u_{\text{ВХ}} = U_{m0} [1 + m \cdot \cos(\Omega \cdot t)] \cos(\omega \cdot t)$$



$$u_{\text{ВЫХ}} = U_ =$$

$$u_{\text{ВЫХ}} = U_ = + U_m \text{ Вых} \cos(\Omega \cdot t)$$



Коэффициент передачи детектора по постоянному току:

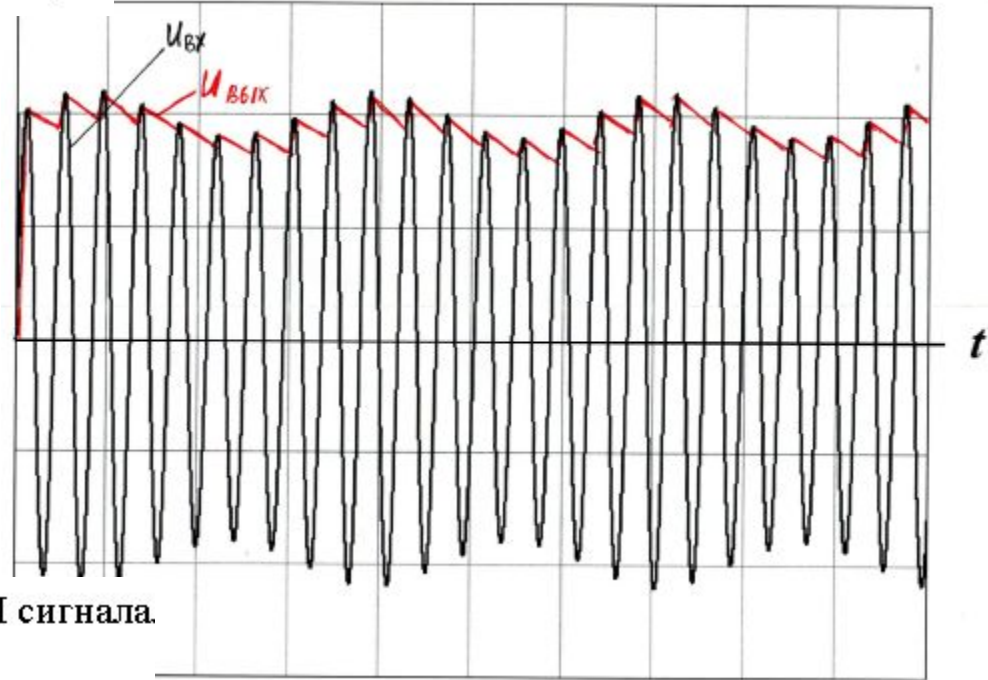
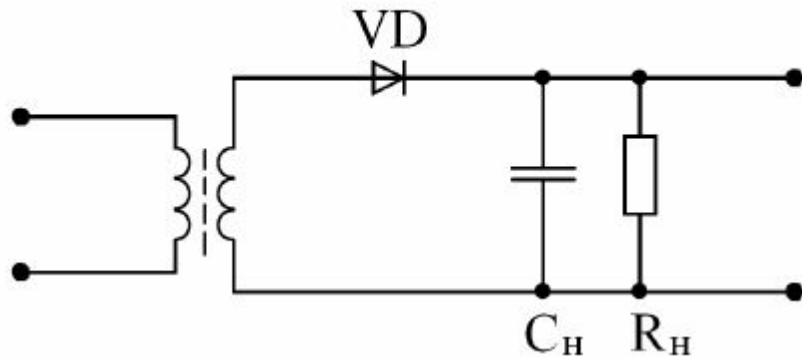
$$K_{D=} = \frac{U_{=}}{U_m}$$

Коэффициент передачи детектора по переменному току:

$$K_{D\Omega} = \frac{U_{m\text{ВЫХ}}}{m \cdot U_{m0}}$$

Наилучшими показателями среди детекторов огибающей обладают диодные АД (простая схема, малые НИ)

Последовательная схема АД



Выходное напряжение повторяет огибающую ВЧ сигнала.  
Коэффициент передачи АД близок к 1.

В спектре выходного напряжения имеются остатки ВЧ.

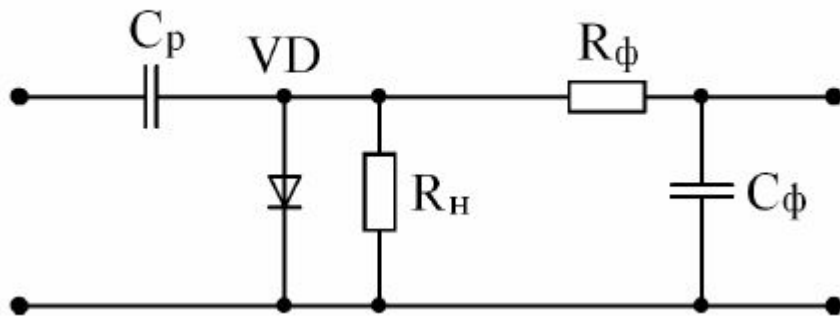
Важно правильно выбрать постоянную времени нагрузки

$$\frac{1}{\omega \cdot C_H} \ll R_H \ll \frac{1}{\Omega_B \cdot C_H}$$

$$\tau_{ЗАР} = R_D \cdot C_H$$

$$\tau_{РАЗР} = \tau_H = R_H \cdot C_H$$

## Параллельная схема АД



Имеет гальваническую развязку с предшествующим каскадом

На  $R_n$  присутствует не только протектированное напряжение, но и ВЧ сигнал.

Необходим дополнительный фильтр для подавление ВЧ составляющих ( $R_\phi, C_\phi$ )

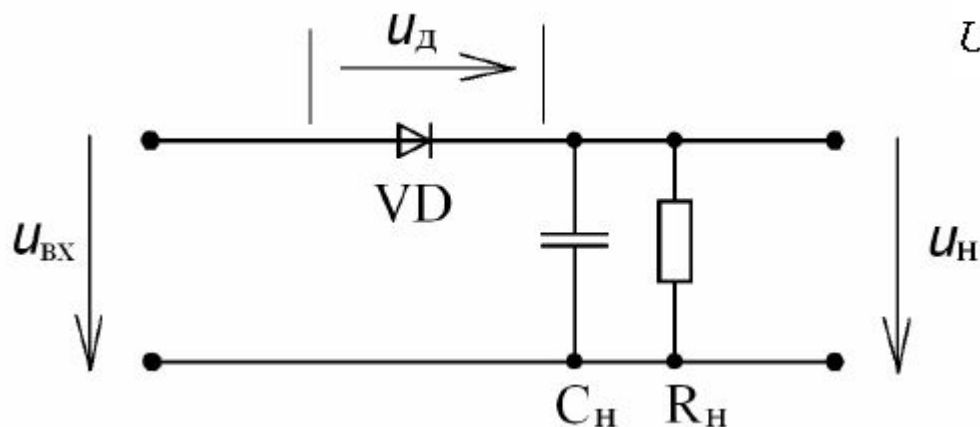
## 1.2. Анализ работы диодного АД

$$u_D = u_{BX} - u_H$$

Для гармонического сигнала:  $u_D = U_m \cos(\omega \cdot t) - U_+$

Зная  $U_m$  и ВАХ диода  $i_D(u_D)$ , необходимо найти  $U_+$

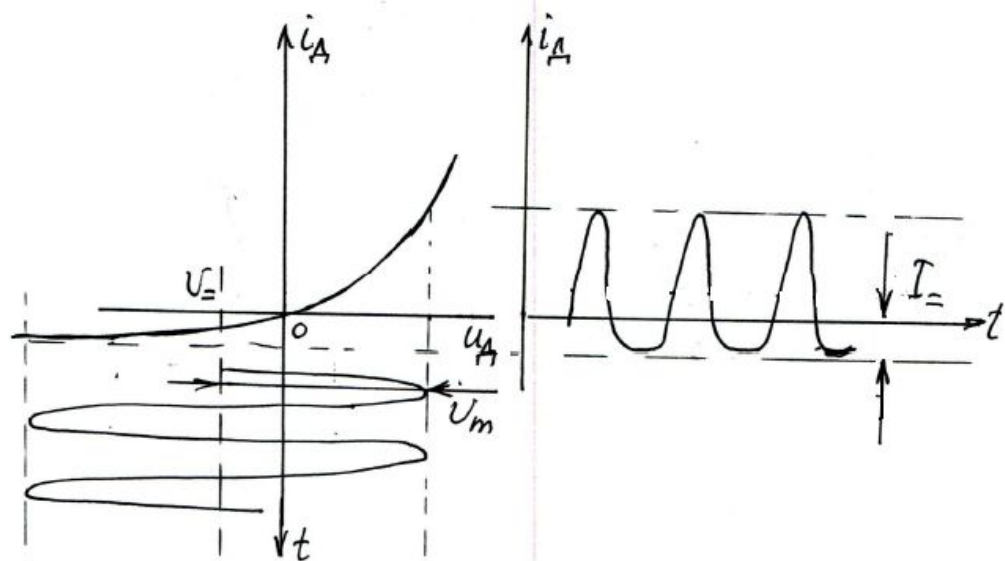
$$U_+ = I_+ \cdot R_n$$





# 1. Анализ работы диодного АД в режиме слабых сигналов

В режиме слабых сигналов ВАХ диода является монотонной функцией с относительно слабой нелинейностью



Для  $i_D = f(u_D)$  при приращении  $\Delta u_D$ :

$$i_D = S \cdot u_D + \frac{1}{2} \cdot S' \cdot u_D^2 + \frac{1}{6} \cdot S'' \cdot u_D^3 + \dots$$

$S, S', S''$  – крутизна ВАХ диода и ее производные в начале координат

$$i_D = S \cdot (U_m \cos(\omega \cdot t) - U_ =) + \frac{1}{2} \cdot S' \cdot (U_m \cos(\omega \cdot t) - U_ =)^2 + \frac{1}{6} \cdot S'' \cdot (U_m \cos(\omega \cdot t) - U_ =)^3 + \dots$$

Результатом детектирования является постоянная составляющая тока

$$I_ = = -S \cdot U_ = + \frac{1}{2} \cdot S' \cdot U_ =^2 + \frac{1}{4} \cdot S' \cdot U_m^2 + \dots$$

$U_ = \ll U_m$ , поэтому вторым слагаемым можно пренебречь

$$I_ = + S \cdot U_ = = \frac{1}{4} \cdot S' \cdot U_m^2$$

$$\frac{U_ =}{R_H} + S \cdot U_ = = \frac{1}{4} \cdot S' \cdot U_m^2$$

$$U_ = = \frac{S'}{4 \cdot \left( S + \frac{1}{R_H} \right)} \cdot U_m^2$$

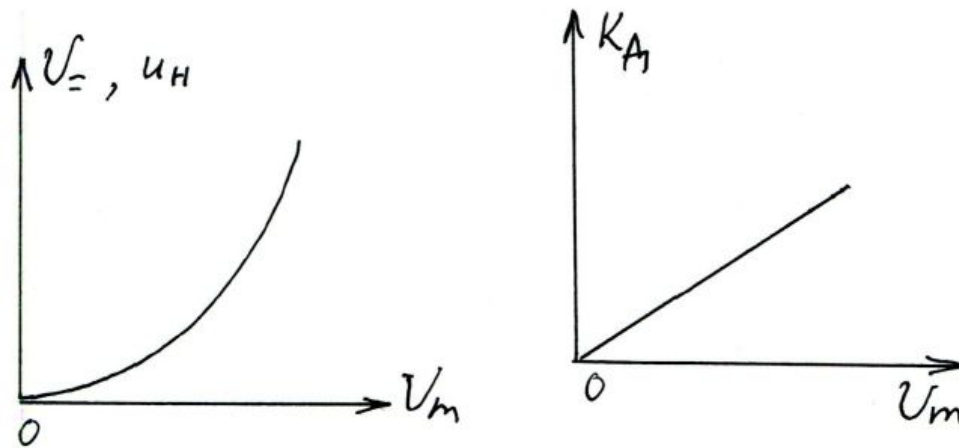
$$K_{Д} = \frac{U_ =}{U_m}$$

$$K_{Д} = \frac{S'}{4 \cdot \left( S + \frac{1}{R_H} \right)} \cdot U_m$$



Обычно:

$$\frac{S'}{4 \cdot \left( S + \frac{1}{R_H} \right)} = (1 \dots 10) \quad 1/B$$



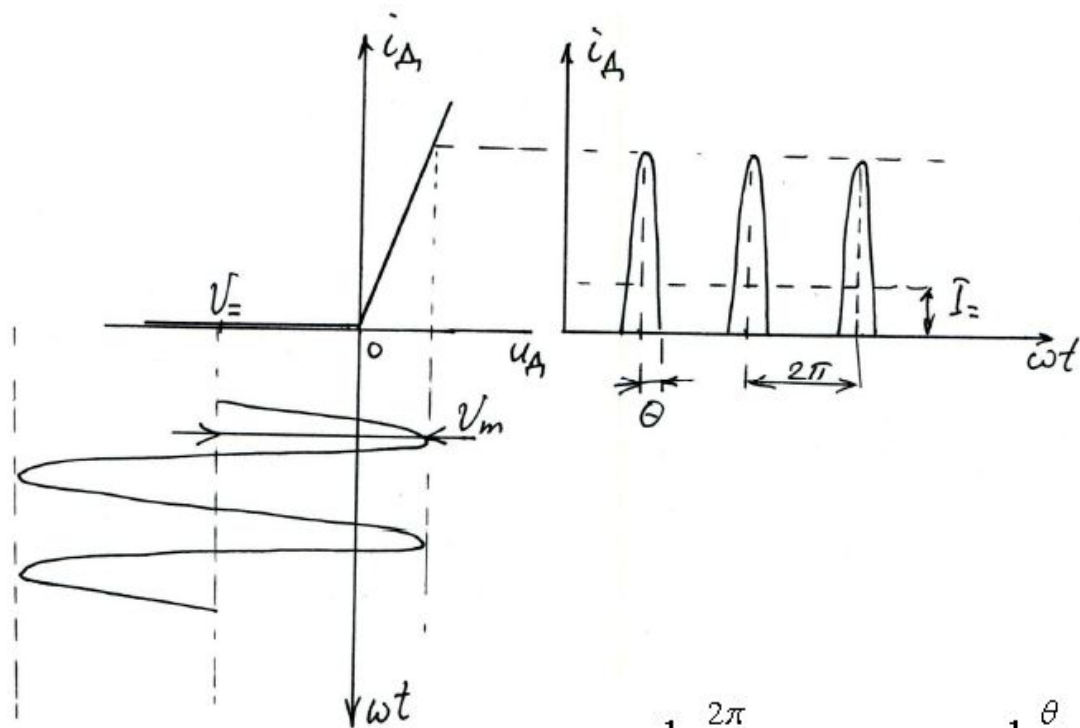
При  $U_m = 1$  мВ  $K_d = 5 \cdot 10^{-3}$ , а  $U_{н} = 5 \cdot 10^{-6}$  В или 5 мкВ

Выводы:

- В режиме слабых сигналов детекторная характеристика квадратичная. Детектирование сопровождается значительными НИ. Коэффициент гармоник равен  $K_G = m/4$  (12.5% при  $m=50\%$ )
- Коэффициент передачи детектора значительно меньше единицы и зависит от амплитуды ВЧ сигнала.
- Детектор в режиме слабых сигналов работает плохо!

## Анализ работы диодного АД в режиме сильных сигналов

В режиме сильных сигналов ВАХ диода удобно аппроксимировать линейно-ломанной функцией



$$i_D = 0 \quad (u_D \leq 0)$$

$$i_D = S \cdot u_D \quad (u_D > 0)$$

$$S = \frac{1}{R_D} \text{ — проводимость открытого диода}$$

$R_D$  — единицы или десятки Ом

$$\cos \theta = \frac{U_{\Sigma}}{U_m} = K_D \quad U_{\Sigma} = U_m \cdot \cos \theta$$

где  $\theta$  — угол отсечки диода

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_D \cdot d(\varpi \cdot t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\theta} S \cdot u_D \cdot d(\varpi \cdot t) =$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\theta} S \cdot (U_m \cos(\varpi \cdot t) - U_{\Sigma}) \cdot d(\varpi \cdot t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\theta} S \cdot (U_m \cos(\varpi \cdot t) - U_m \cos \theta) \cdot d(\varpi \cdot t) = \frac{S \cdot U_m}{\pi} (\sin \theta - \theta \cdot \cos \theta)$$

$$\frac{U_{\Sigma}}{R_H} = \frac{S \cdot U_{\Sigma}}{\pi \cdot \cos \theta} (\sin \theta - \theta \cdot \cos \theta)$$

$$\frac{U_{\Sigma}}{R_H} = \frac{S \cdot U_{\Sigma}}{\pi \cdot \cos \theta} (\sin \theta - \theta \cdot \cos \theta)$$

$$\frac{1}{R_H} = \frac{S}{\pi} (\operatorname{tg} \theta - \theta)$$

$$\frac{\pi}{S \cdot R_H} = \operatorname{tg} \theta - \theta$$

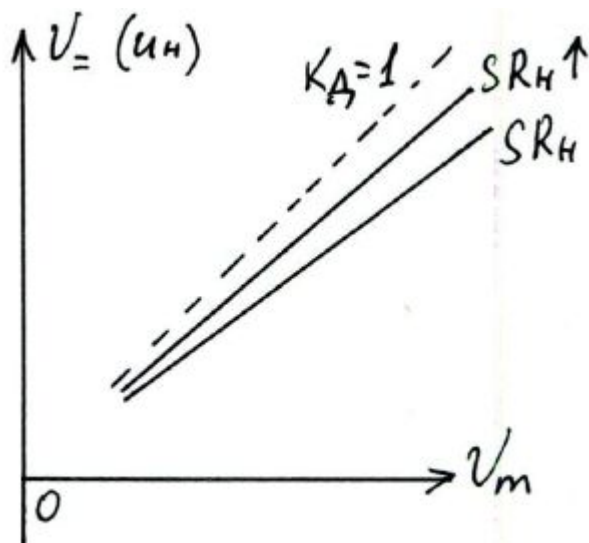
Угол отсечки  $\theta$  не зависит от амплитуды входного сигнала  $U_m$ . Следовательно от  $U_m$  не зависит и  $K_D = \cos \theta$   
 Угол отсечки  $\theta$  зависит от  $SR_H$ . Желательно, чтобы  $\theta$  был малым ( $\theta \rightarrow 0, K_D \rightarrow 1$ ).

При  $\theta \rightarrow 0$   $\operatorname{tg} \theta = \theta + \frac{\theta^3}{3} + \dots$

$$\frac{\pi}{S \cdot R_H} = \theta + \frac{\theta^3}{3} - \theta$$

$$\theta = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{S \cdot R_H}}$$

$$K_D = \cos \theta$$



Выводы:

- В режиме сильных сигналов детекторная характеристика линейная. НИ из-за ее нелинейности отсутствуют
- Коэффициент передачи детектора близок к единице ( $K_D \geq 1$ ) и не зависит от амплитуды ВЧ сигнала
- Для уменьшения угла отсечки и увеличения  $K_D$  следует увеличивать  $SR_H$ .
- Детектор в режиме сильных сигналов работает отлично

Для последовательной схемы АД входное сопротивление  $R_{ВХ} \approx \frac{R_H}{2}$ , для параллельной  $R_{ВХ} \approx \frac{R_H}{3}$

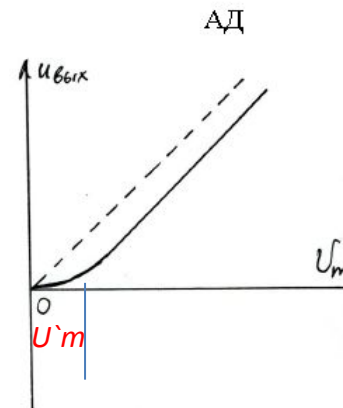
### 3. Нелинейные искажения в диодном АД

#### 3.1. Нелинейные искажения из-за нелинейности детекторной характеристики АД

Характеристика реальных АД отличается от прямолинейной.

Начальный участок характеристики имеет напряжение  $U'_m$ .

Чтобы исключить эти искажения, необходимо, чтобы даже при минимальной амплитуде сигнала оставаться в пределах линейного участка детекторной х-ки



Если минимальное напряжение на детекторе меньше  $U'_m$ , то  $K_d$  зависит от  $U_{вх}$ , а форма протектированного напряжения отличается от формы огибающей входного напряжения  $U_{вх}$ .

Минимальное значение амплитуды  $U_{m \min} = U_{m0} \cdot (1 - m)$

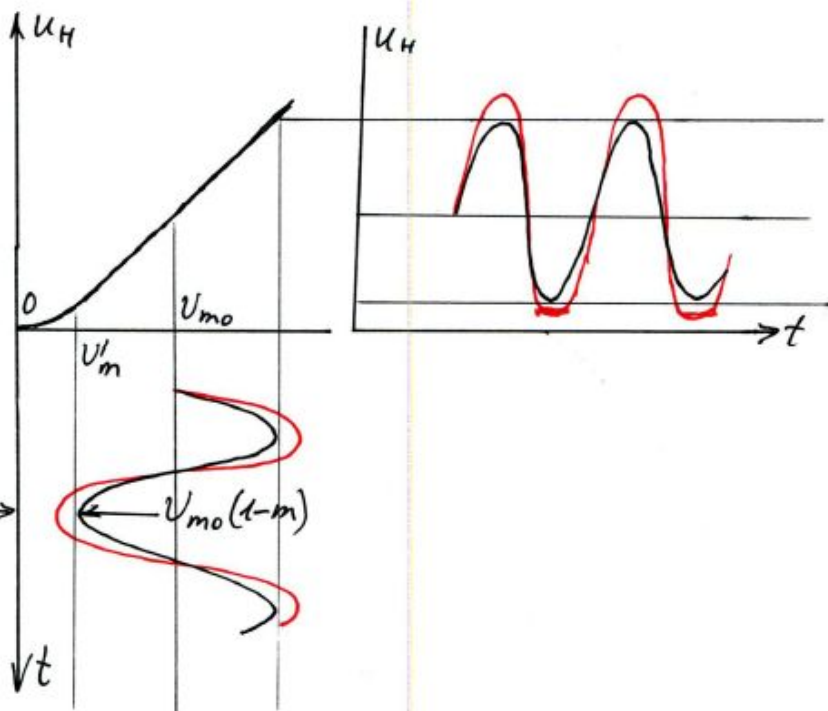
где  $U_{m0}$  – амплитуда несущей.

Условие отсутствия искажений  $U_{m0} \cdot (1 - m) \geq U'_m$

Требование к амплитуде несущей  $U_{m0} \geq \frac{U'_m}{1 - m}$

где  $U'_m$  – амплитуда нелинейного участка характеристики.

При  $U'_m = 50 - 100$  мВ и  $m = 90\%$   $U_{m0} \geq 0.5 - 1$  В



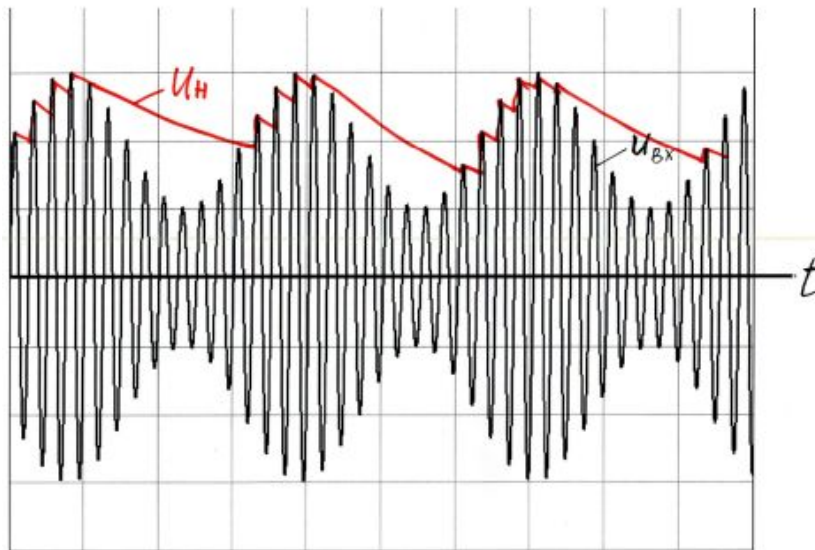
Противоречие. Для минимизации НИ в детекторе необходимо увеличивать  $U_{m0}$ , при этом, однако, возрастают НИ в последнем каскаде УПЧ

### 3.2. Нелинейные искажения из-за избыточной постоянной времени нагрузки

Для приближения  $K_D$  к единице необходимо увеличивать  $R_H$

Для увеличения входного сопротивления детектора необходимо увеличивать  $R_H$

Для лучшей фильтрации ВЧ составляющих на выходе детектора необходимо увеличивать  $C_H R_H$



$$\frac{1}{\omega} \ll \tau_H \ll \frac{1}{\Omega_B}$$

Исследовав производные на экстремум, получим:

$$\tau_H < \frac{1}{\Omega_B} \sqrt{\frac{1-m^2}{m}}$$

При  $m = 70\%$   $\tau_H < \frac{1}{\Omega_B}$

Пример:  $f_{ПЧ} = 465$  кГц,  $F = 50 - 5000$  Гц,  $R_H = 3$  кОм

Необходимо выбрать  $C_H$ .

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{ПЧ} \cdot R_H} \ll C_H \ll \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F_B \cdot R_H}$$

Однако при избыточной постоянной времени нагрузки  $\tau_H = C_H R_H$  могут возникнуть характерные искажения огибающей. Разряд емкости не поспевает за изменение амплитуды входного сигнала

Искажения появляются при резких изменениях амплитуды: они опасны при большой глубине модуляции на верхних модулирующих частотах

Условие отсутствия искажений:  $\frac{du_H}{dt} \geq \left( \frac{dU_m}{dt} \right)_{\max}$

или скорость разряда конденсатора должна быть больше скорости спадания  $U_{вх} = U_m$ , но надо помнить, что тогда надо уменьшать  $C_H$ , но  $C_H > C_{диода}$ .

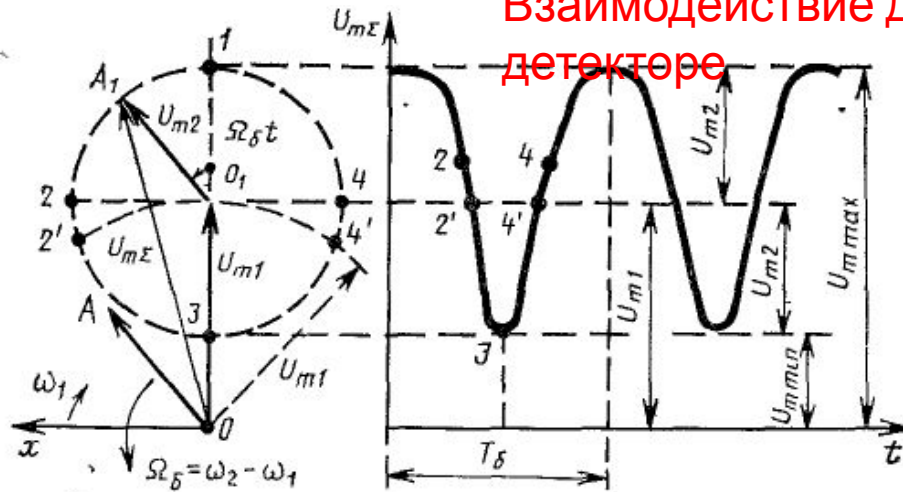
$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 465 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^3} \ll C_H \ll \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^3}$$

$$1.1 \cdot 10^{-10} \Phi \ll C_H \ll 1.1 \cdot 10^{-8} \Phi$$

Выбираем  $C_H = 10^{-9} \Phi = 1$  нФ



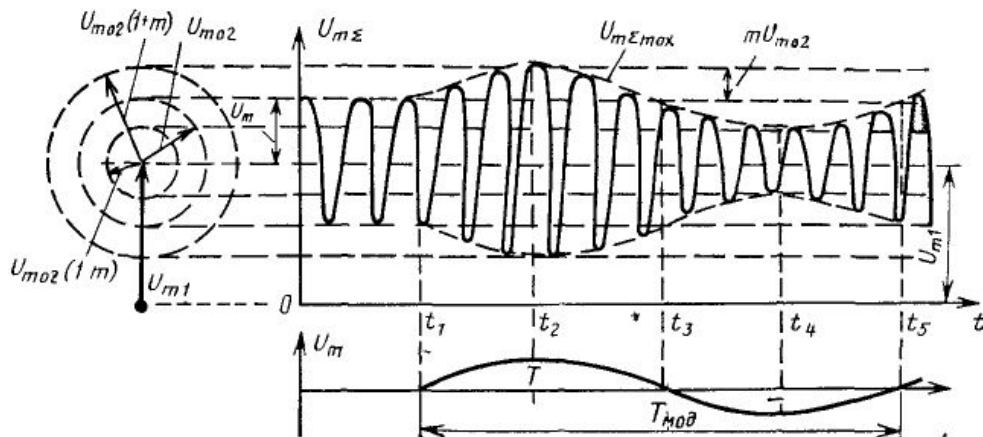
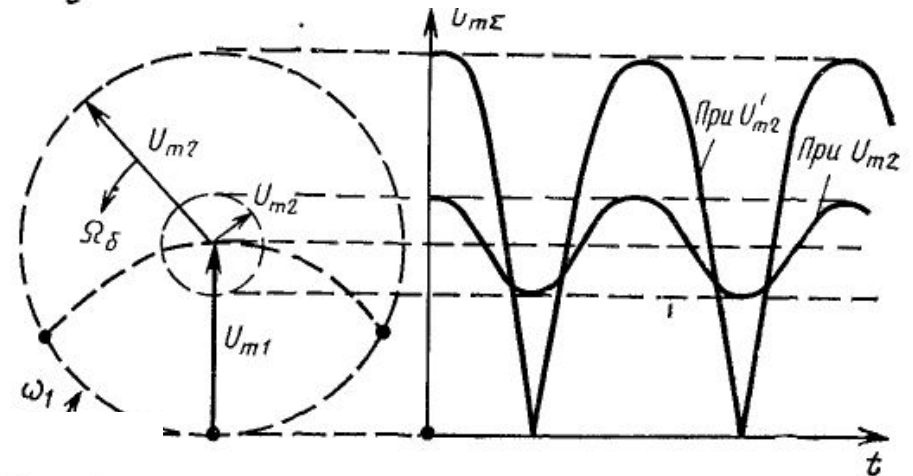
## Взаимодействие двух сигналов в детекторе



Выходное напряжение детектора определяется амплитудой **суммарного** входного напряжения.

Более сильное колебание  $u_{\text{вх}1} = U_{m1} \cos \omega_2 t$  – в виде вектора  $OO_1$ ,  
 второе колебание -  $u_{\text{вх}2} = U_{m2} \cos \omega_2 t$  – в виде вектора  $OA$ .

Амплитуда суммарного колебания  $U_{m\Sigma}$  определяется геометрической суммой векторов  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$ .



# Синхронный детектор

$$u_C = U_{mC} \cos(\omega_C t + \varphi_C)$$

$$u_\Gamma = U_{m\Gamma} \cos(\omega_\Gamma t + \varphi_\Gamma)$$

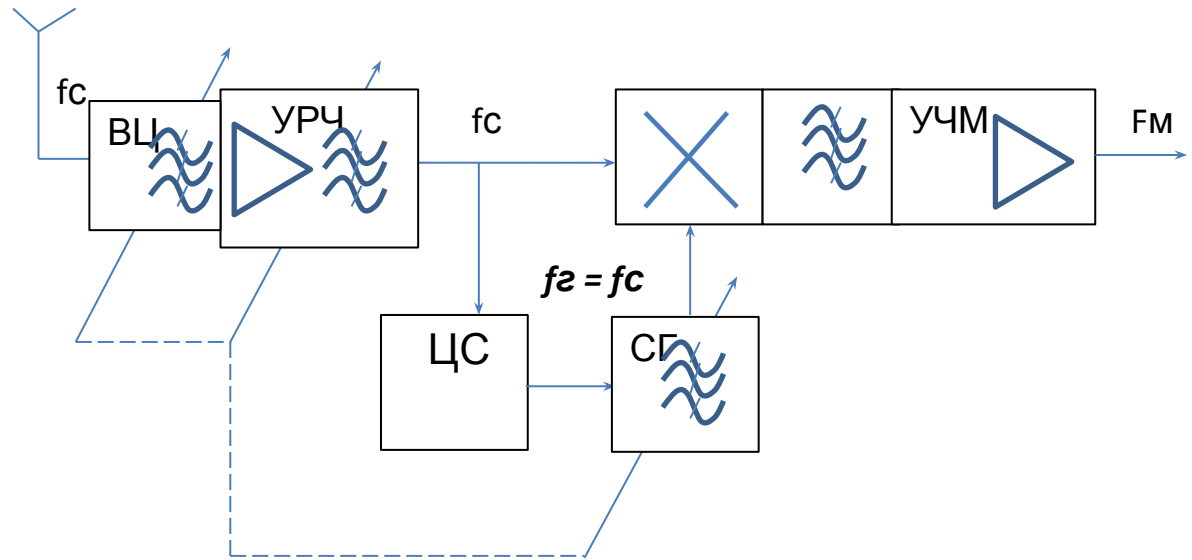


Рис. ПЧ, применяемые в приемниках - *синхродинах*

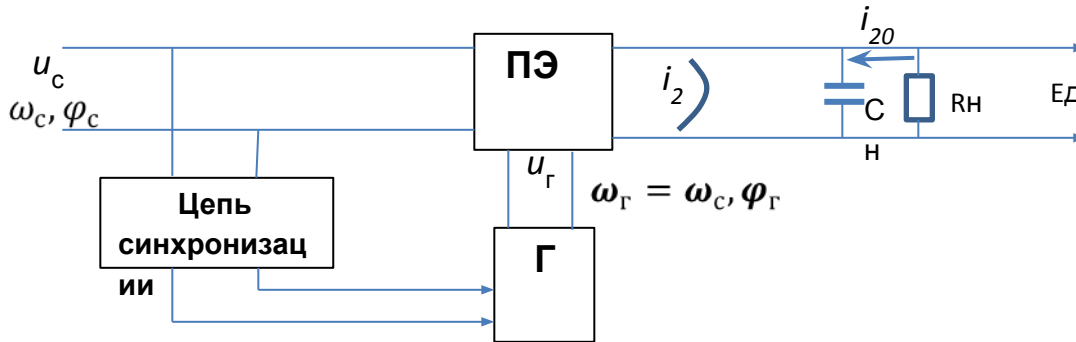
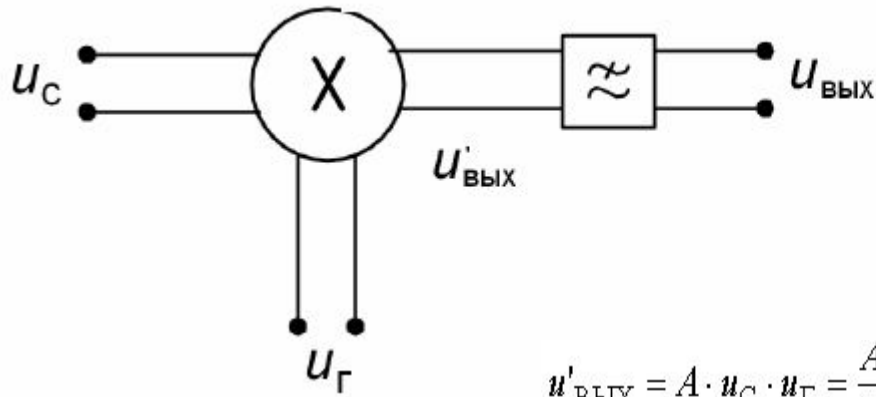


Рис. Синхронный детектор

Ток на выходе ПЭ при  $f_\Gamma = f_C$  с учетом начальной фазы колебания гетеродина:

$$i_2 \approx S_0 U_C \cos(\omega_C t + \varphi_C) + 0,5 S_1 U_C [\cos(2\omega_C t + \varphi_\Gamma + \varphi_C) + \cos(\varphi_\Gamma - \varphi_C)] + \dots$$





$$u_C = U_{mC} \cos(\omega_C t + \varphi_C)$$

$$u_\Gamma = U_{m\Gamma} \cos(\omega_\Gamma t + \varphi_\Gamma)$$

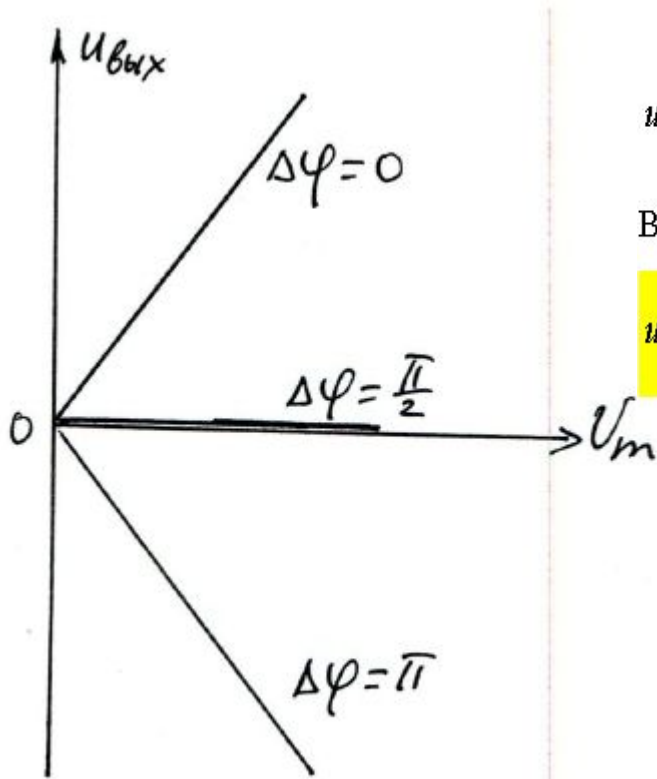
$$u'_{\text{ВЫХ}} = A \cdot u_C \cdot u_\Gamma = \frac{A}{2} U_{mC} U_{m\Gamma} \{ \cos[(\omega_C + \omega_\Gamma) \cdot t + \varphi_C + \varphi_\Gamma] + \cos[(\omega_C - \omega_\Gamma) \cdot t + \varphi_C - \varphi_\Gamma] \}$$

$$u_{\text{ВЫХ}} = \frac{A}{2} U_{mC} U_{m\Gamma} \cos[(\omega_C - \omega_\Gamma) \cdot t + \Delta\varphi] \quad \Delta\varphi = \varphi_C - \varphi_\Gamma$$

В СД  $\omega_C = \omega_\Gamma$

$$u_{\text{ВЫХ}} = \frac{A}{2} U_{mC} U_{m\Gamma} \cos(\Delta\varphi)$$

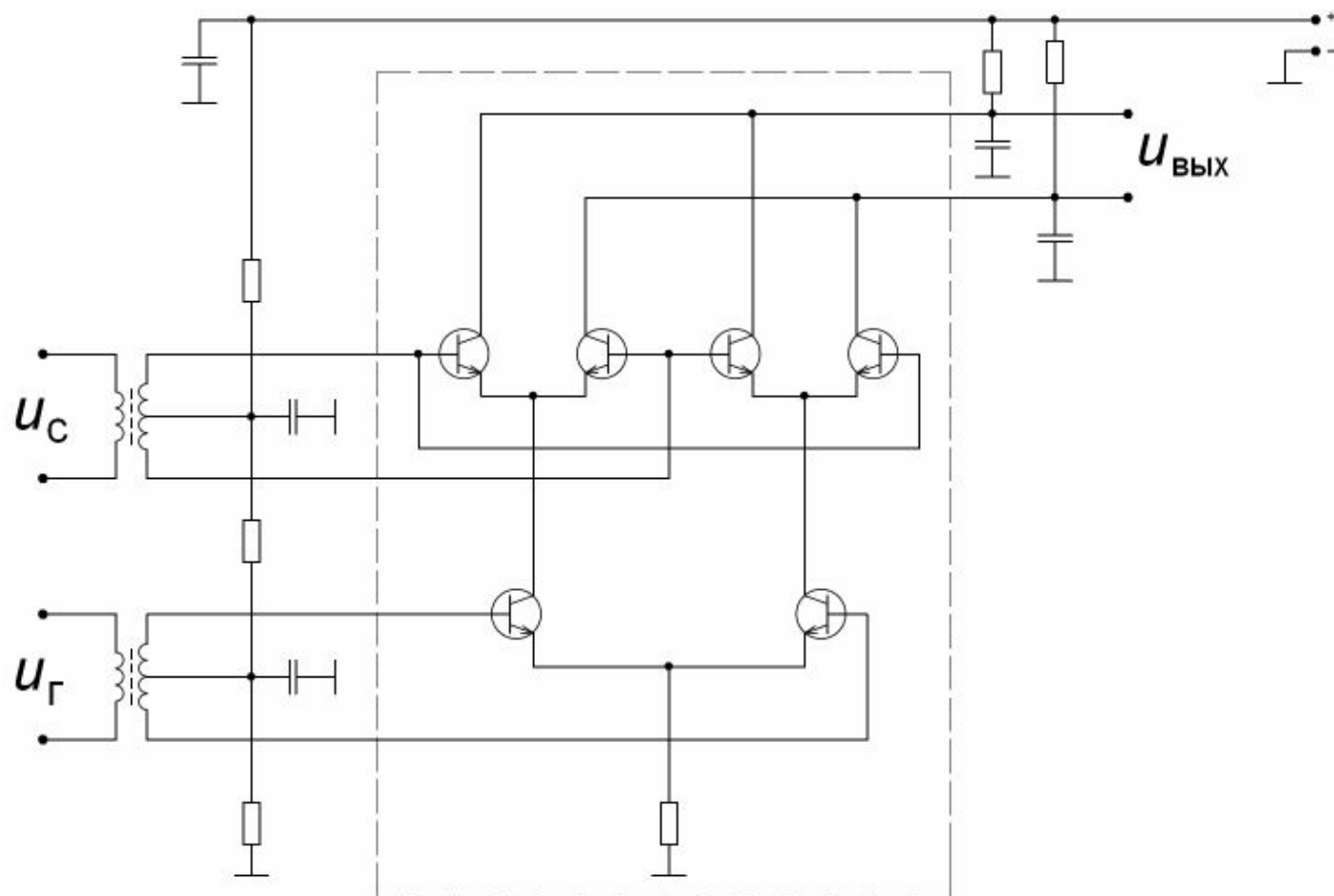
$$K_D = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{U_{mC}} = \frac{A}{2} \cdot U_{m\Gamma} \cdot \cos(\Delta\varphi)$$



## Выводы:

- СД реагирует и на амплитуду и на фазу входного сигнала. На его основе можно сделать АД и ФД
- При детектировании АМ сигнала желательно иметь  $\Delta\varphi$  близким к 0 или  $\pi$
- При  $\Delta\varphi = \pm \pi/2$  СД не реагирует на входной сигнал. Используют при детектировании КАМ
- Детекторная характеристика СД линейна и при малых амплитудах входного сигнала
- Необходимо обеспечить синхронизацию местного генератора несущей и входного сигнала ( $\omega_C = \omega_\Gamma$ )

## Вариант схемы СД:



Амплитудные ограничители – это устройства, обеспечивающие постоянство выходного напряжения при изменении входного напряжения в определенных пределах.

Бывают ограничители мгновенных значений и амплитудные.

Особенность ограничители мгновенных значений – отличие  $U_{вых}$  от  $U_{вх}$  по форме и участков с постоянным напряжением  $U_{вых}=const$ .

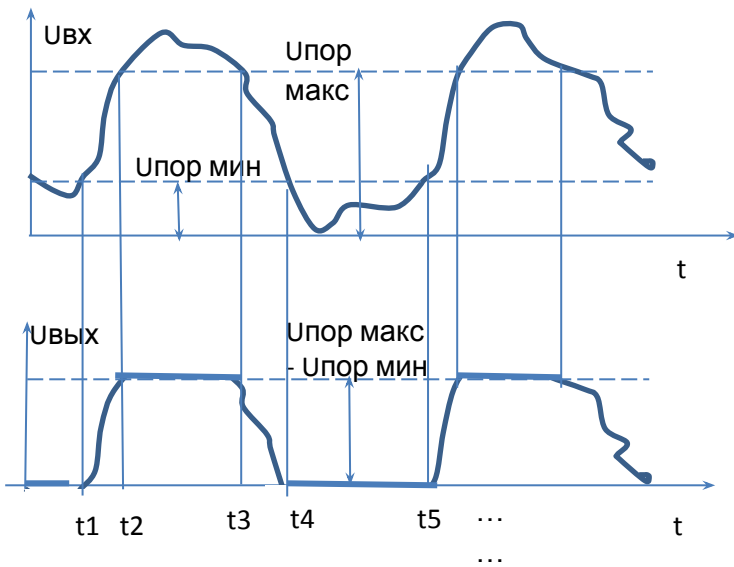


Рис. Форма напряжений для ограничителя мгновенных значений

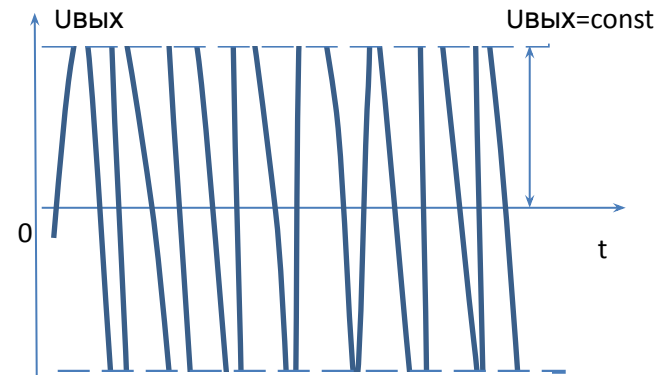
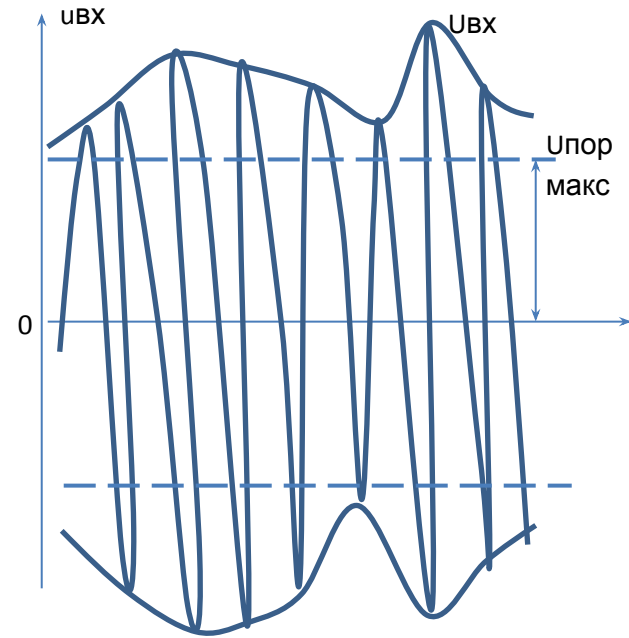


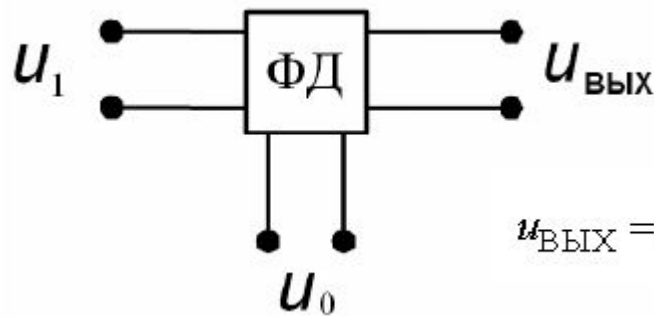
Рис. Форма напряжений для амплитудного ограничителя

**Детекторы угловой модуляции** служат для получения напряжения или тока, повторяющего закон изменения частоты или фазы входного колебания.

**Фазовый детектор** – устройство, предназначенное для получения напряжения, пропорционального разности фаз между сигналом и опорным колебанием.

**Частотный детектор** – устройство, напряжение на выходе которого определяется отклонением мгновенной частоты входного сигнала от определенного значения.

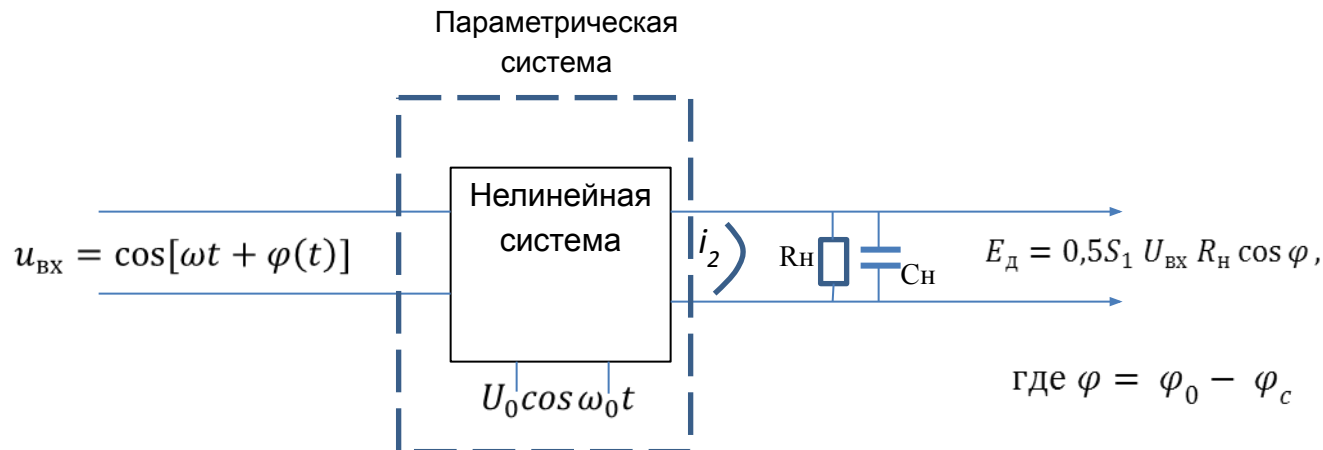
### Детекторы фазо-модулированных сигналов



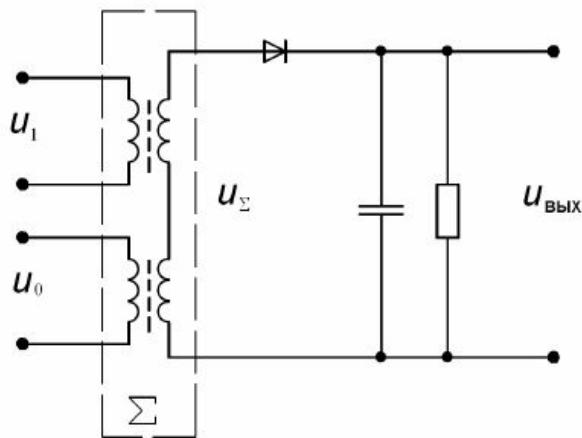
$$u_1 = U_{m1} \cos(\omega \cdot t + \varphi_1) \quad u_0 = U_{m0} \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

$$u_{\Sigma} = u_1 + u_0 = U_{m\Sigma} \cos(\omega \cdot t + \varphi_{\Sigma})$$

$$u_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{Д}} \cdot U_{m\Sigma} \approx U_{m\Sigma} = \sqrt{U_{m1}^2 + U_{m0}^2 + 2 \cdot U_{m1} \cdot U_{m0} \cdot \cos(\Delta\varphi)}$$



где  $\varphi = \varphi_0 - \varphi_c$

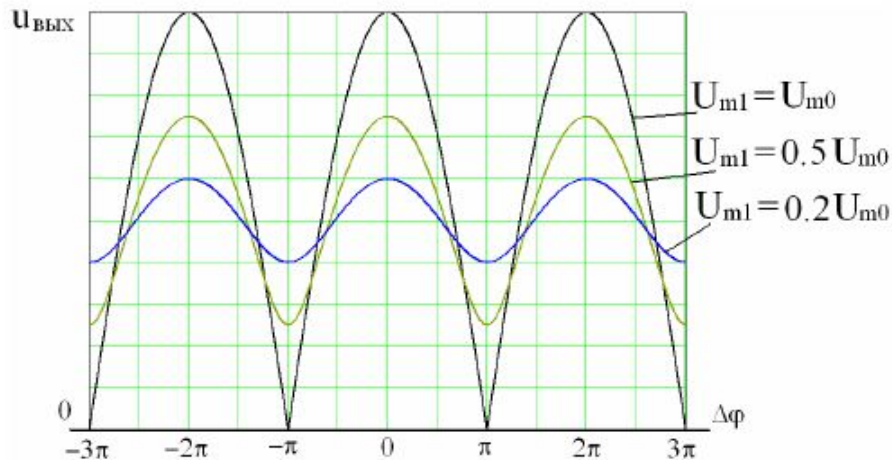


$$u_1 = U_{m1} \cos(\omega \cdot t + \varphi_1) \quad u_0 = U_{m0} \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

$$u_\Sigma = u_1 + u_0 = U_{m\Sigma} \cos(\omega \cdot t + \varphi_\Sigma)$$

$$u_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{Д}} \cdot U_{m\Sigma} \approx U_{m\Sigma} = \sqrt{U_{m1}^2 + U_{m0}^2 + 2 \cdot U_{m1} \cdot U_{m0} \cdot \cos(\Delta\varphi)}$$

Рис. Небалансный фазовый детектор



Выводы:

- Детекторная характеристика – периодическая функция  $\Delta\varphi$
- Детекторная х-ка существенно нелинейна
- Имеются ограниченные области  $\Delta\varphi$ , где детекторная х-ка приближается к линейной
- Максимальная крутизна дет. х-ки достигается при  $U_{m1} = U_{m0}$
- Выходное напряжение зависит не только от разности фаз, но и от амплитуд входных сигналов. Перед ФД необходимо включать амплитудный ограничитель (АО), устраняющий паразитную АМ
- Имеется значительная постоянная составляющая выходного напряжения

При  $U_{m1} = U_{m0}$

$$E_{\text{Д}} \approx K_{\text{Д}} \cdot \sqrt{2U_0^2 + 2U_0^2 \cos\varphi} = K_{\text{Д}} U_0 \sqrt{2(1 + \cos\varphi)}$$

- это  
циклоида

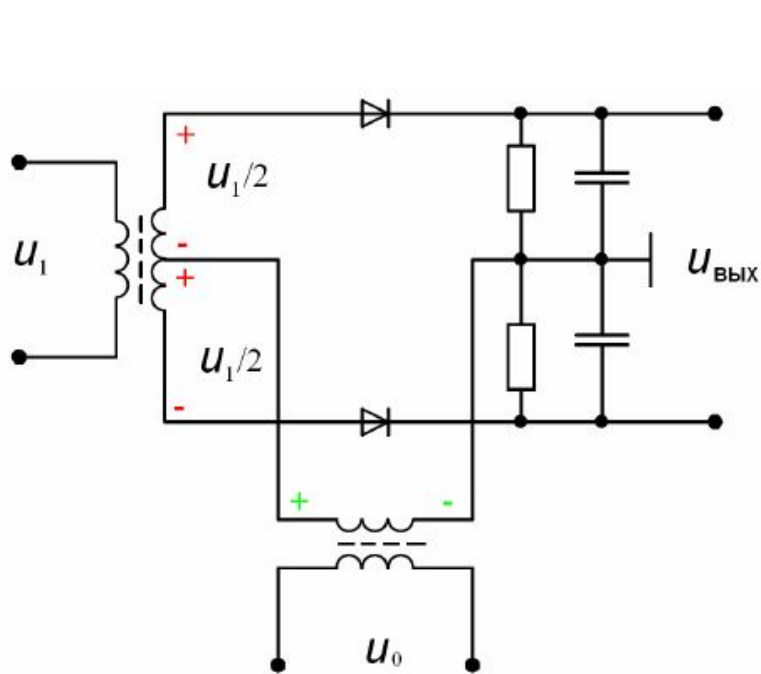
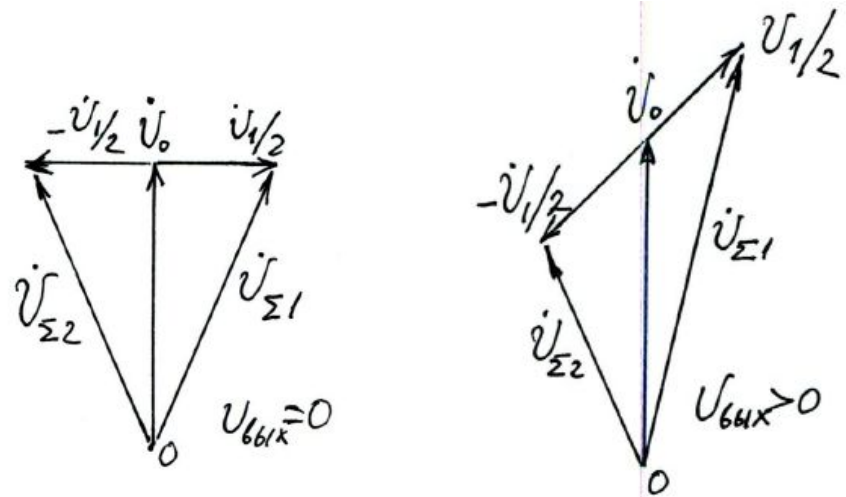


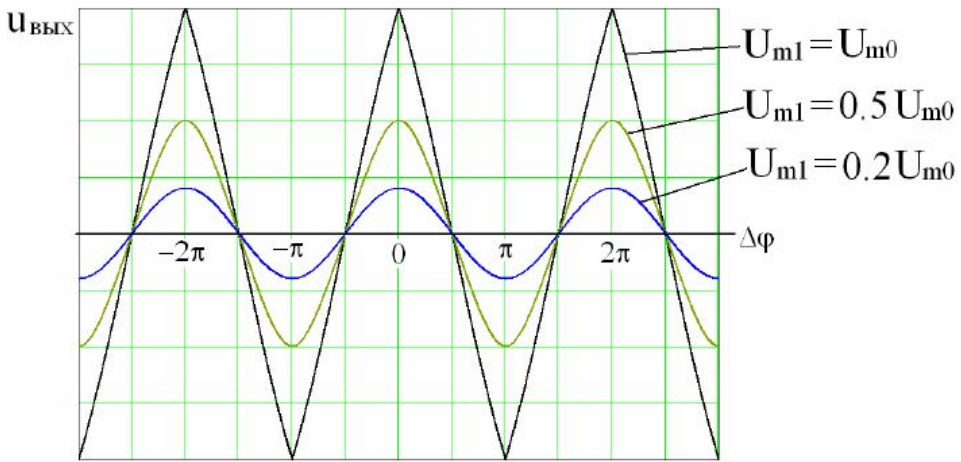
Рис. Балансный фазовый детектор



Напряжение  $u_0$  к обоим диодам приложено в фазе, а половина  $u_1$  – в противофазе

$$u_{\Sigma 1} = \frac{u_1}{2} + u_0 \quad u_{\Sigma 2} = -\frac{u_1}{2} + u_0$$

$$u_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{Д}} \cdot (U_{m \Sigma 1} - U_{m \Sigma 2})$$



Выводы:

- Детекторная х-ка близка к линейной вблизи точек  $\Delta\varphi = \pm k \pi/2$
- Максимальная крутизна и наилучшая линейность дет. х-ки достигаются при  $U_{m1} = U_{m0}$
- Выходное напряжение зависит от амплитуд входных сигналов. Необходим АО
- Постоянная составляющая выходного напряжения отсутствует

The  
End