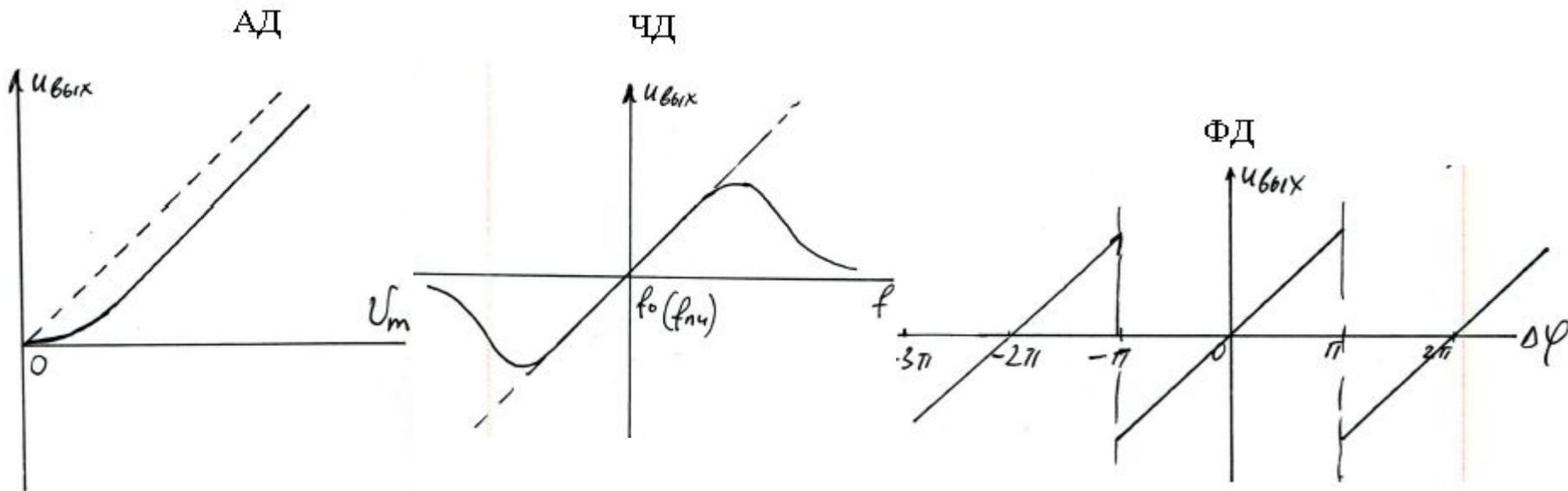


Детекторы

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).

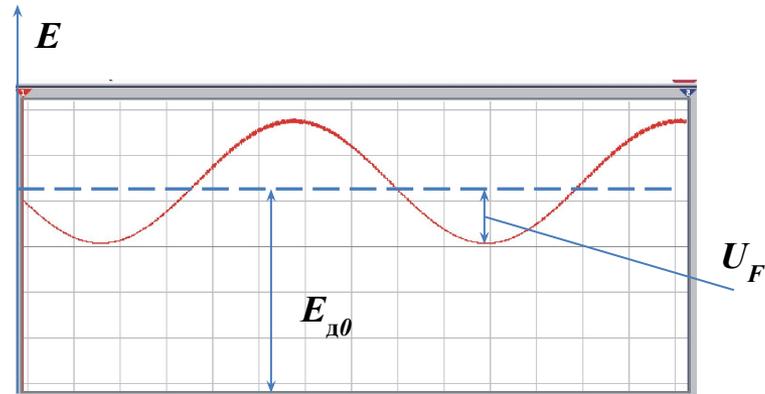
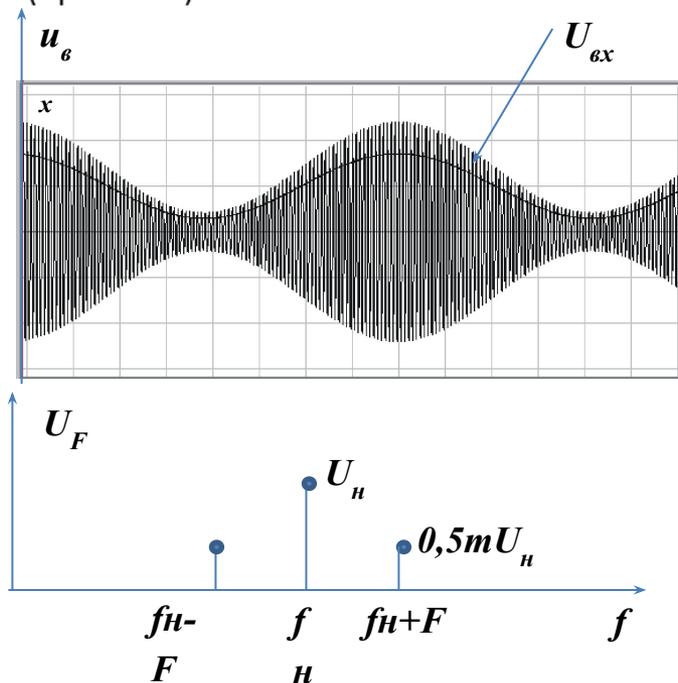


Схема простейшего амплитудного модулятора, выполненного на аналоговом перемножителе

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:

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

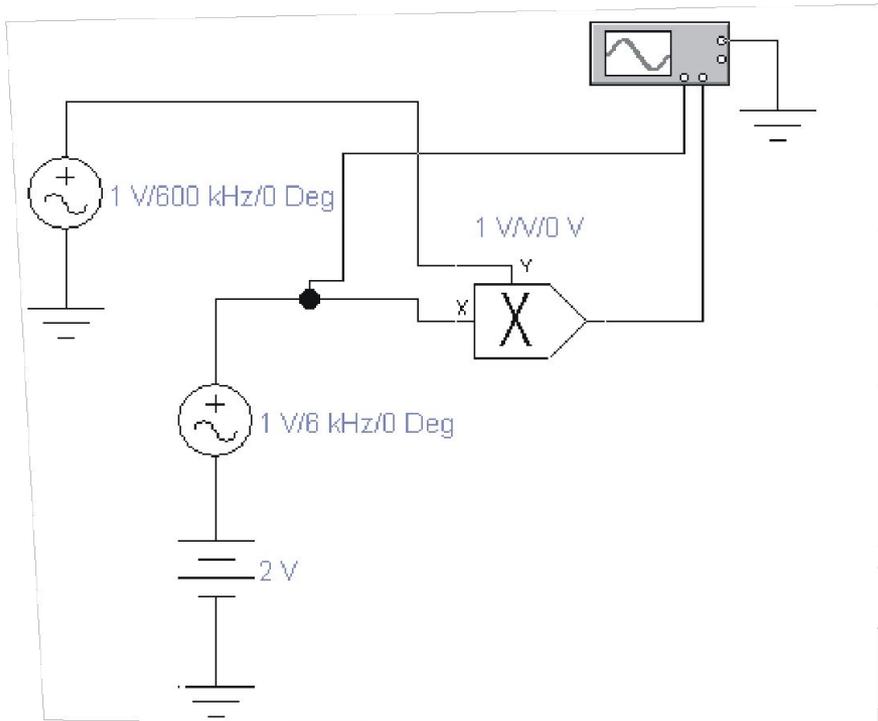
Напряжение на выходе аналогового перемножителя имеет вид:

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

где k - коэффициент перемножителя,

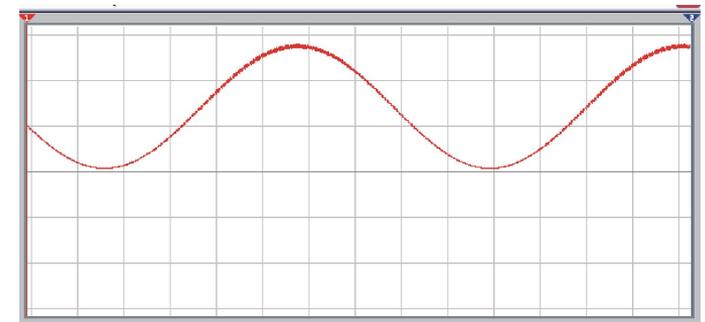
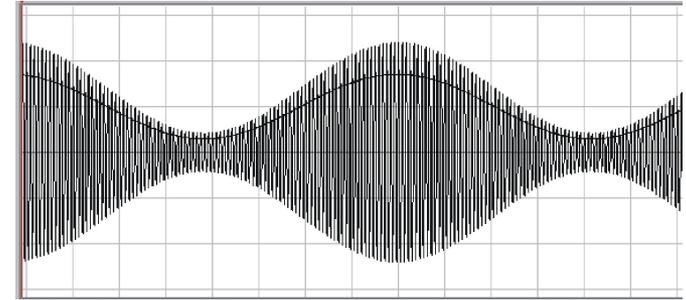
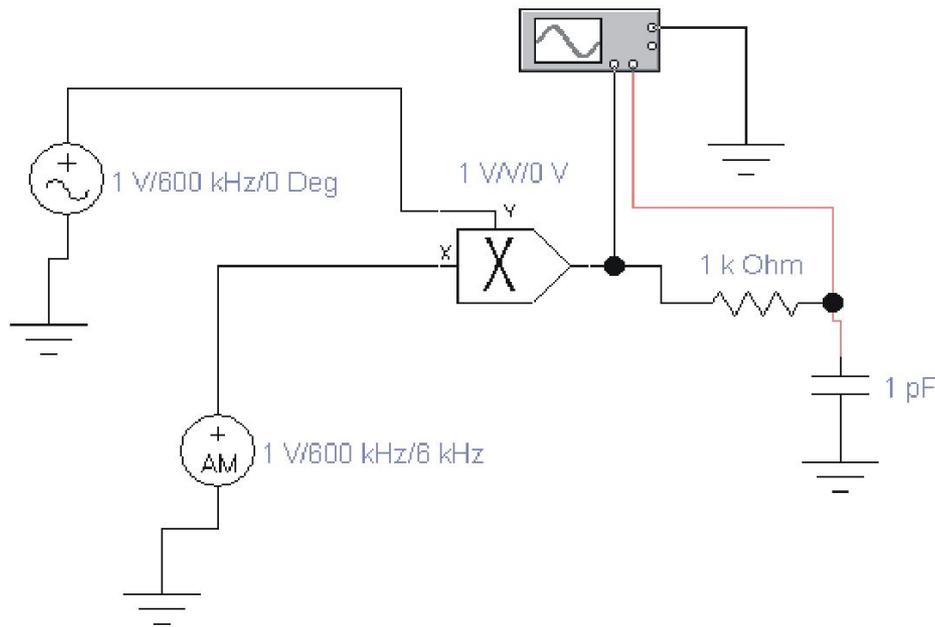
$$z(t) = kU_0 u_{\text{нес}}(t) + ku(t)u_{\text{нес}}(t)$$

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



ил
и

Детектор АМ-сигналов на аналоговом перемножителе



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 2ω , 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:

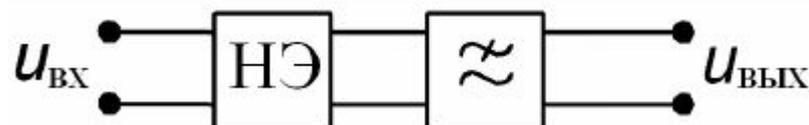
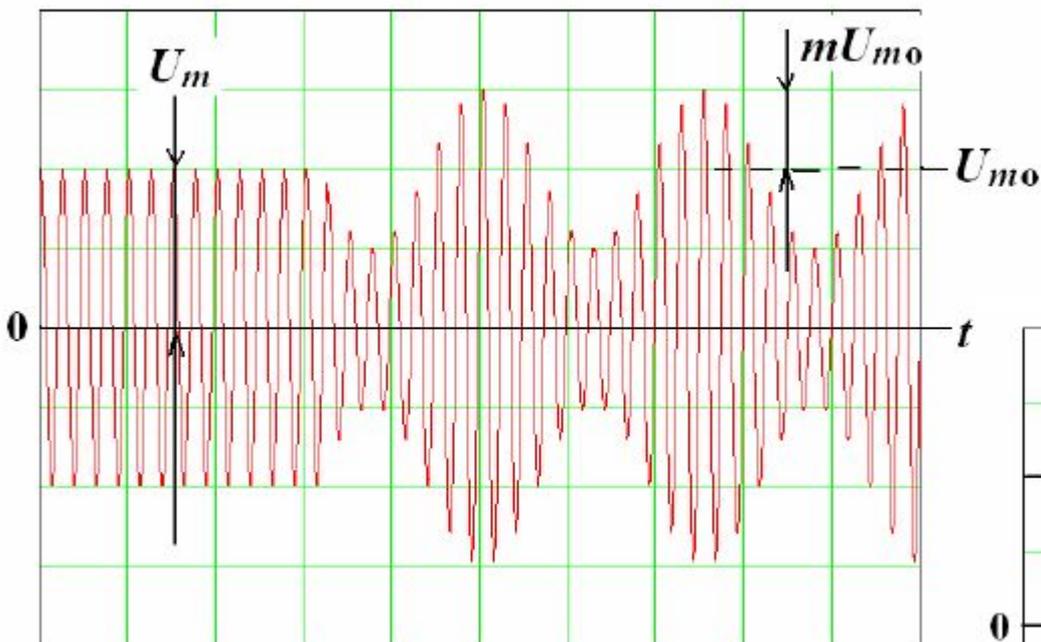
- АД на основе эффекта выпрямления (детекторы огибающей)
- АД на основе эффекта преобразования частоты (синхронные детекторы)

1. Детекторы огибающей

1.1. Принцип работы и схемы

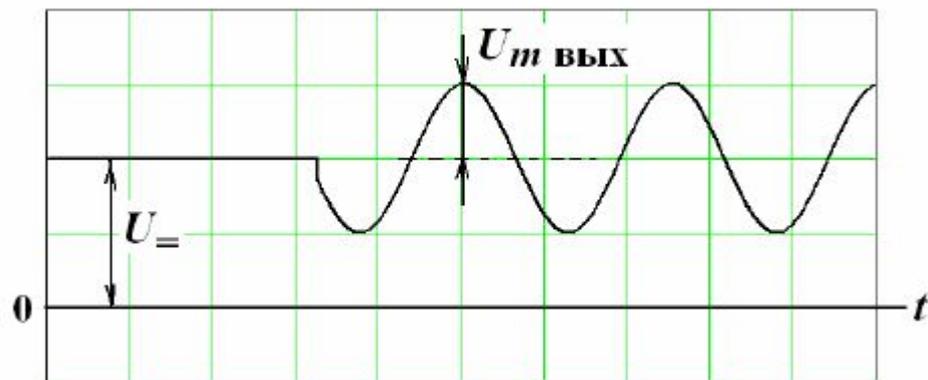
$$u_{\text{ВХ}} = U_m \cos(\omega \cdot t)$$

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



$$u_{\text{ВЫХ}} = U_ =$$

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



Коэффициент передачи детектора по постоянному току:

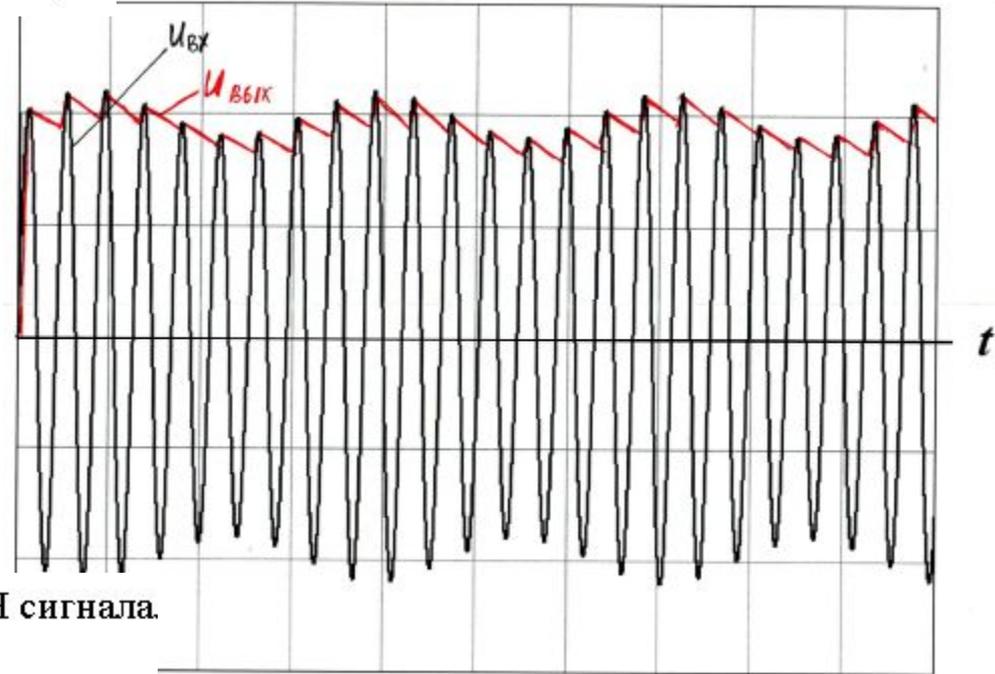
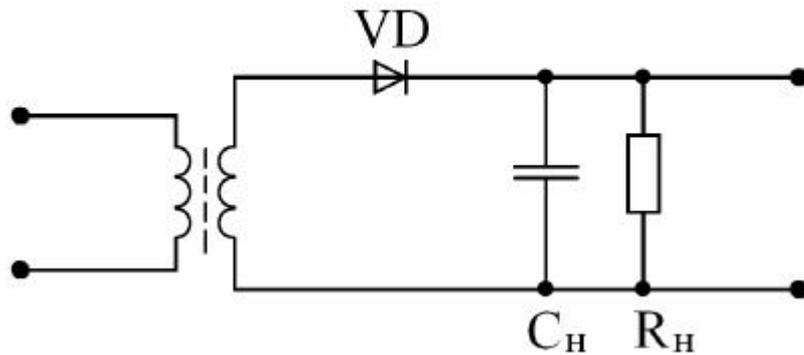
$$K_{D=} = \frac{U_{=}}{U_m}$$

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.

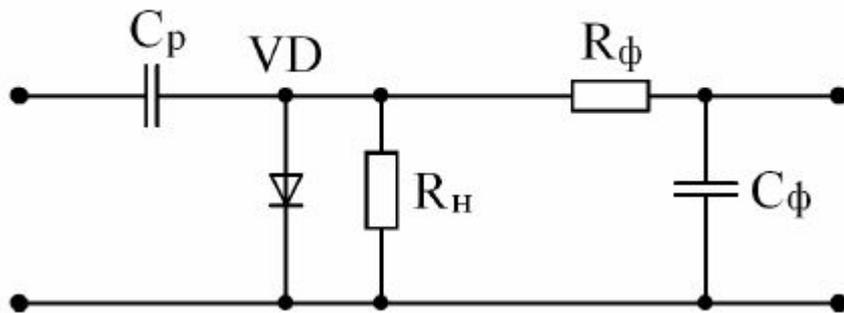
Важно правильно выбрать постоянную времени нагрузки

$$\tau_{ЗАР} = R_D \cdot C_H$$

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

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

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_ϕ, C_ϕ)

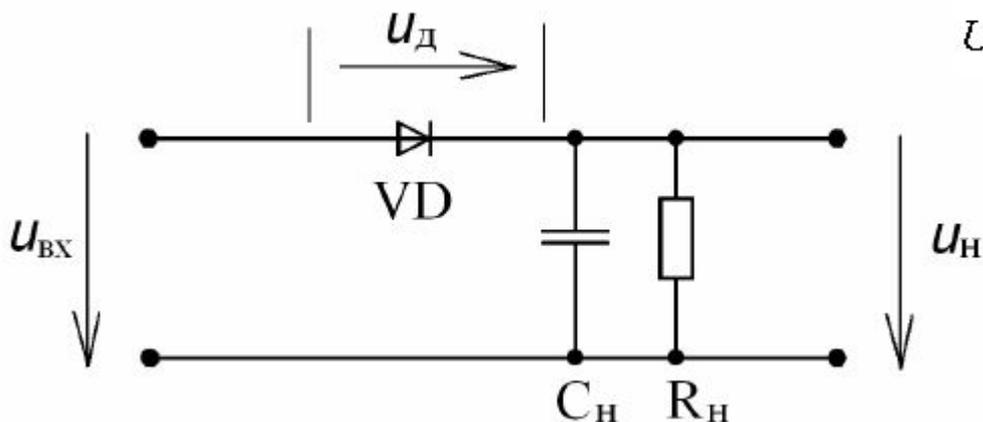
1.2. Анализ работы диодного АД

$$u_D = u_{ВХ} - u_H$$

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

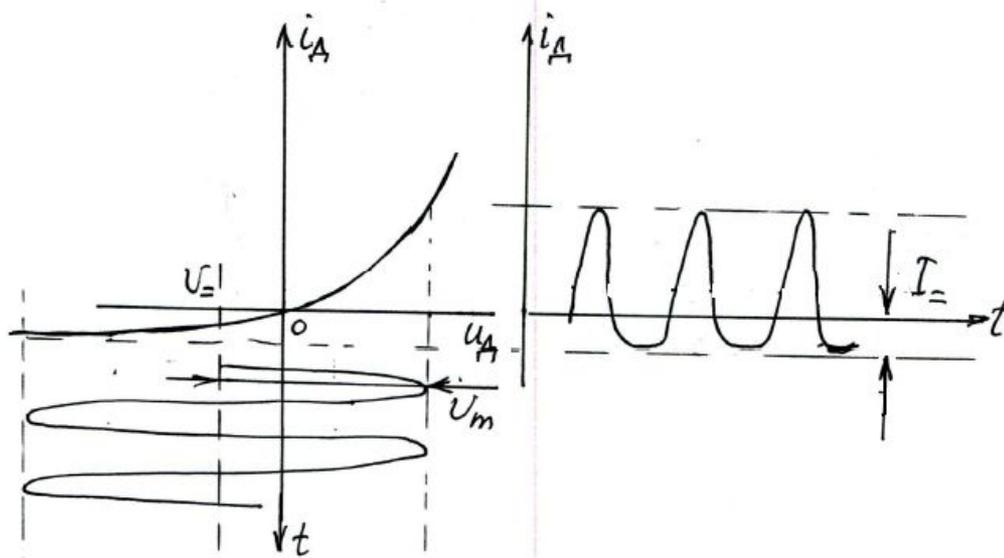
Зная U_m и ВАХ диода $i_D(u_D)$, необходимо найти U_+

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



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 Δu_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

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

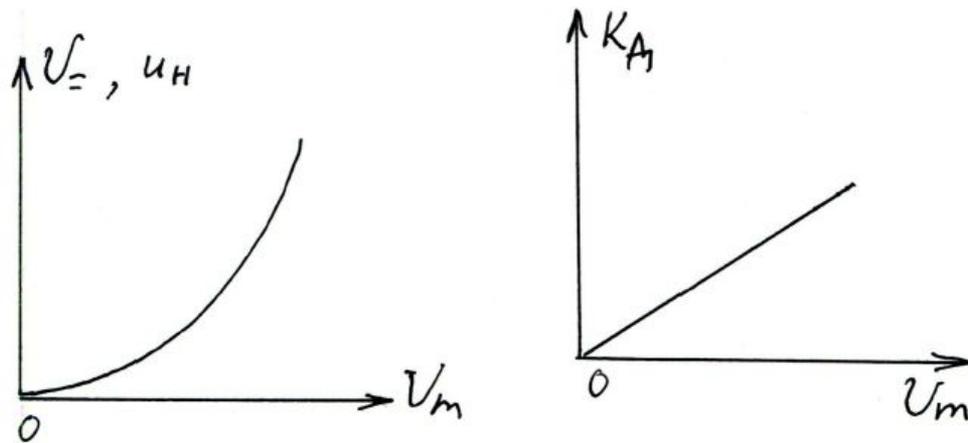
$$U_ = = \frac{S'}{4 \cdot \left(S + \frac{1}{R_H} \right)} \cdot U_m^2$$

$$K_{Д} = \frac{U_ =}{U_m}$$

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

Обычно:

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



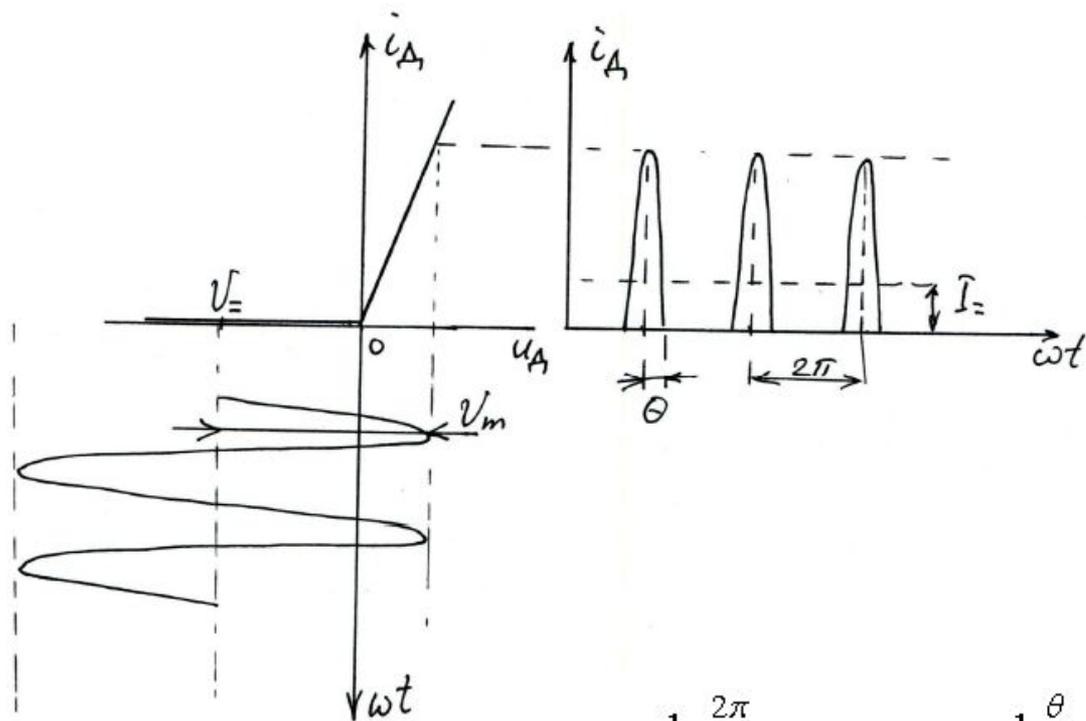
При $U_m = 1 \text{ мВ}$ $K_d = 5 \cdot 10^{-3}$, а $U_- = 5 \cdot 10^{-6} \text{ В}$ или 5 мкВ

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 θ — угол отсечки диода

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

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

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

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

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

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

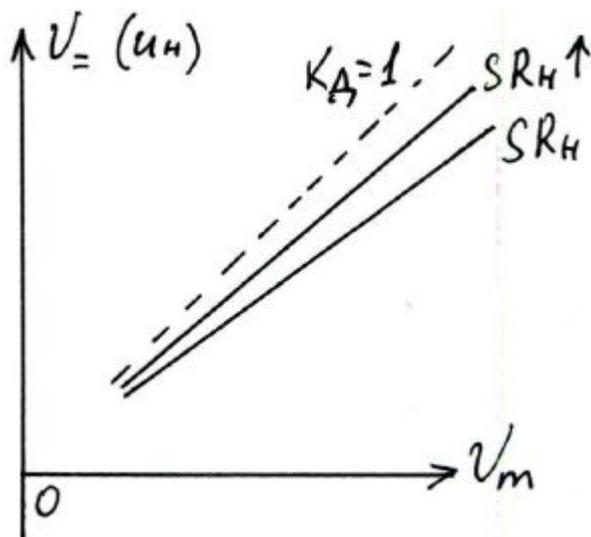
Угол отсечки θ не зависит от амплитуды входного сигнала U_m . Следовательно от U_m не зависит и $K_D = \cos \theta$
 Угол отсечки θ зависит от SR_H . Желательно, чтобы θ был малым ($\theta \rightarrow 0, K_D \rightarrow 1$).

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 $R_{ВХ} \approx \frac{R_H}{3}$

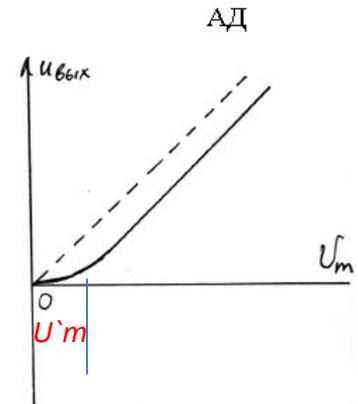
3. Нелинейные искажения в диодном АД

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



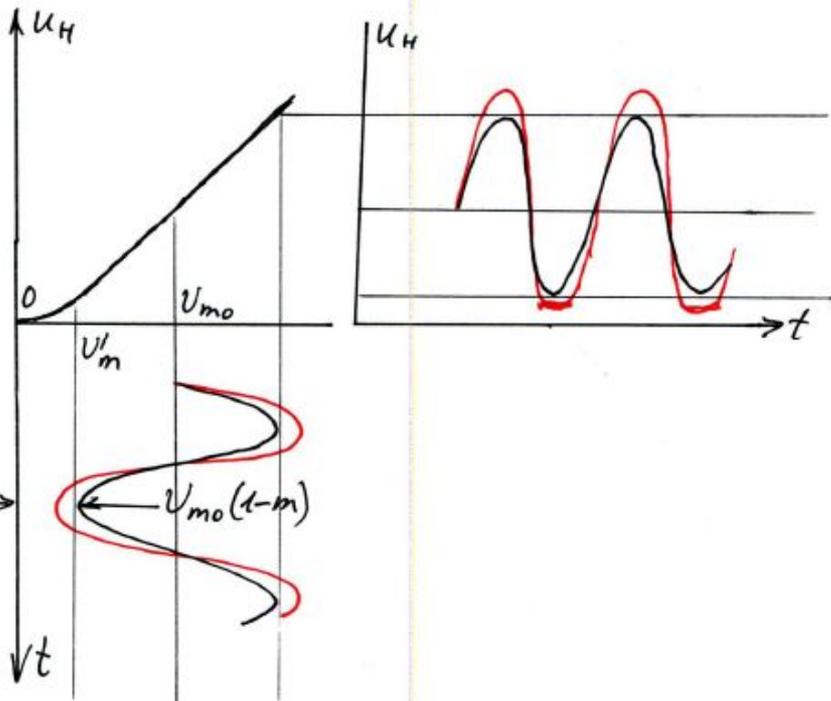
Если минимальное напряжение на детекторе меньше U'_m , то K_d зависит от $U_{вх}$, а форма протектированного напряжения отличается от формы огибающей входного напряжения $U_{вх}$.

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



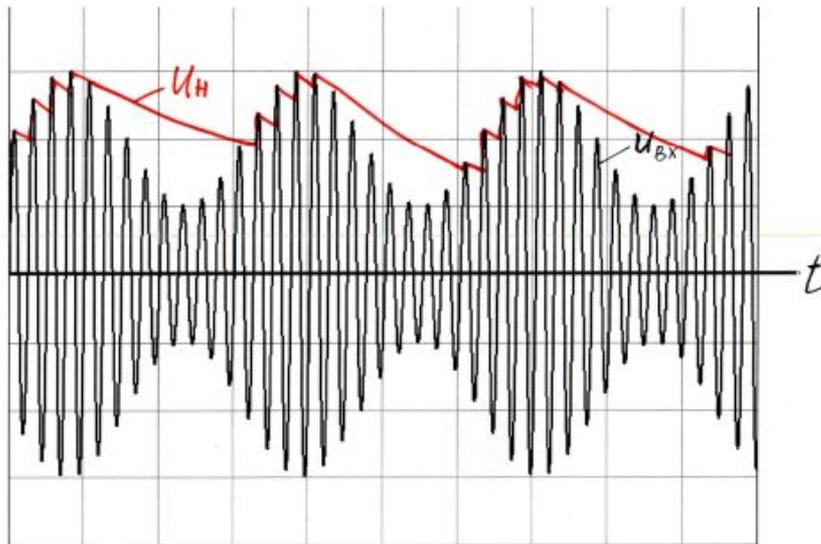
Противоречие. Для минимизации НИ в детекторе необходимо увеличивать U_{m0} , при этом, однако, возрастают НИ в последнем каскаде УПЧ

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

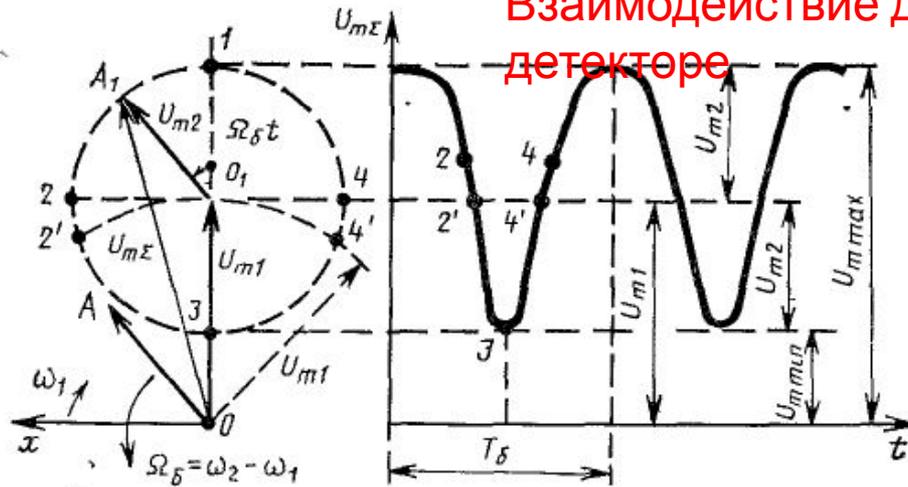
или скорость разряда конденсатора должна быть больше скорости спадания $U_{вх} = U_m$, но надо помнить, что тогда надо уменьшать C_H , но $C_H > C_{диода}$.

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

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

Выбираем $C_H = 10^{-9} \Phi = 1$ нФ

Взаимодействие двух сигналов в детекторе



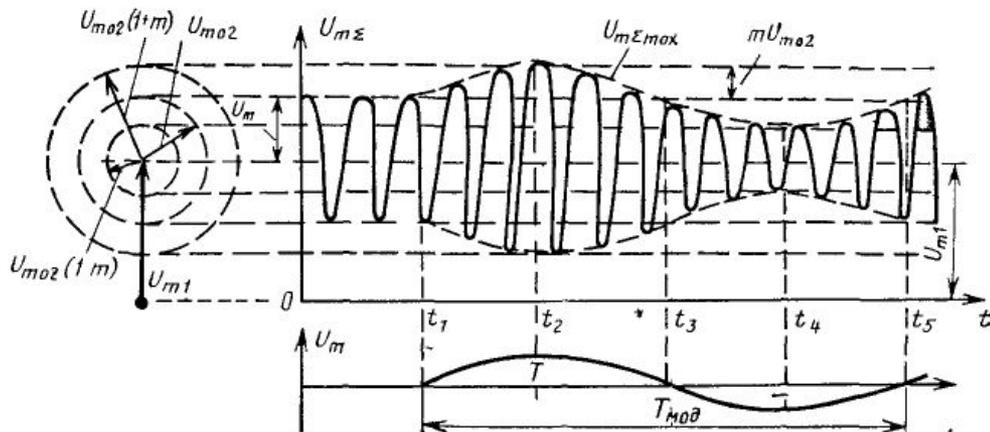
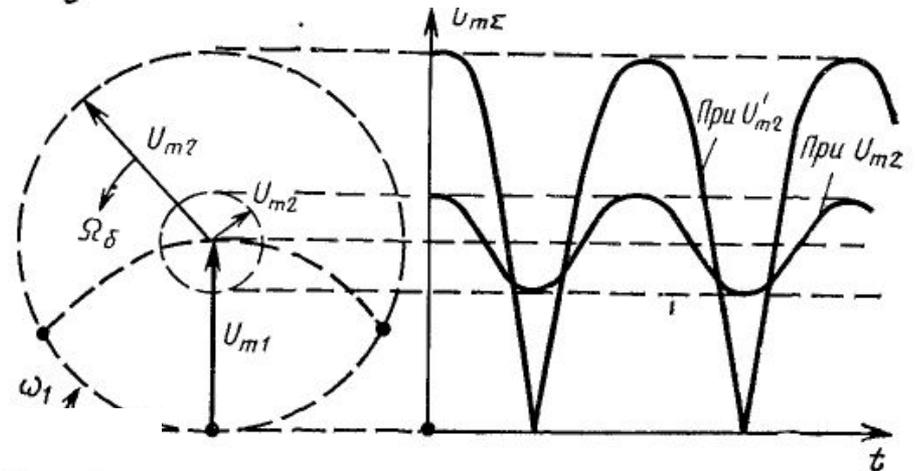
Выходное напряжение детектора определяется амплитудой **суммарного** входного напряжения.

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

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

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

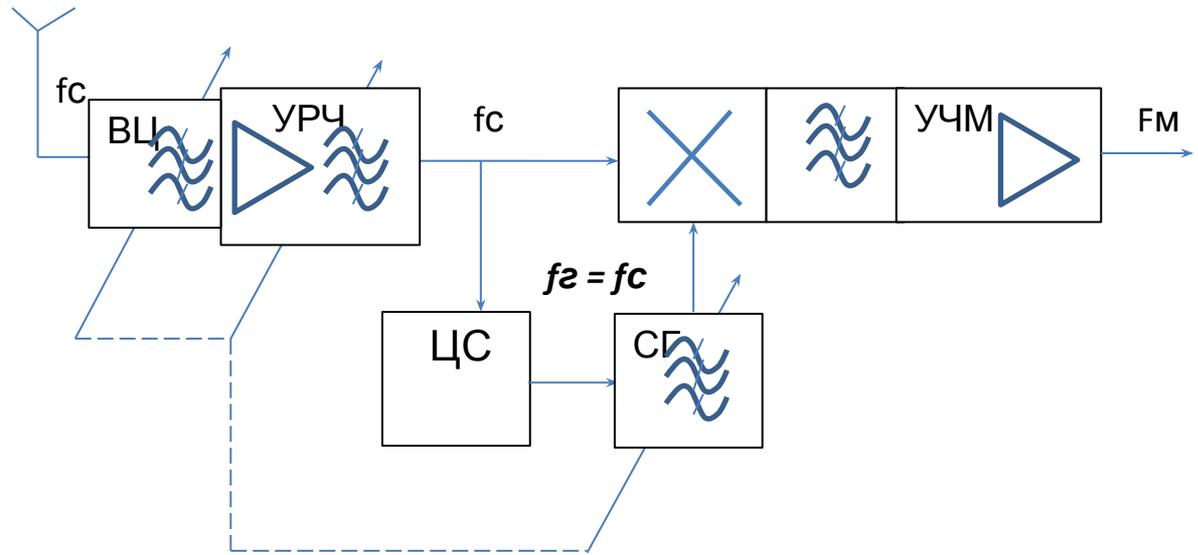


Рис. ПЧ, применяемые в приемниках - *синхродинах*

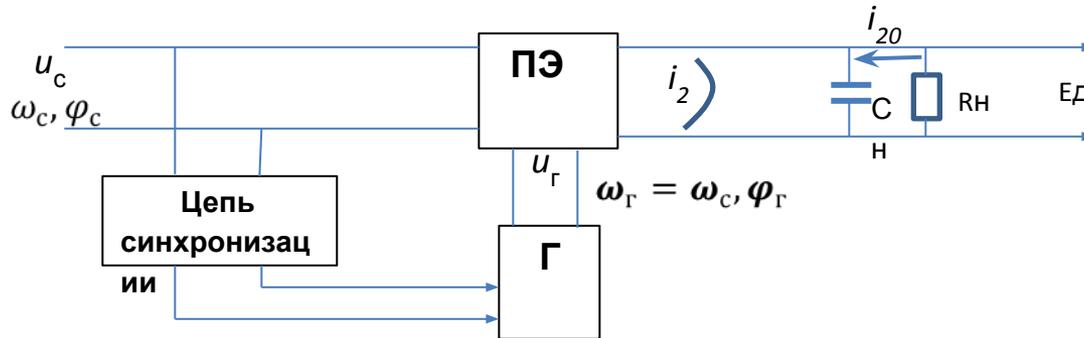
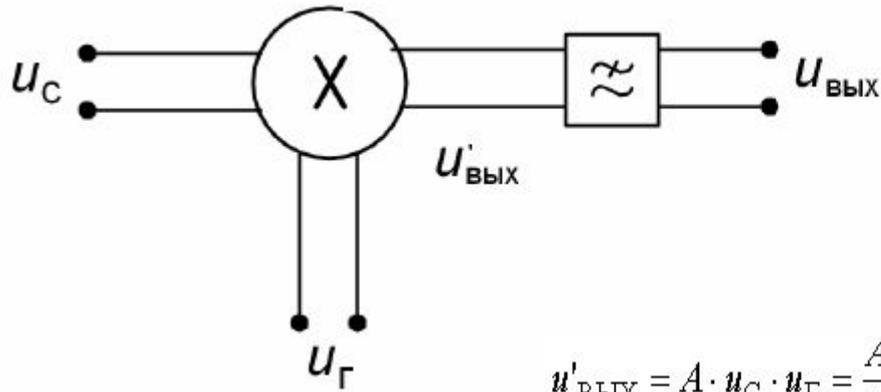


Рис. Синхронный детектор

Ток на выходе ПЭ при $f_2 = f_c$ с учетом начальной фазы колебания гетеродина:

$$i_2 \approx S_0 U_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) + 0,5 S_1 U_c [\cos(2\omega_c t + \varphi_\Gamma + \varphi_c) + \cos(\varphi_\Gamma - \varphi_c)] + \dots$$



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

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

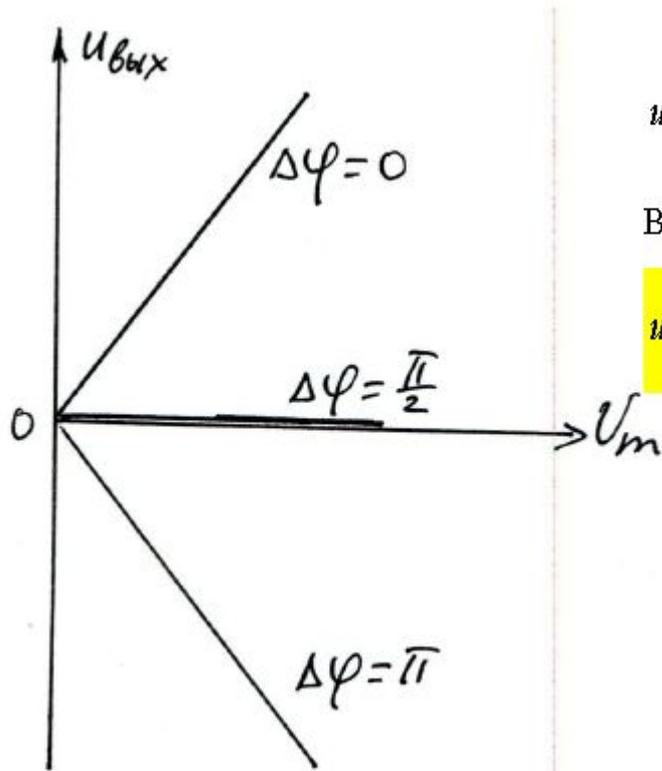
$$u'_{\text{ВЫХ}} = A \cdot u_C \cdot u_\Gamma = \frac{A}{2} U_{mC} U_{m\Gamma} \{ \cos[(\omega_C + \omega_\Gamma) \cdot t + \varphi_C + \varphi_\Gamma] + \cos[(\omega_C - \omega_\Gamma) \cdot t + \varphi_C - \varphi_\Gamma] \}$$

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

В СД $\omega_C = \omega_\Gamma$

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

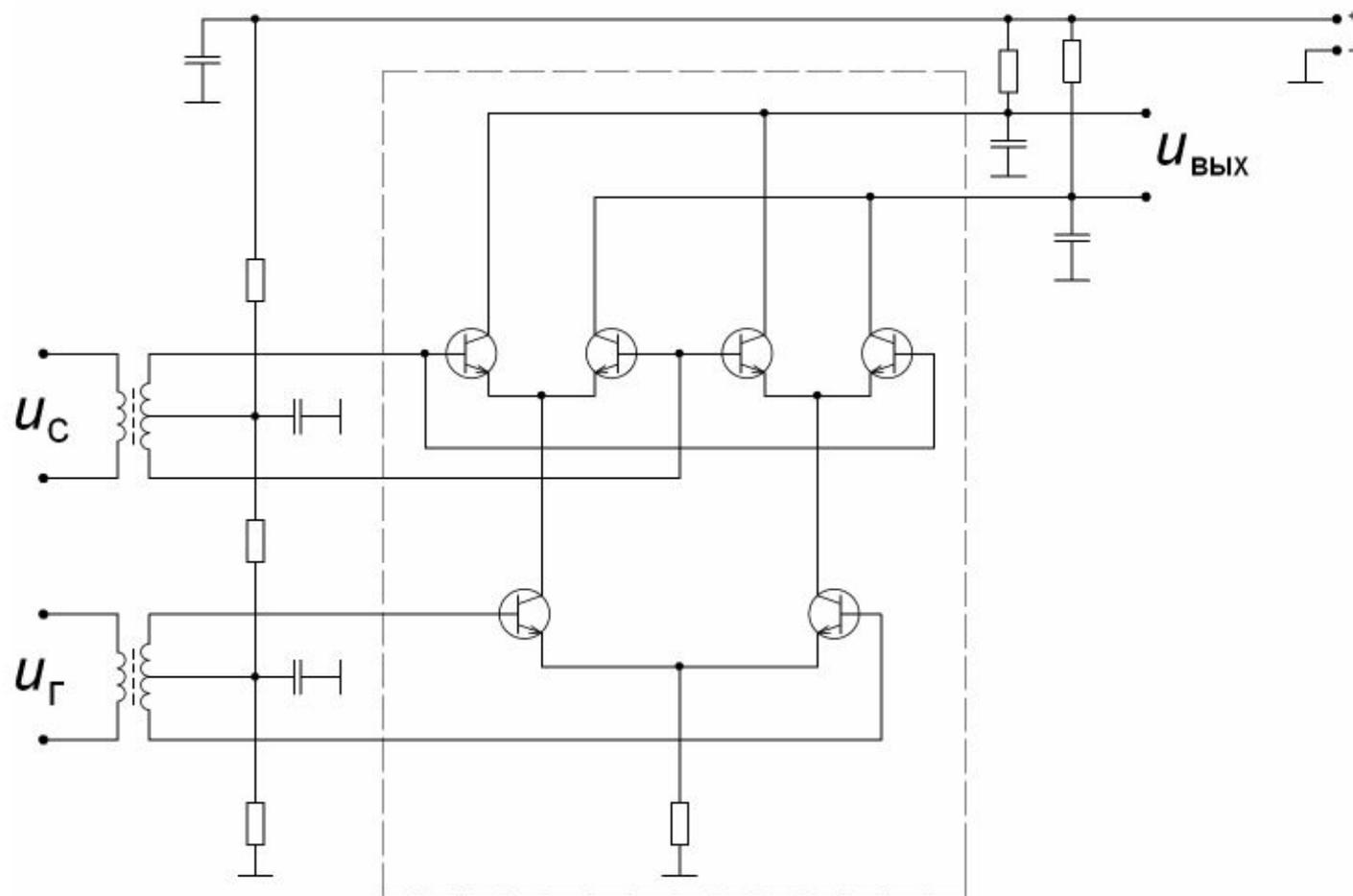
$$K_{\text{Д}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{U_{mC}} = \frac{A}{2} \cdot U_{m\Gamma} \cdot \cos(\Delta\varphi)$$



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 π
- 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 $U_{вых}=const$.

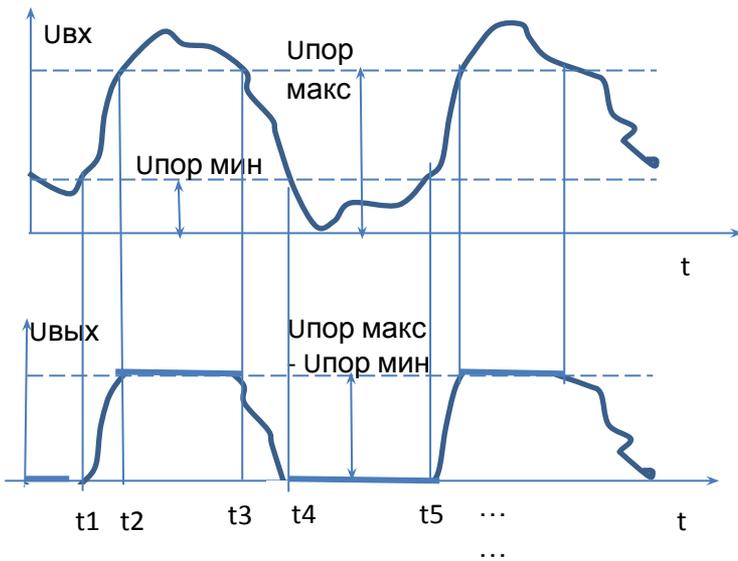


Рис. Форма напряжений для ограничителя мгновенных значений

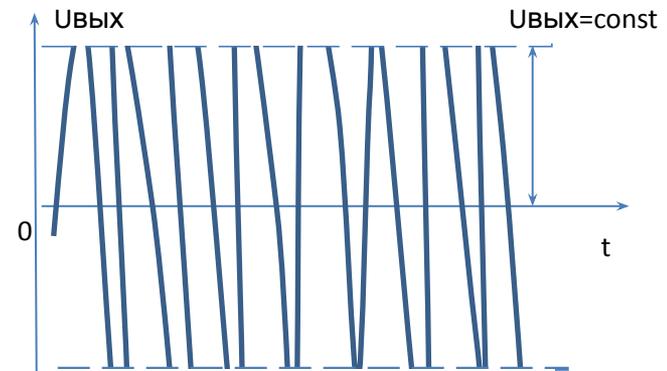
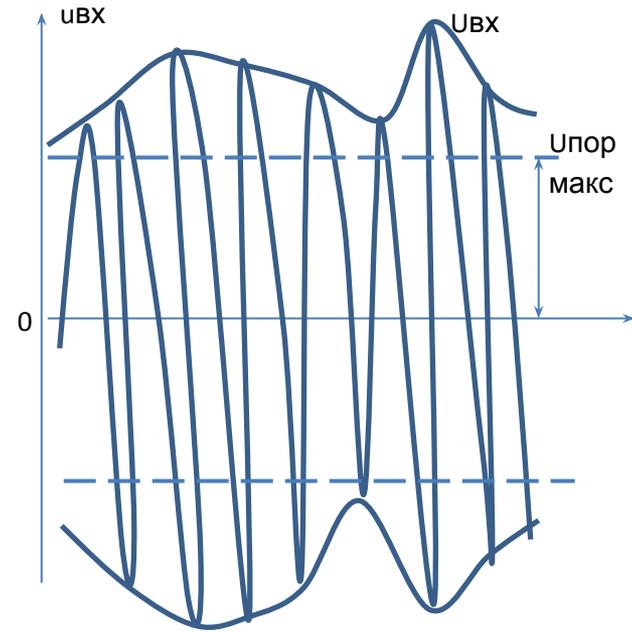


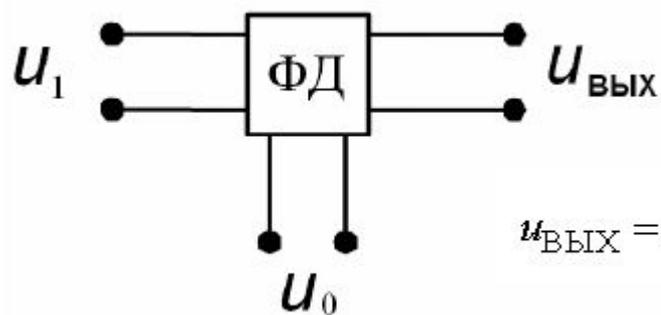
Рис. Форма напряжений для амплитудного ограничителя

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.

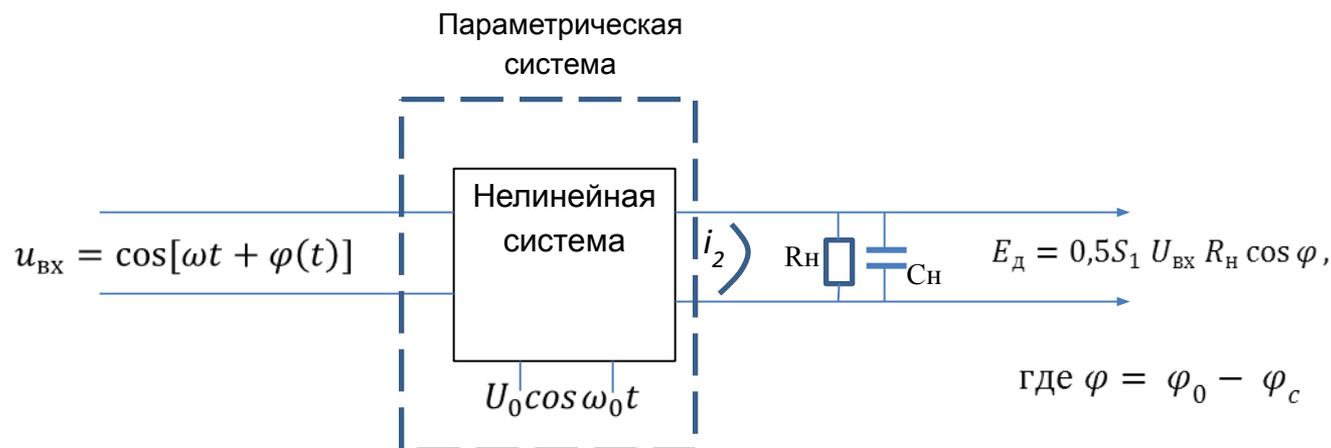
Детекторы фазо-модулированных сигналов

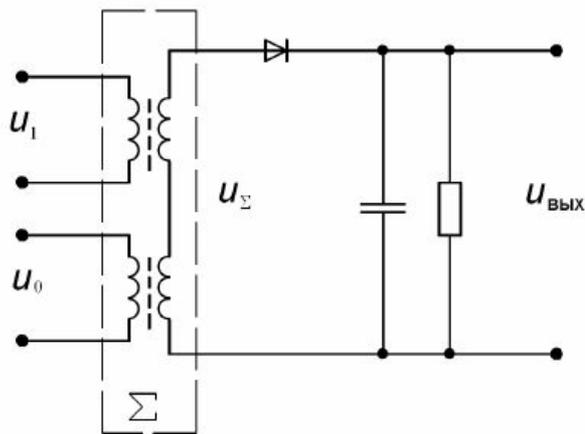


$$u_1 = U_{m1} \cos(\omega \cdot t + \varphi_1) \quad u_0 = U_{m0} \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

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

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



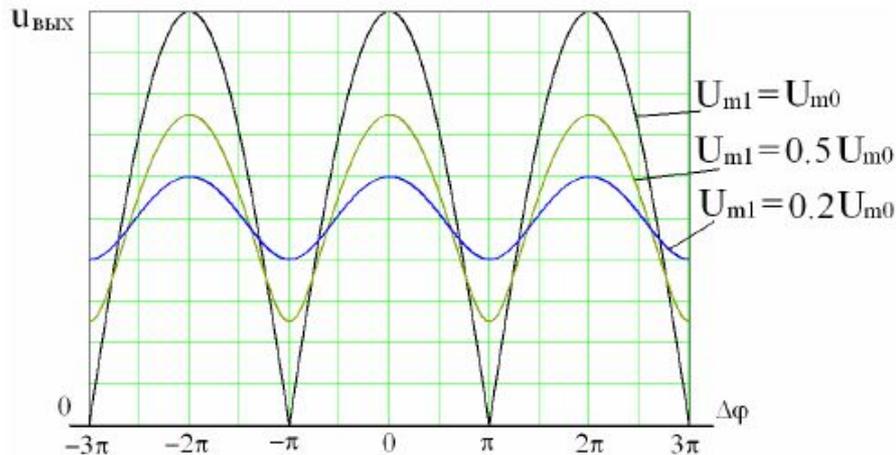


$$u_1 = U_{m1} \cos(\omega \cdot t + \varphi_1) \quad u_0 = U_{m0} \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

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

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

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

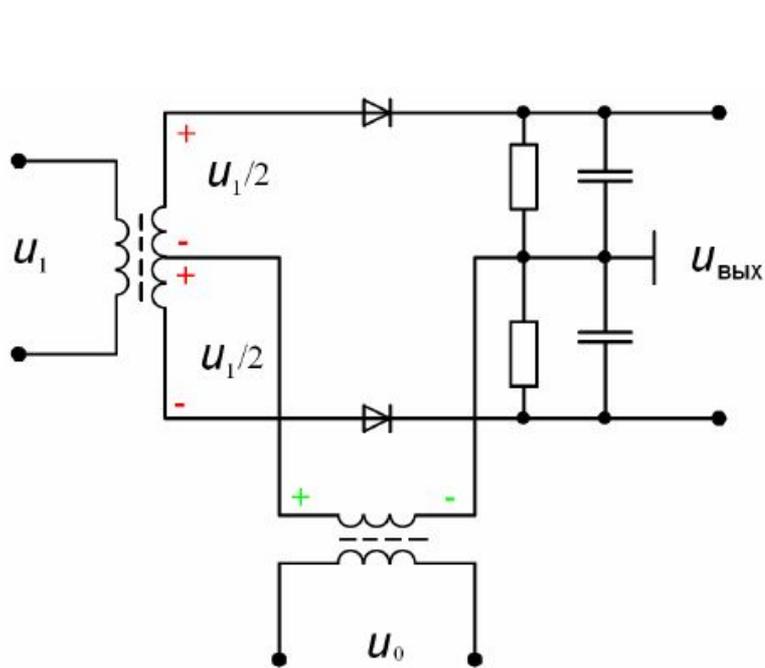
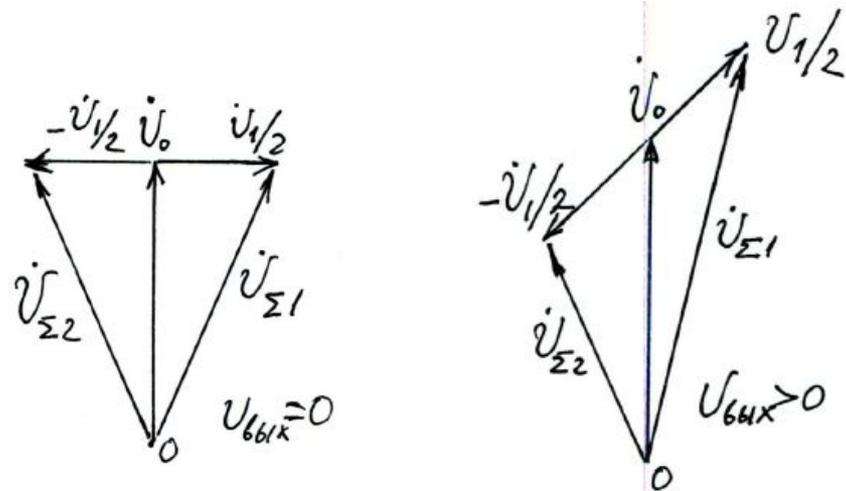


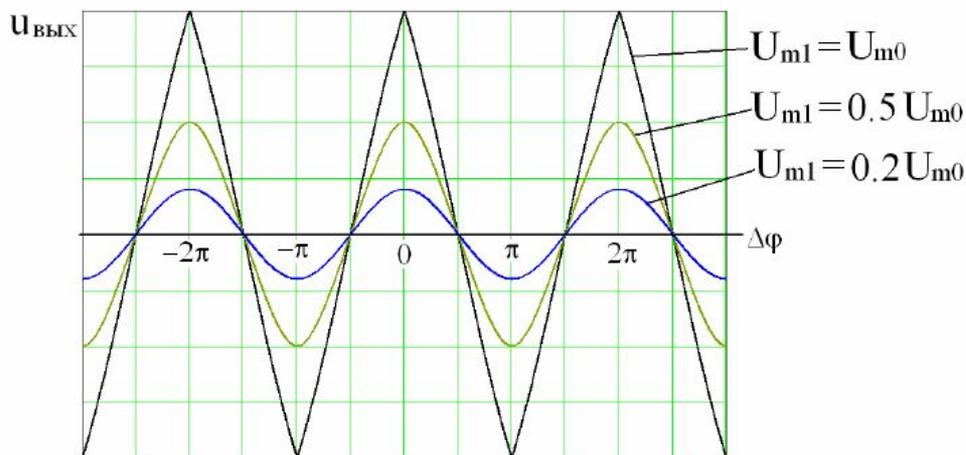
Рис. Балансный фазовый детектор



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 $U_{m1} = U_0$
- Выходное напряжение зависит от амплитуд входных сигналов. Необходим АО
- Постоянная составляющая выходного напряжения отсутствует

The
End