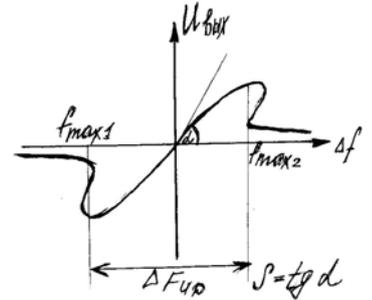


## Частотные детекторы (ЧД)

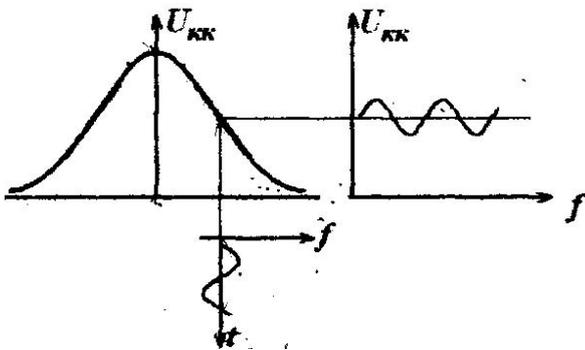
Применяются для детектирования частотно-модулированных (ЧМ) колебаний или в качестве измерительного (чувствительного) элемента в системах АПЧ. Обычно при этом ЧМ колебания преобразуются в амплитудно-модулированные (АМ), фазо-модулированные (ФМ), либо импульсно-модулированные (ИМ), и затем принимается соответствующий детектор. Основные характеристики:

- 1) Детекторная -  $U_{\text{ВЫХ ЧД}}(\Delta f)$ , полоса пропускания  $f_{\text{МАХ2}} - f_{\text{МАХ1}}$
- 2) Крутизна детекторной характеристики  $S = \frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial f} \text{ [В/Гц]}$
- 3) Коэффициент передачи  $K_{\text{ЧД}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(\Delta f)}{U_{\text{ВХ}}}$  при  $\Delta f = \Delta f_{\text{МАХ}}$
- 4) Входное сопротивление  $Z_{\text{ВХ}}$ , выходное сопротивление  $Z_{\text{ВЫХ}}$ , входная проводимость  $Y_{\text{ВХ}}$  выходная проводимость  $Y_{\text{ВЫХ}}$
- 5) Искажения



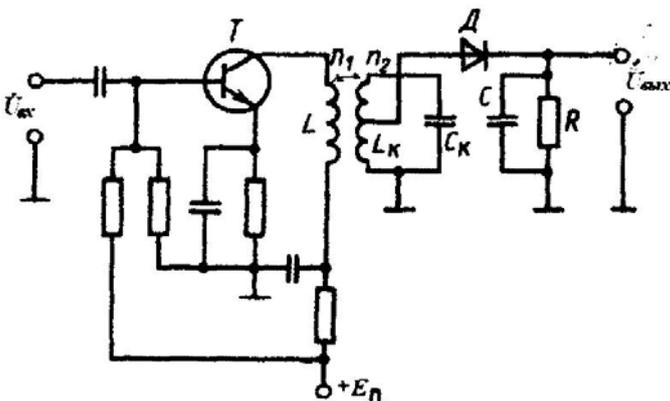
### Частотные детекторы с преобразованием ЧМ→АМ

Принцип действия такого детектора основан на том, что при прохождении ЧМ колебания через колебательный контур, оно преобразуется в АМ, т.к. напряжение на контуре зависит от частоты. Подавая напряжение с выхода колебательного контура на амплитудный детектор, получим выходное напряжение зависящее от изменения частоты.



Чтобы преобразование было линейным, то есть напряжение на колебательном контуре  $U_{\text{КК}}$  линейно зависело от частоты, надо использовать линейный участок ската резонансной характеристики контура. Мгновенное значение выходного напряжения соответствует ЧМ, но амплитудный детектор подавляет напряжение высокой частоты, выдавая напряжение, пропорциональное огибающей, то есть изменению частоты.

Тогда схема такого простейшего частотного детектора, вместе с резонансным усилителем, являющимся последним каскадом УПЧ, будет такой:



Коэффициент усиления усилителя:

$$K(j\omega) = \frac{|S|n_1n_2}{g_{\text{ЭКВ}}(1 + j\xi)}$$

где  $\xi = Q_{\text{ЭКВ}} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) = Q_{\text{ЭКВ}} \frac{2\Delta f}{f_0}$

- обобщенная расстройка

На входе амплитудного детектора напряжение должно быть таким, чтобы он был линейным, тогда напряжение на выходе амплитудного детектора :

$$|\dot{U}_{\text{вых}}| = K_D \dot{U}_{\text{вх}} |K(j\omega)| = K_D K_0 \dot{U}_{\text{вх}} \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}$$

Крутизна  $S_{\text{ЧД}} = \frac{dU_{\text{вых}}}{d\xi} = -\frac{K_D K_0 \dot{U}_{\text{вх}}}{\sqrt{(1 + \xi^2)^3}}$

Такой простейший частотный детектор применяют, только при узкополосной ЧМ, т.к. он не обеспечивает высокой линейности и крутизны детекторной характеристики. Обычно используют **двухтактную (балансную) схему частотного детектора (частотный дискриминатор)**, обладающую лучшими характеристиками.

Как следует из изложенного, такой ЧД чувствителен к паразитному изменению амплитуды ЧМ сигнала, которая может сопровождать частотную модуляцию или возникать за счет изменения  $E_n$  или коэффициента усиления каскадов до детектора. Это может приводить к искажениям сигнала на выходе ЧД. Чтобы этого избежать на входе ЧД ставят **ограничитель амплитуды (ОА)**.

### Ограничители амплитуды

В общем случае ограничителем называется **нелинейный четырехполюсник, выходное напряжение которого остается постоянным, если входное напряжение оказывается по абсолютной величине больше некоторого значения, называемого порогом ограничения**. Мы будем рассматривать **резонансные, (то есть инерционные) ограничители, в состав которых входит нелинейный безынерционный элемент и резонансный фильтр**, выделяющий спектральную зону выходного процесса в области центральной частоты входного сигнала. Таким образом, **в ограничителе амплитуды практически не происходит изменения формы высокочастотного заполнения входного амплитудно-частотного модулированного квазигармонического колебания**. В идеальном случае оно **превращается в частотно-модулированное колебание с сохранением закона частотной модуляции и устранением паразитной амплитудной модуляции**.

Включение ограничителя амплитуды перед частотным или фазовым детектором устраняет зависимость детекторных характеристик от амплитуды входного сигнала. Это необходимо в приемных устройствах ЧМ сигнала, если сам частотный детектор чувствителен к изменениям амплитуды. Идеальная амплитудная характеристика ограничителя и типичная реальная характеристика показаны на рисунке 1.

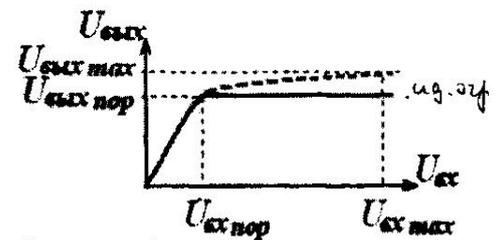


Рисунок 1

При достижении амплитудой входного напряжения порогового значения  $U_{\text{вх пор}}$ , коэффициент передачи ОА резко падает. При изменении входного напряжения в широких пределах  $U_{\text{вх пор}} \div U_{\text{вх max}}$  амплитуда выходного напряжения изменяется мало.

Качество работы ОА можно оценивать коэффициентом ограничения  $K_{ог} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх пор}}{\Delta U_{ввых} / U_{ввых пор}}$

Увеличить коэффициент ограничения можно за счет каскадного соединения ограничителей. Сама величина порога ограничения является одним из основных качественных показателей ограничителя амплитуды, т.к. определяет его работоспособность при малых амплитудах. Для создания ОА используются эффекты насыщения и отсечки тока в транзисторах или шунтирующее действие диодов, внутреннее сопротивление которых зависит от приложенного напряжения.

### Транзисторные ограничители амплитуды

Простейший транзисторный ОА практически не отличается от обычного резонансного усилителя. Для придания транзистору более четко выраженных нелинейных свойств, напряжение на коллекторе понижено по сравнению с нормальным рабочим значением. Это достигается за счет увеличения (по сравнению с обычным) сопротивления резистора  $R_{\phi}$ . Напряжение на базе также меньше нормального.

Работа ограничителя иллюстрируется рисунком:

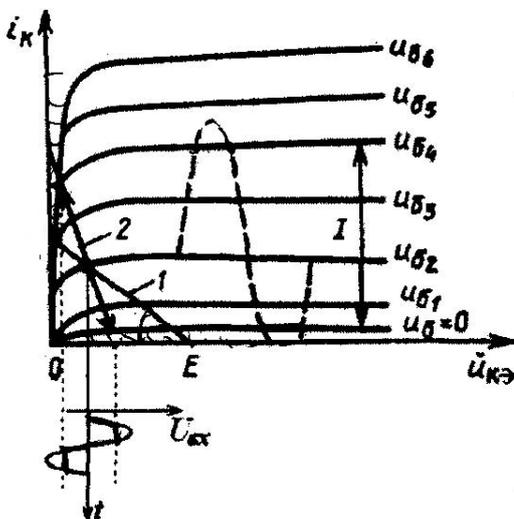
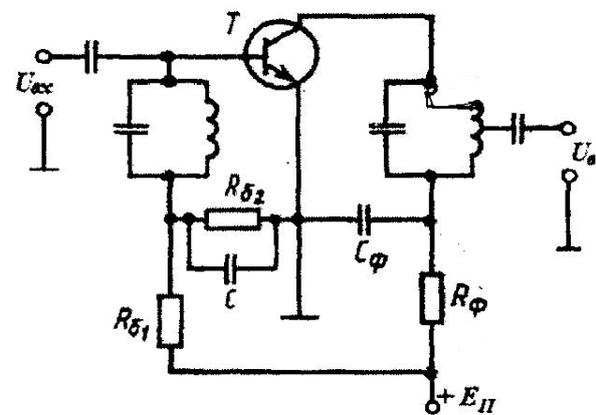


Рис.

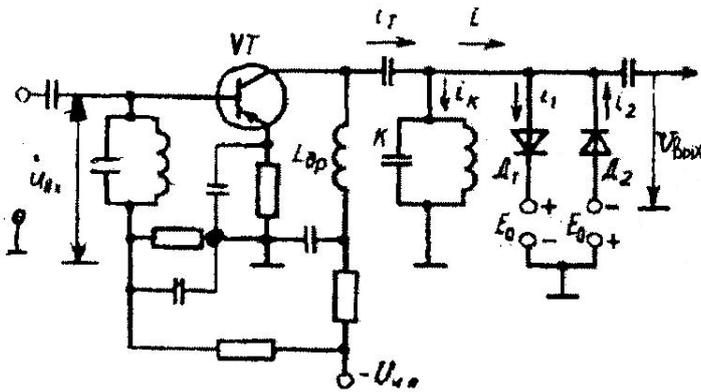
Здесь 1 – нагрузочная характеристика по постоянному току, проведенная под углом  $\alpha_1 = \arctg(1/R_{\phi})$

2 – нагрузочная характеристика по переменному току, проведенная под углом  $\alpha_{12} = \arctg(1/R_{\text{экв}})$  где  $R_{\text{экв}}$  – эквивалентное резонансное сопротивление нагрузочного контура. Если амплитуда входного напряжения такова, что превышает размах (см. рисунок), то начинается отсечка тока коллектора «снизу» и насыщение «сверху». При увеличении амплитуды входного напряжения углы отсечки также увеличиваются, а амплитуда коллекторного тока стремится к величине  $I_{к} = 2 * I / \pi$ , где  $I$  – размах импульсов коллекторного тока. При этом зависимость  $U_{\text{ввых}} = I_{к} / R_{\text{экв}}$  от амплитуды входного напряжения имеет вид амплитудной характеристики ограничителя (см. рисунок). Пороги ограничения имеют порядок десятых долей вольта. Можно не ставить базовый делитель, тогда угол отсечки снизу будет  $\pi/2$ , порог ограничения увеличится, а коэффициент ограничения уменьшится. Ограничитель напряжения можно построить на дифференциальном усилителе и операционном усилителе, где за счет большого коэффициента усиления при достаточно малых амплитудах на входе, получается ограничение

тока за счет отсечки. Напряжение на выходе будет иметь синусоидальный характер, за счет резонансных свойств нагрузки.

### Диодные ограничители

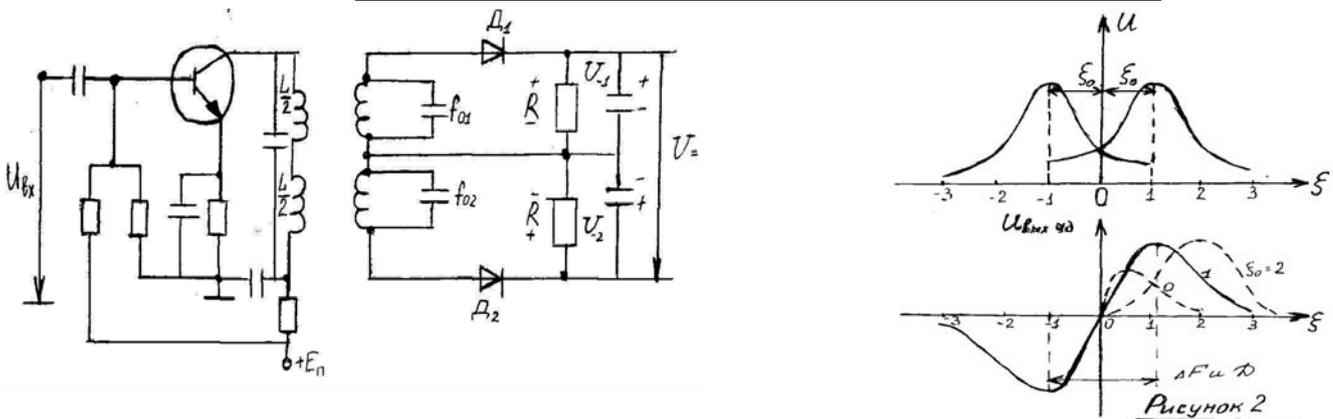
Диоды используются в ограничителях амплитуды, за счет свойства сильно менять свое сопротивление при изменении напряжения, приложенного к его электродам. Обычно используется параллельное соединение диодов с нагрузочным контуром усилительного каскада.



Параллельно нагрузочному колебательному контуру  $K$  подсоединены диоды  $D1$  и  $D2$ , запертые одинаковым напряжением  $E_{оп}$ . При положительных полуволнах напряжения превышающих  $E_{оп}$  открывается диод  $D1$ , а при отрицательных  $D2$ . Токи через диоды имеют вид косинусоидальных импульсов с углом отсечки  $\theta = \arccos(E_{оп}/U_{вых})$ . Они тем больше, чем

больше амплитуда  $U_{вых}$ . Ток  $I_{к1}$  уменьшается, токи  $I_1$  и  $I_2$  увеличиваются. То есть с ростом  $U_{вых}$  происходит перераспределение тока первой гармоники между контуром и цепью диодов, что компенсирует рост тока  $I_{к1}$  за счет увеличения напряжения  $U_{вых}$ . Амплитудная характеристика принимает характерный вид, показанный на рисунке 1. Таким образом, после превышения амплитудой  $U_{вых}$  порога  $E_0$  рост  $U_{вых}$  резко замедляется.

### Частотный дискриминатор с расстроенными контурами



Контур настроен на частоты  $f_1$  и  $f_2$ , одинаково расположенные по обе стороны от  $f_0$ . Выпрямленные напряжения амплитудных детекторов, присоединенных к контурам, включены встречно и выходное напряжение образуется как разность выпрямленных напряжений  $U_{вых D1} - U_{вых D2}$ .

Формирование детекторной характеристики ясно из рисунка 2. Напряжение на выходе частотного детектора равно разности напряжений на выходах АД1 и АД2, т.е.  $U_{\text{ВЫХ ЧД}} = U_{\text{ВЫХ 1}} - U_{\text{ВЫХ 2}} = K_{\text{Д}}(U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}})$

Для симметричности характеристики нужно, чтобы

$$R_{\text{ЭКВ 1}} = R_{\text{ЭКВ 2}}, R_{\text{Н1}} = R_{\text{Н2}}, C_{\text{Н1}} = C_{\text{Н2}}, K_{\text{Д1}} = K_{\text{Д2}} \text{ и}$$

$$\xi_{01} = \xi_{02} = \xi_0.$$

$$U_{\text{ВЫХ ЧД}} = K_{\text{Д}}(U_{\text{ВХД1}} - U_{\text{ВХД2}}) = 2 S_1 U_{\text{ВХ}} R_{\text{ЭКВ}} n K_{\text{Д}} \psi(\xi)$$

$$\text{где } \psi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{1+(\xi-\xi_0)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+(\xi+\xi_0)^2}}$$

$$\xi = Q_{\text{ЭКВ}} \frac{2\Delta f}{f_0} - \text{обобщенная текущая расстройка}$$

$$\xi_0 = Q_{\text{ЭКВ}} \frac{2\Delta f_0}{f_0} - \text{обобщенная начальная расстройка}$$

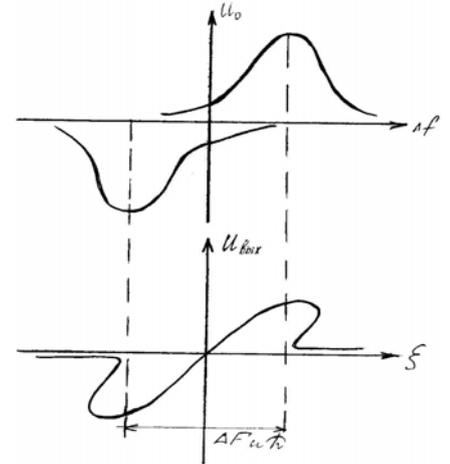
При  $\xi_0 > 0,5$  максимумы детекторной характеристики совпадают с максимумами резонансной характеристики контуров, тогда:  $\xi_{\text{max}} = \xi_0$  и  $\Delta F_{\text{ЧД}} = f_{\text{max1}} - f_{\text{max2}} = 2\Delta f_0$ .

Характеристика линейна на  $2/3$  – от  $\Delta F_{\text{ЧД}}$ , только в этой области ее можно использовать для детектирования ЧМ колебания. Для этого участка детекторная характеристика:

$$U_{\text{ВЫХ}}(\Delta f) = \frac{2 n S_1 U_{\text{ВХ}} \cos\theta}{\pi(\Delta F_{\text{ЧД}})^2 C_{\text{Н}}} \frac{\xi_0^3}{\sqrt{(1 + \xi_0^2)^3}} \Delta f$$

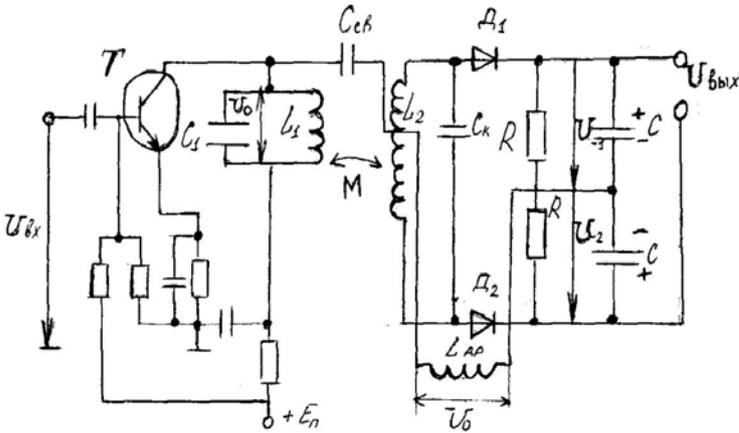
где  $\Delta f$  – текущая расстройка частоты

Крутизна и коэффициент детектирования частотного детектора возрастают с увеличением  $\Delta f$  и с увеличением добротности контуров. На практике желательно, чтобы расстройка была в диапазоне  $\xi_0 = 2..3$ , при больших значениях нарушается линейность в начале характеристики, а  $S_{\text{ЧД}}$  увеличивается очень медленно.



## Частотный детектор со связанными контурами

(или частотно-фазовый детектор)



Напряжение на входах АМ детекторов есть геометрическая сумма полного напряжения на первом контуре подаваемого на диоды синфазно (в среднюю точку  $L_2$ ) и половины напряжения на вторичном контуре, подаваемого на диоды в противофазе за счет магнитной связи.

Коэффициент связи равен:  $k_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M}{L}$  т.к.

$$L_1 = L_2$$

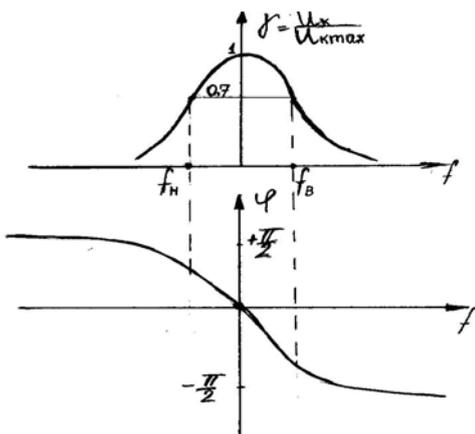
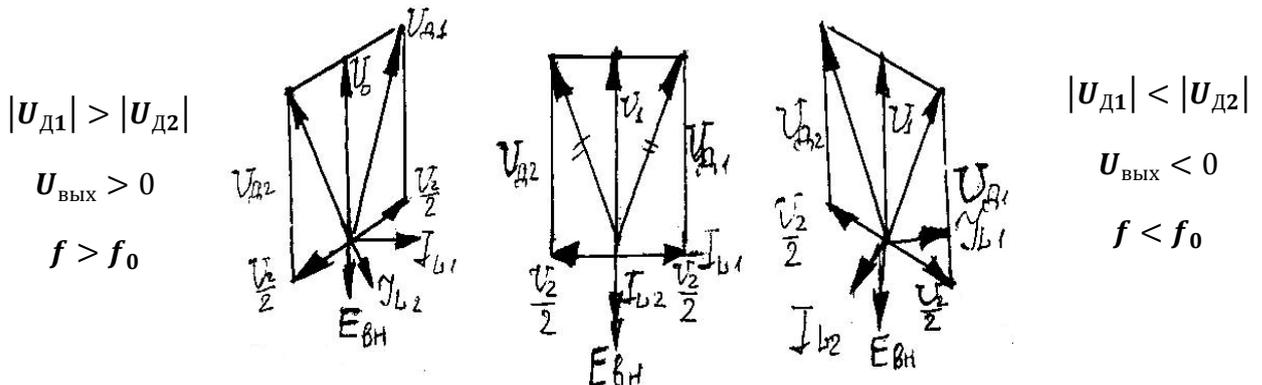
$$\beta_{св} = Q_{эКВ} k_{св}, \quad E_{вн} = \pm j\omega M I_L$$

Чтобы схема была симметричной (для симметрии и детекторной характеристики), следует как можно лучше выполнить среднюю точку у катушки  $L_2$ , выбирать одинаковые диоды и

$R_{H1} = R_{H2}, C_{H1} = C_{H2}, K_{D1} = K_{D2} = K_D$ . АМД должен быть в линейном режиме. Напряжение на выходе частотного детектора равно разности напряжений на выходах амплитудных детекторов

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ D1}} - U_{\text{ВЫХ D2}} = K_D (U_{\text{ВЫХ D1}} - U_{\text{ВЫХ D2}}) = K_D (U_{D1} - U_{D2}).$$

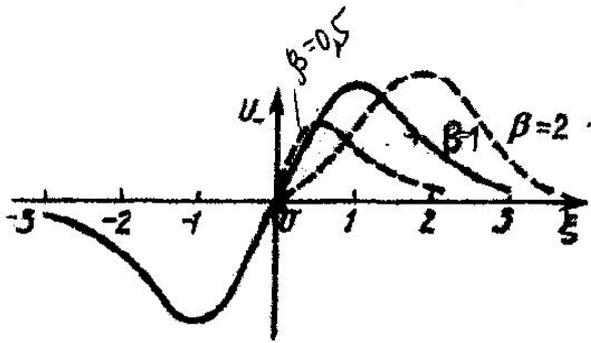
Напряжения  $U_{\text{вх D1}}$  и  $U_{\text{вх D2}}$  зависят от частоты. Покажем это, используя векторные диаграммы.



$$|U_{D1}| = |U_{D2}|$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = 0$$

$$f = f_0$$



$I_{L1}$  - ток в  $L_1$ ,  $E_{вн}$  - ЭДС, внесенная во 2-ой контур,  $I_{L2}$  - ток в  $L_2$ ,  $\frac{U_2}{2}$  - напряжения на половинках  $L_2$ .

Напряжение на выходе пропорционально расстройке частоты, а знак соответствует знаку расстройке. При определенных интервалах  $\Delta f$  характеристика линейна, дальше линейность нарушается по следующим причинам: 1) фазовая характеристика контура линейна только в пределах полосы пропускания, дальше становится нелинейной; 2) при больших расстройках уменьшается напряжение на контуре, уменьшается  $U_1$  и  $U_2$ , уменьшается  $U_{вхД1}$  и  $U_{вхД2}$ , выходное напряжение также будет падать.

$$U_{\text{вых чД}} = 2 S_1 U_{\text{вх}} R_{\text{экв}} n K_{\text{Д}} \psi(\xi), \quad \psi(\xi) = \frac{\sqrt{1 + (0,5\beta + \xi)^2} - \sqrt{1 + (0,5\beta - \xi)^2}}{\sqrt{(1 + \xi^2 - \beta^2)^2 + 4\beta^2}}$$

где  $\xi = Q \frac{2\Delta f}{f_0}$  - обобщенная текущая расстройка,  $\beta = Q k_{\text{св}}$  - обобщенный коэффициент связи.

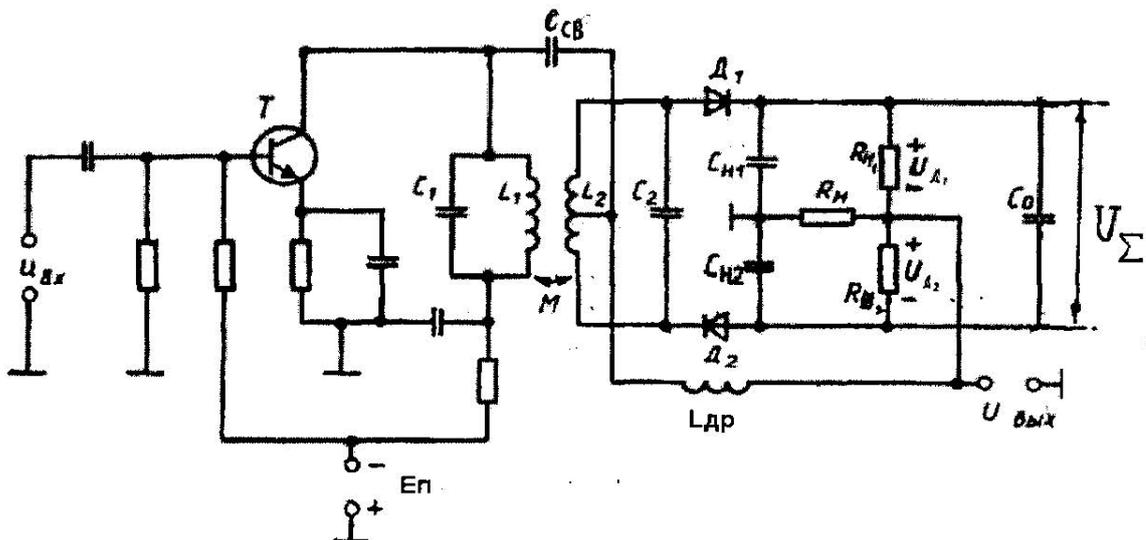
При  $\beta \geq 0,5$  максимальное напряжение будет, если  $\xi = \beta$ , тогда  $\Delta F_{\text{чД}} = 2\Delta f_{\text{max}} = k_{\text{св}} f_0$ . Рабочим участком будет 2/3 от  $\Delta F_{\text{чД}}$ , на этом участке:

$$S_{\text{чД}} = - \frac{2S_1 K_{\text{Д}} U_{\text{вх}} \beta^3}{\pi (\Delta F_{\text{чД}})^2 C_k (1 + \beta^2) \sqrt{\beta^2 + 4}}$$

Если выбран коэффициент связи  $k_{\text{св}}$ , то крутизна частотного детектора растет с увеличением добротности контуров (при  $\beta < 3$ ). Если выбрана  $f_0$  и  $Q_{\text{экв}}$ , то крутизна частотного детектора растет с увеличением  $\beta$ .

### Дробный частотный детектор

(или детектор отношений)



Это частотный детектор с внутренним амплитудным ограничением. Резонансный усилитель работает в линейном режиме и имеет большой коэффициент усиления, чем в предыдущем детекторе. Напряжение на входах  $D_1$  и  $D_2$  складывается из  $U_1$  и  $U_2$ , как в предыдущей схеме.  $U_{D1}$  и  $U_{D2}$  меняются при изменении частоты. Полярность диодов – противоположная. Сумма выпрямленных напряжений прикладывается к конденсатору большой емкости  $C_0$ . Постоянная времени:  $C_0(R_{H1} + R_{H2}) = (0,5 \dots 1)$  сек. Напряжение  $U_{\Sigma}$  из-за большой постоянной времени не успевает следовать за быстрыми изменениями  $U_{D1}$  и  $U_{D2}$ , можно считать  $U_0 = \text{const}$ , а изменяется отношение  $U_{D1}/U_{D2}$  (за это он получил свое название).

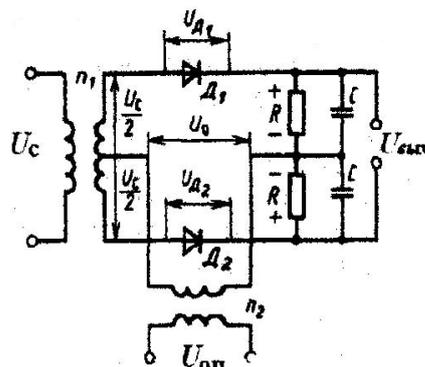
$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{D1} + U_{D2}}{2} \frac{\frac{U_{D1}}{U_{D2}} - 1}{\frac{U_{D1}}{U_{D2}} + 1} = \frac{U_{\Sigma}}{2} \frac{\frac{U_{D1}}{U_{D2}} - 1}{\frac{U_{D1}}{U_{D2}} + 1}$$

Равенство  $U_0 = \text{const}$  получается за счет того, что: 1)  $U_{D1}$  и  $U_{D2}$  изменяются в разные стороны; 2)  $\tau = C_0 R_H$  - велика, и  $C_0$  не успевает перезарядиться. Подавление паразитной амплитудной модуляции объясняется следующим: Допустим входное напряжение растет, напряжение  $U_{D1}$  и  $U_{D2}$  тоже растут, но  $U_{\Sigma} = \text{const}$  следовательно, растут углы отсечки  $\theta_1$  и  $\theta_2$ ,  $K_{D1}$  и  $K_{D2}$  – уменьшаются,  $R_{\text{вх}D1}$  и  $R_{\text{вх}D2}$  - уменьшаются. Входное сопротивление при этом шунтирует контур УПЧ, и напряжение на входах АМ детекторов уменьшается и поддерживается более-менее постоянным. В дробном детекторе можно достигнуть подавления паразитной АМ дл 40 дБ. При этом сопротивление контуров должно быть большим  $R_k > R_{\text{вх}D}$ , чтобы изменение входного сопротивления детекторов заметно снижало эквивалентное сопротивление.

### Фазовый детектор

Предназначен для детектирования ФМ колебаний, и как измерительный элемент в системах фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Фаза – это аргумент синусоидальный или косинусоидальный функции:  $U(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi(t) + \varphi_{\text{нач}})$

В фазовом детекторе для компенсации  $\omega_0 t$  используют специально генерируемое напряжение (опорное) с частотой  $\omega_0$  и начальной фазой, обеспечивающей наилучшее выделение информационной составляющей  $\varphi(t)$ . В качестве фазового детектора можно использовать преобразователь частоты с нагрузкой в виде ФНЧ т.к.: (можно вести отсчет фазы от опорного генератора, тогда  $\varphi_{\text{оп}} = 0$ ). На выходе ФНЧ будет только первое слагаемое. т.к. стоит ФНЧ. Если  $\omega_c \neq \omega_{\text{оп}}$ , то на выходе будут биения с частотой разности  $\Delta\omega$ . Обычно используют двухтактную (балансную) схему фазового детектора (ФД векторного типа):



На входах диодов образуется векторная сумма опорного напряжения, подаваемого синфазно, и сигнального напряжения, подаваемого противофазно. Амплитуда результирующего напряжения на выводах диодов зависит от фазового сдвига между опорным и сигнальным напряжением. Напряжение на выходе каждого амплитудного детектора пропорционально амплитуде этого суммарного напряжения. Общее выходное напряжение формируется как разность  $U_{\text{вых Д1}} - U_{\text{вых Д2}}$ .

Пусть  $U_{\text{оп}}(t) = U_{\text{оп}} \cos \omega t$ ,  $U_c(t) = U_c \cos(\omega t + \varphi_c)$

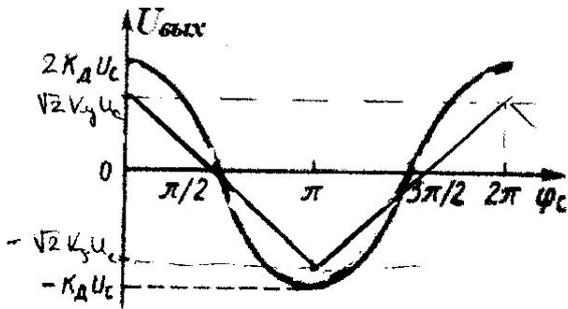
$$U_{\text{вхД1Д2}} = U_{\text{оп}} \pm U_c = \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c^2 \pm 2U_c U_{\text{оп}} \cos \varphi_c} \cos \omega t$$

Амплитудный детектор линеен и  $U_{\text{вых Д1,Д2}} = K_{\text{Д}} U_{\text{вхД1Д2}}$ . Напряжение на выходе фазового детектора:

$$U_{\text{выхФД}} = U_{\text{выхД1}} - U_{\text{выхД2}} = K_{\text{Д}} \left( \left| \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c^2 + 2U_c U_{\text{оп}} \cos \varphi_c} \right| - \left| \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c^2 - 2U_c U_{\text{оп}} \cos \varphi_c} \right| \right) =$$

$$= K_{\text{Д}} \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c^2} \left( 1 + \frac{U_c U_{\text{оп}} \cos \varphi_c}{U_{\text{оп}}^2 + U_c^2} - 1 + \frac{U_c U_{\text{оп}} \cos \varphi_c}{U_{\text{оп}}^2 + U_c^2} \right) = \frac{2K_{\text{Д}} U_c U_{\text{оп}}}{\sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c^2}} \cos \varphi_c$$

Таким образом, напряжение на выходе фазового детектора пропорционально  $\cos \varphi_c$  и зависит от соотношения амплитуд  $U_c$  и  $U_{\text{оп}}$ .



$$S_{\text{ФД}} = \frac{2K_{\text{Д}} U_c U_{\text{оп}}}{\sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c^2}}$$

Если один из сигналов (опорный или сигнальный) существенно больше другого, то напряжение на выходе пропорционально меньшему сигналу. Пусть  $U_{\text{оп}} \ll U_c$ , тогда:

$$U_{\text{вых}} = \frac{2K_{\text{Д}} U_c U_{\text{оп}}}{\sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c^2}} \cos \varphi_c \approx 2K_{\text{Д}} U_{\text{оп}} \cos \varphi_c$$

и наоборот, если  $U_c \ll U_{\text{оп}}$ , то  $U_{\text{вых}} \approx 2K_{\text{Д}} U_c \cos \varphi_c$