

## 6. Демодуляторы радиосигналов

В данном разделе курса рассматриваются принцип действия, схемы и основные характеристики аналоговых демодуляторов радиосигналов.

В супергетеродинном радиоприёмнике демодулятор расположен после усилителя промежуточной частоты (УПЧ), которым заканчивается блок высокой частоты (БВЧ) приёмника. Назначение демодулятора – преобразование модулированного высокочастотного сигнала в низкочастотное напряжение, изменяющееся в соответствии с законом модуляции. Напряжение с выхода демодулятора обрабатывается в блоке низкой частоты (БНЧ) приёмника. По традиции демодуляторы также часто называют *детекторами*.

Тип демодулятора определяется видом модуляции сигнала. Для демодуляции АМ сигнала используется амплитудный демодулятор (АД), ФМ сигнала – фазовый демодулятор (ФД), ЧМ сигнала – частотный демодулятор (ЧД).

Основные сведения о демодуляторах и методы их моделирования изложены в учебном пособии [1].

### 6.1. Амплитудный демодулятор

Рассмотрим некоторые варианты построения амплитудного демодулятора (АД) и его основные характеристики. Принцип действия простейшего диодного АД изучается в курсе «Радиотехнические цепи и сигналы». Существуют два варианта схемы такого АД:

- последовательный,
- параллельный.

Кроме того, используются также демодуляторы, построенные по комбинированной схеме, объединяющей параллельный и последовательный АД. Такого типа демодулятор называют *детектором с удвоением напряжения*.

#### **Последовательный диодный АД**

На рис. 6.1 показана схема последнего каскада УПЧ и последовательного АД. Детектор связан с УПЧ трансформаторной связью.

Этим обеспечивается замыкание цепи постоянного (точнее, низкочастотного) тока АД и развязка по постоянному току АД и усилительного каскада.

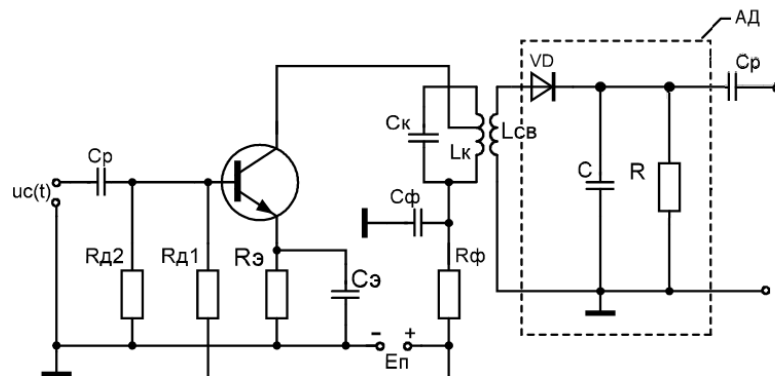
В состав АД входят:

- диод  $VD$ ,
- конденсатор  $C$ ,
- резистор  $R$ .

Название данного варианта АД – «последовательный» – связано с тем, что диод и резистор включены последовательно.

Работа АД основана на том, что сопротивление диода в прямом направлении (открытого диода)  $R_{д.пр}$  много меньше, чем в обратном направлении (закрытого диода)  $R_{д.обр}$ . Величину сопротивления  $R$  выбирают так, чтобы выполнялось условие  $R_{д.пр} \ll R \ll R_{д.обр}$ . Обычно  $R = 20 - 100$  кОм.

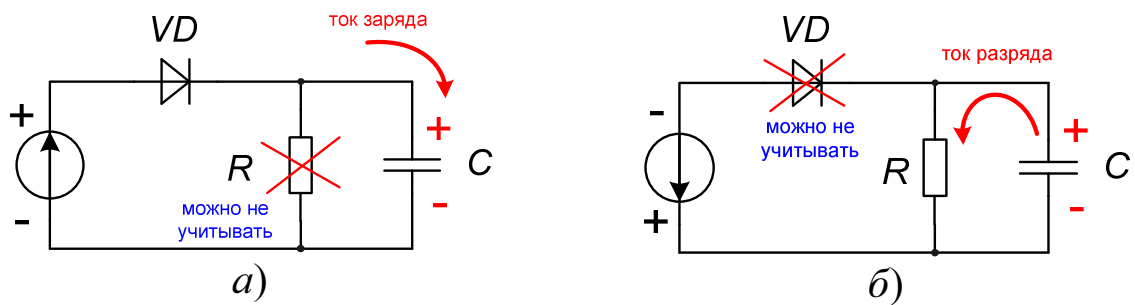
Ёмкость конденсатора  $C$  задают такой величины, чтобы постоянная времени цепи, образованной сопротивлением  $R$  и ёмкостью  $C$ , была бы много больше периода ВЧ сигнала:  $RC \gg T_0 = 1/f_0$ . Другие требования к ёмкости конденсатора будут рассмотрены позднее.



**Рис. 6.1. Последовательный диодный АД**

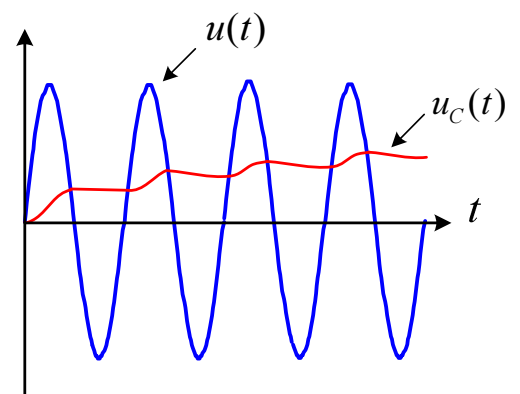
Определим характер переходных процессов в АД при подаче на него немодулированного колебания. Для этого рассмотрим эквивалентные схемы АД при действии положительной и отрицательной полуволн напряжения сигнала (рис. 6.2).

При действии положительной полуволны напряжения происходит заряд конденсатора  $C$  через малое сопротивление открытого диода (рис. 6.2,а). При этом протекание тока через резистор  $R$  можно не учитывать. При действии отрицательной полуволны напряжения диод закрыт и происходит разряд конденсатора  $C$  через резистор  $R$ .



**Рис. 6.2. Эквивалентная схема АД при действии положительной (а) и отрицательной (б) полуволн напряжения**

Поскольку  $R \gg R_{д.пр}$ , то постоянная времени цепи разряда  $\tau_{разр} = RC$  много больше постоянной времени цепи заряда  $\tau_{зар} = R_{д.пр}C$ . Поэтому к концу периода на конденсаторе остаётся некоторое положительное напряжение. Эпюра напряжения  $u_C(t)$  на конденсаторе в переходном режиме показана на рис. 6.3.



**Рис. 6.3. Напряжение на входе  $u(t)$  и выходе  $u_C(t)$  последовательного АД**

По завершении переходного процесса, в установившемся режиме, наступает динамическое равновесие: приращение напряжения на конденсаторе, образующееся при кратковременном заряде через открытый диод, полностью теряется во время разряда, и в результате напряжение на конденсаторе (т.е. на выходе АД) в среднем за период не меняется. Это происходит благодаря перераспределению длительности времени заряда и разряда конденсатора: в установившемся режиме время заряда много меньше времени разряда. Поскольку напряжение на диоде определяется как разность напряжений на входе АД и на конденсаторе,  $u_d(t) = u(t) - u_C(t)$ , то ток через диод протекает только тогда, когда диод открыт. Однако этого тока, который имеет форму коротких импульсов, хватает для подзарядки конденсатора.

В установившемся режиме напряжение на конденсаторе  $C$  (т.е. на выходе АД) имеет постоянную составляющую, близкую по величине к амплитуде сигнала, и негармонические пульсации с частотой сигнала. Поскольку эти пульсации имеют малый уровень, то при анализе работы АД ими обычно пренебрегают.

### Параллельный диодный АД

На рис. 6.4 показана схема последнего каскада УПЧ и параллельного АД. Название такого варианта АД – «параллельный» – связано с тем, что диод  $VD$  и резистор  $R$  включены параллельно. Конденсатор  $C$ , входящий в состав АД, играет также роль разделительного, поэтому параллельный АД можно подключать непосредственно к колебательному контуру усилительного каскада УПЧ.

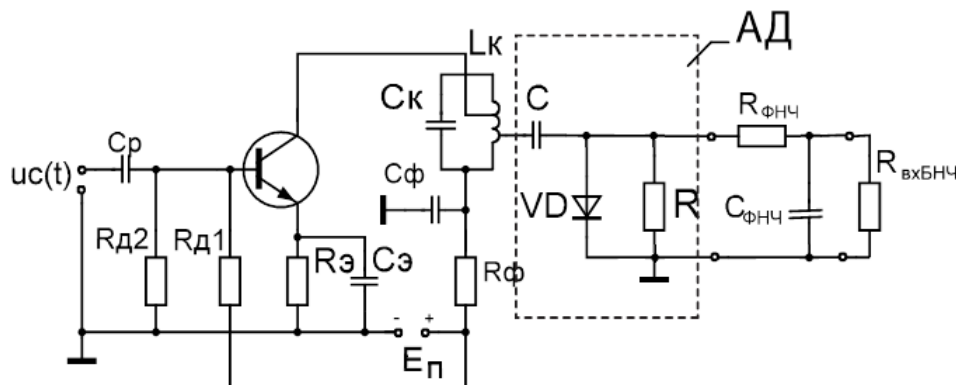


Рис. 6.4. Параллельный диодный АД

Рассмотрим переходные процессы в параллельном АД (рис. 6.5). При действии положительной полуволны напряжения сигнала происходит заряд конденсатора  $C$ . В результате напряжение  $u_R(t)$  на параллельно соединённых диоде и резисторе, т.е. на выходе АД, уменьшается. Таким образом, чем больше заряжается конденсатор  $C$ , тем больше становится отрицательное смещение напряжения на выходе АД.

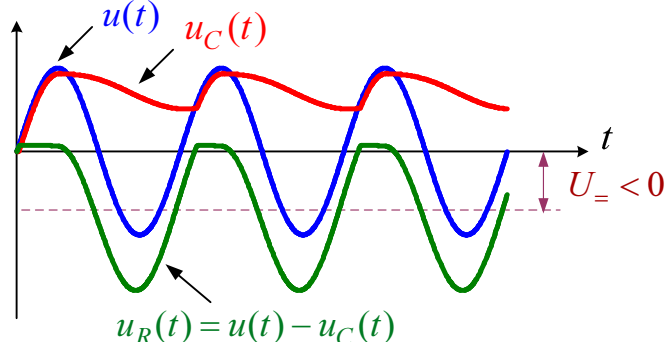


Рис. 6.5. Напряжение на входе  $u(t)$  и выходе  $u_R(t)$  параллельного АД

При этом на выходе параллельного АД (в отличие от последовательного) полностью присутствует ВЧ колебание. Для его ослабления на выходе параллельного АД необходимо поставить фильтр низких частот (ФНЧ) (на схеме, приведённой на рис. 6.4, показан простейший ФНЧ в виде интегрирующей  $RC$ -цепи). Достоинством параллельного АД является то, что его можно подключать непосредственно к источнику сигнала (контуре усилителя). Недостатком – необходимость использования дополнительного ФНЧ.

## Диодный АД с удвоением напряжения

Поскольку на выходе параллельного АД помимо демодулированного сигнала присутствует ещё высокочастотное колебание, то можно выполнить дополнительное детектирование этого колебания с помощью последовательного АД. На рис. 6.6,а показана схема такого комбинированного демодулятора. Здесь конденсатор  $C1$  и диод  $VD1$  вместе со входным сопротивлением остальной части схемы образуют параллельный АД. Полярность включения диода задана так, чтобы постоянная составляющая выходного напряжения была положительной. Диод  $VD2$ , конденсатор  $C2$  и резистор  $R$  образуют последовательный АД.

На рис. 6.6,б приведены эпюры входного колебания  $u(t)$ , напряжения на выходе параллельного АД  $u_{VD1}(t)$  и на выходе последовательного АД  $u_{C2}(t)$ . Видно, что постоянная составляющая напряжения на выходе всей цепи будет приблизительно вдвое больше, чем на выходе последовательного или параллельного АД. В связи с этим построенный по данной схеме АД и называют «детектором с удвоением напряжения».

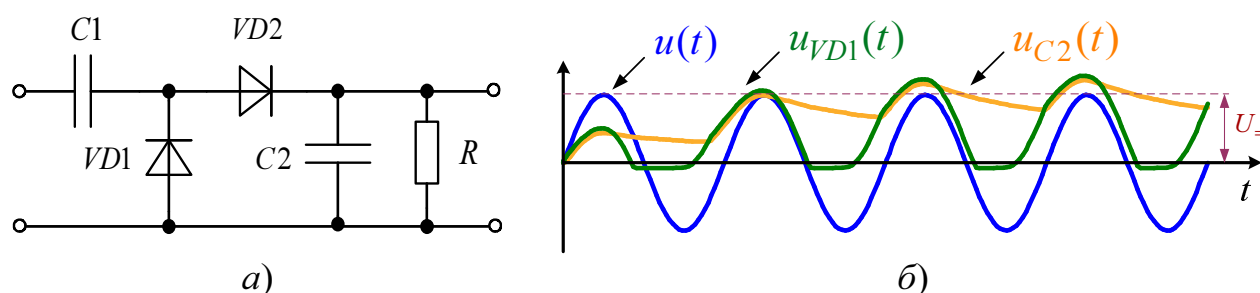


Рис. 6.6. АД с удвоением напряжения: а) схема; б) эпюры напряжений

## Основные характеристики АД

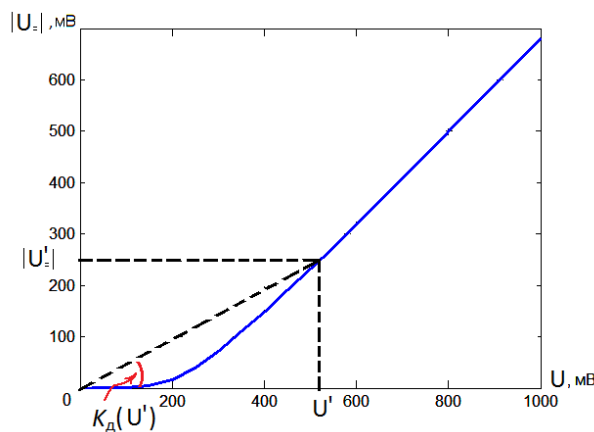
Основными характеристиками АД в установившемся режиме являются:

- детекторная характеристика;
- коэффициент передачи;
- входная проводимость.

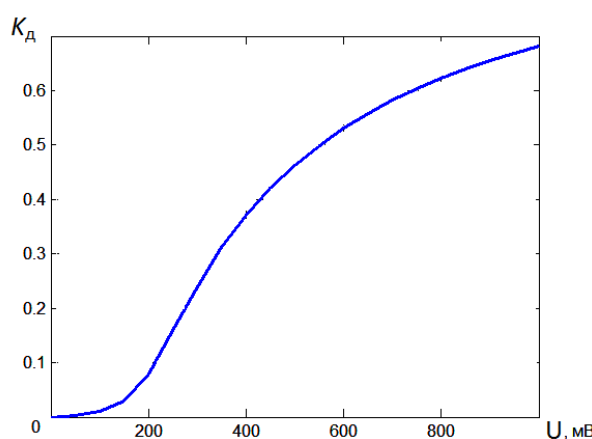
**Детекторная характеристика** – зависимость абсолютной величины постоянного напряжения  $|U_{\text{=}}$  на выходе АД от амплитуды входного напряжения. Обычно считают, что  $U_{\text{=}} > 0$  и знак  $|\cdot|$  опускают. В общем случае эта характеристика нелинейна, особенно при малой амплитуде входного напряжения (рис. 6.7).

**Коэффициент передачи детектора** – отношение абсолютной величины постоянного напряжения на выходе АД к амплитуде напряжения на входе  $K_{\text{д}} = \frac{|U_{\text{=}}|}{U}$ . При этом также обычно считают, что  $U_{\text{=}} > 0$ . Коэффициент передачи детектора и детекторная характеристика связаны между собой:

$$|U_{\text{=}}| = K_{\text{д}} U.$$



**Рис. 6.7. Детекторная характеристика**



**Рис. 6.8. Коэффициент передачи АД**

Графически коэффициент передачи детектора представляет собой угловой коэффициент секущей на графике детекторной характеристики (рис. 6.7). Видно, что при увеличении амплитуды колебания  $U$  угол наклона секущей увеличивается, следовательно, коэффициент передачи детектора возрастает, стремясь к некоторому пределу (рис. 6.8).

При уменьшении амплитуды колебания коэффициент передачи детектора стремится к 0, т.к. при очень малой амплитуде напряжения нелинейные свойства диода не проявляются и эффект детектирования отсутствует.

**Входная проводимость АД** характеризует шунтирующее влияние АД на источник сигнала.

Если источником сигнала является резонансный усилительный каскад УПЧ, то входная проводимость определяется на частоте этого сигнала. Из-за нелинейности диода ток в цепи детектора несинусои-

дален: он содержит постоянную составляющую, 1-ю гармонику и высшие гармоники. Поскольку колебательный контур усилительного каскада является избирательной цепью, настроенной на частоту сигнала, то падение напряжения на нём создаёт только 1-я гармоника тока, а влиянием остальных составляющих входного тока АД можно пренебречь. Поэтому комплексная входная проводимость АД определяется как  $Y_{\text{вх}} = \frac{\dot{I}_{\text{вх}(1)}}{\dot{U}}$ , где  $\dot{I}_{\text{вх}(1)}$  – комплексная амплитуда 1-й гармоники тока. Реактивная составляющая проводимости  $\text{Im } Y_{\text{вх}} = b_{\text{вх}} = \omega C_{\text{д}}$  обусловлена ёмкостью диода. На сравнительно низких частотах обычно  $b_{\text{вх}} \ll g_{\text{вх}} = \text{Re } Y_{\text{вх}}$ , поэтому в дальнейшем будем считать, что входная проводимость АД чисто активна и равна отношению амплитуды 1-й гармоники входного тока к амплитуде напряжения на входе АД:

$$g_{\text{вх}} \approx |Y_{\text{вх}}| = \left| \frac{\dot{I}_{\text{вх}(1)}}{\dot{U}} \right| = \frac{I_{\text{вх}(1)}}{U}.$$

Коэффициент передачи и входная проводимость АД зависят от амплитуды сигнала, сопротивления резистора  $R$  и параметров вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода.

Для случая экспоненциальной аппроксимации ВАХ диода  $I_{\text{д}} = i_0 (e^{aU_{\text{д}}} - 1)$ , которая справедлива при малых напряжениях на диоде, графики зависимости коэффициента передачи последовательного АД от безразмерного параметра  $x = aU$  показаны на рис. 6.9. Параметром этого семейства кривых является безразмерная переменная  $z = ai_0 R$ . Аналогичные графики для нормированной входной проводимости АД приведены на рис. 6.10.

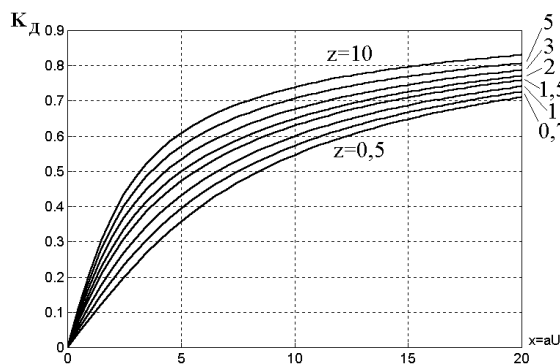


Рис. 6.9. Коэффициент передачи

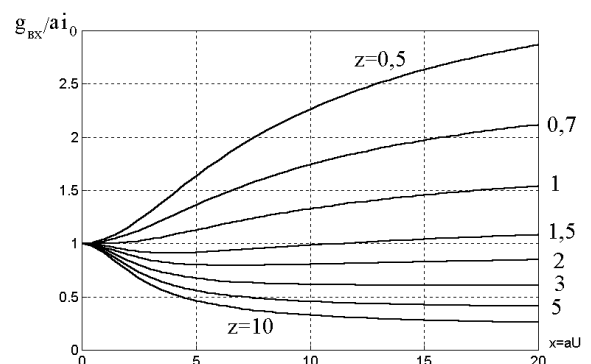


Рис. 6.10. Входная проводимость

Из последних графиков видно, что при увеличении амплитуды сигнала входная проводимость АД стремится к некоторому предельному значению. Это значение можно найти на основе следующих физических соображений. При большой амплитуде сигнала коэффициент передачи АД близок к 1. Следовательно, его можно рассматривать как идеальный преобразователь переменного напряжения в постоянное. Для такого преобразователя выполняется условие баланса мощностей: мощность  $P_{\text{вх}}$ , которая рассеивается на входной проводимости АД, равна мощности  $P_R$ , которая рассеивается на резисторе  $R$ , входящем в состав АД. Первая из этих мощностей равна  $P_{\text{вх}} = \frac{1}{2} U^2 g_{\text{вх}}$ , вторая –  $P_R = U^2 g$ , где  $g = 1/R$ . Поскольку  $U_{\text{вх}} = K_{\text{д}} U \approx U$ , то из условия  $P_{\text{вх}} = P_R$  следует, что

$$g_{\text{вх}} \approx 2g = 2/R.$$

Аналогичным образом можно показать, что для параллельного АД  $g_{\text{вх}} \approx 3g = 3/R$ .

### **Нелинейные искажения в АД**

Существуют следующие основные причины возникновения нелинейных искажений демодулированного колебания в последовательном диодном АД:

- нелинейность детекторной характеристики;
- инерционность АД.

Коротко рассмотрим каждую из этих причин.

#### **Нелинейность детекторной характеристики**

На рис. 6.11 показаны эпюры огибающей АМ сигнала при двух значениях амплитуды несущей  $U'_0$  и  $U''_0 > U'_0$  и соответствующие им эпюры напряжения  $U_{\text{вх}}(t)$  на выходе АД.

Видно, что при малой амплитуде несущей нелинейность начального участка детекторной характеристики приводит к искажению отрицательной полуволны демодулированного колебания. При увеличении амплитуды несущей эпюра огибающей сигнала располагается дальше от начала детекторной характеристики, и нелинейные искажения демодулированного колебания уменьшаются.



Следовательно, для уменьшения искажений, обусловленных нелинейностью детекторной характеристики, нужно увеличивать амплитуду несущей демодулируемого сигнала. Напомним также, что при этом увеличивается коэффициент передачи АД. Всё это определяет требования к амплитуде сигнала на выходе УПЧ и, следовательно, к его коэффициенту усиления.

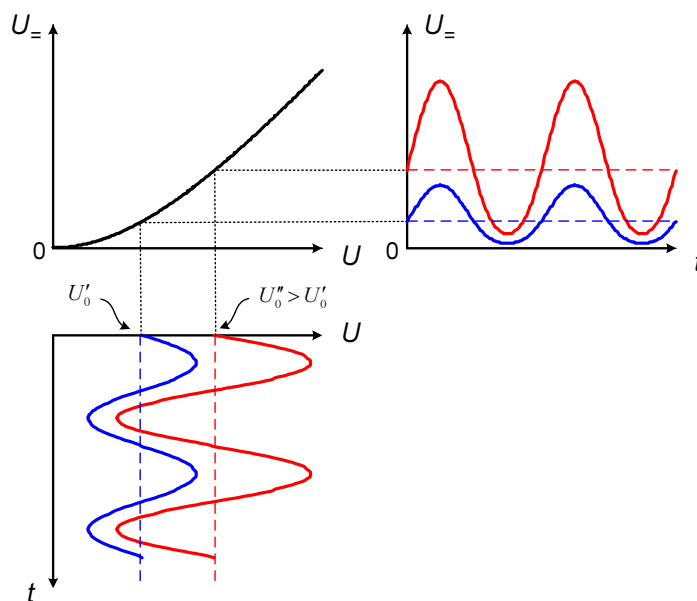


Рис. 6.11. Эпюры огибающей АМ сигнала и демодулированного колебания

### Инерционность АД

Инерционность АД определяется постоянной времени цепи разряда конденсатора  $\tau_{\text{разр}} = RC$ . При действии АМ сигнала на малоинерционный АД процесс разряда конденсатора происходит достаточно быстро, и поэтому изменение напряжения на выходе АД соответствует закону модуляции как при уменьшении амплитуды сигнала, так и при её увеличении (рис. 6.12,а).

В случае большой инерционности АД демодуляция сигнала при увеличении его амплитуды происходит также без искажений, однако при уменьшении амплитуды сигнала конденсатор не успевает разрядиться в достаточной степени, и напряжение на выходе АД в течение некоторого времени оказывается больше, чем напряжение на его входе. В результате диод закрывается, и конденсатор  $C$  свободно раз-

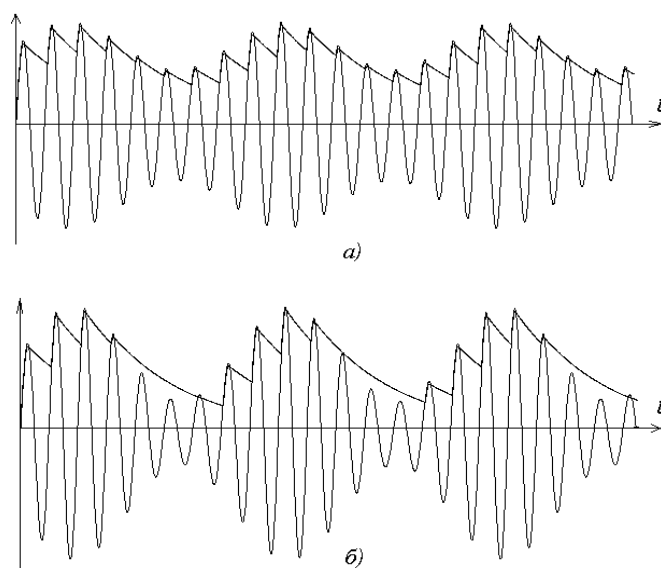


Рис. 6.12. Эпюры напряжения на входе и выходе АД: а) при малой инерционности; б) при большой инерционности

ряжается через резистор  $R$ . Это приводит к появлению нелинейных искажений отрицательной полуволны демодулированного колебания (рис. 6.12,б).

Возможность возникновения нелинейных искажений определяется соотношением между постоянной времени  $\tau_{\text{разр}} = RC$ , с одной стороны, и частотой  $F_m$  и коэффициентом  $m$  модуляции сигнала, с другой. Можно показать, что нелинейные искажения возникают в том случае, когда коэффициент модуляции превышает некоторое критическое значение, которое определяется формулой

$$m_{\text{кр}} = 1 / \sqrt{1 + (2\pi F_m \tau_{\text{разр}})^2}.$$

Для увеличения критического коэффициента модуляции следует уменьшать постоянную времени  $\tau_{\text{разр}}$ . Делать это путём уменьшения сопротивления  $R$  нецелесообразно, т.к. при этом уменьшается коэффициент передачи АД и возрастает его входная проводимость. Поэтому нужно уменьшать ёмкость конденсатора  $C$ , но до такой величины, чтобы постоянная времени  $\tau_{\text{разр}}$  оставалась много больше периода несущей.

### Синхронный АД

Нелинейные искажения демодулированного колебания можно исключить при использовании так называемого синхронного детектора. Такой демодулятор фактически представляет собой преобразователь частоты, выполняющий перенос сигнала на нулевую частоту (в этом отношении он аналогичен преобразователю частоты гомодинного радиоприёмника). Структурная схема синхронного АД (САД) показана на рис. 6.13. На один вход перемножителя подаётся демодулируемый сигнал  $u_c(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_c)$ , на другой вход – вспомогательное так называемое опорное колебание  $u_{\text{оп}}(t) = U_{\text{оп}} \cos(\omega_0 t + \varphi_{\text{оп}})$ , совпадающее по частоте с сигналом<sup>\*)</sup>.

Напряжение на выходе перемножителя, равное

<sup>\*)</sup> С этим свойством опорного колебания связано название детектора – «синхронный».

$$u_c(t)u_{оп}(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_c) \cdot U_{оп} \cos(\omega_0 t + \varphi_{оп}) =$$

$$= \frac{1}{2} U(t) U_{оп} \cos(\varphi_c - \varphi_{оп}) + \frac{1}{2} U(t) U_{оп} \cos(2\omega_0 t + \varphi_c + \varphi_{оп}), \quad (6.1)$$

содержит низкочастотную составляющую  $\frac{1}{2} U(t) U_{оп} \cos(\varphi_c - \varphi_{оп})$ , которая выделяется с помощью ФНЧ. Напряжение на выходе ФНЧ пропорционально  $U(t) \cos \Delta\varphi$ , где  $\Delta\varphi = \varphi_c - \varphi_{оп}$ , т.е. соответствует закону амплитудной модуляции сигнала  $U(t)$ . Наибольший коэффициент передачи синхронного АД будет при равенстве фазы опорного колебания и фазы сигнала. Увеличение разности фаз  $\Delta\varphi = \varphi_c - \varphi_{оп}$  приводит к уменьшению коэффициента передачи, а её нестабильность – к искажениям демодулированного колебания.

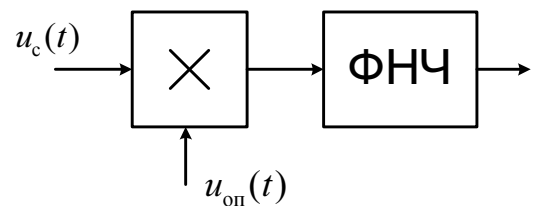


Рис. 6.13. Синхронный АД

С помощью автономного генератора сформировать в приёмнике опорное колебание, точно совпадающее по частоте и фазе с принимаемым сигналом, практически невозможно. Поэтому для его получения используются специальные схемы. Простейшая схема формирования гармонического опорного колебания из принимаемого сигнала показана на рис. 6.14. Амплитудный ограничитель АО устраняет амплитудную модуляцию сигнала, а узкополосный фильтр УФ выделяет 1-ю гармонику, которая по частоте и фазе совпадает с сигналом.

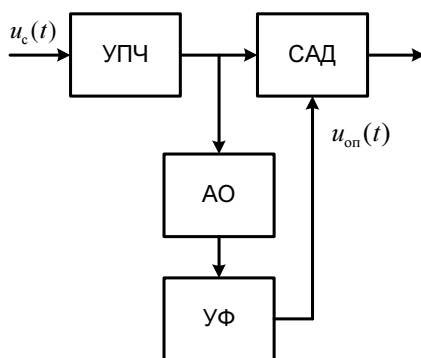


Рис. 6.14. Формирование опорного колебания с помощью узкополосного фильтра

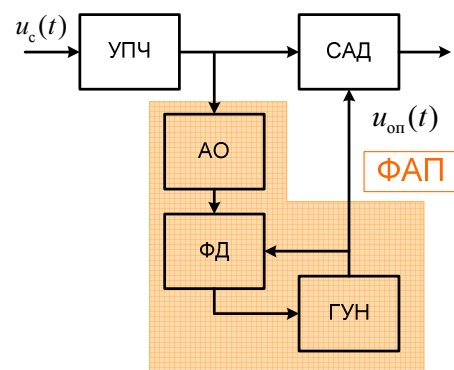


Рис. 6.15. Формирование опорного колебания с помощью системы ФАП

При более сложном способе формирования опорного колебания используется генератор, управляемый напряжением (ГУН), который

подстраивается под сигнал по частоте и фазе с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАП) (рис. 6.15).

### АД с квадратурными каналами

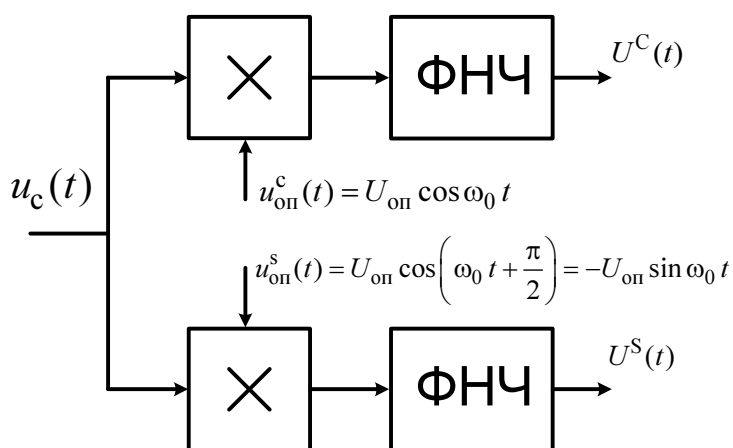
Необходимость точной синхронизации опорного колебания с сигналом можно исключить, если использовать схему с квадратурными каналами. Её работа основана на математическом определении огибающей сигнала как модуля его комплексной огибающей

$$\dot{U}(t) = U(t)e^{j\varphi_c} = U(t)\cos\varphi_c + jU(t)\sin\varphi_c = U^C(t) + jU^S(t).$$

Здесь  $U^C(t) = U(t)\cos\varphi_c$  – синфазная (косинусная) низкочастотная составляющая сигнала,  $U^S(t) = U(t)\sin\varphi_c$  – квадратурная (синусная) составляющая. Огибающая сигнала равна

$$U(t) = |\dot{U}(t)| = \sqrt{U^C(t)^2 + U^S(t)^2}.$$

Схема формирования низкочастотных квадратурных составляющих сигнала состоит из двух каналов, каждый из которых представляет собой синхронный АД (рис. 6.16).

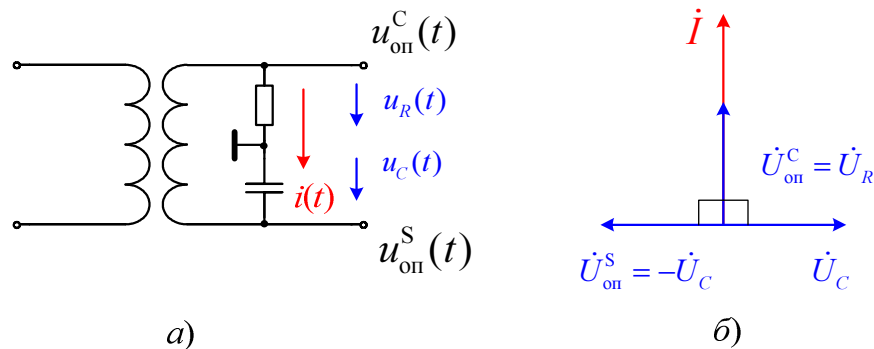


**Рис. 6.16. Схема формирования низкочастотных квадратурных составляющих сигнала**

Примем для простоты, что фаза опорного колебания синфазного (косинусного) канала равна 0, а амплитуда обоих опорных колебаний  $U_{\text{оп}} = \frac{1}{2}$ . Тогда в соответствии с (6.1) низкочастотное напряжение на выходе ФНЧ этого канала будет равно  $U(t)\cos\varphi_c = U^C(t)$ . Фаза опор-

ного колебания квадратурного (синусного) канала равна  $\pi/2$ . Поэтому низкочастотное напряжение на выходе ФНЧ этого канала равно  $U(t) \cos(\varphi_c - \pi/2) = U(t) \sin \varphi_c = U^S(t)$ .

Для получения опорных колебаний  $u_{\text{оп}}^C(t)$  и  $u_{\text{оп}}^S(t)$ , сдвинутых по фазе одно относительно другого на  $\pi/2$ , обычно используется не фазовращатель, а специальная цепь, формирующая из напряжения внешнего генератора два колебания с фазовым сдвигом  $\pi/2$ . Такая цепь называется *фазорасщепляющей*. Её схема показана на рис. 6.17,а. Напряжение от генератора опорного колебания с помощью трансформатора подаётся на последовательно соединённые резистор  $R$  и конденсатор  $C$ . При протекании тока  $i(t)$  через эту цепь на резисторе создаётся падение напряжения  $u_R(t)$ , а на конденсаторе – падение напряжения  $u_C(t)$ .



**Рис. 6.17. Фазорасщепляющая цепь:**  
**а) схема; б) векторная диаграмма**

Построим векторную диаграмму токов и напряжений в цепи (рис. 6.17,б) в следующей последовательности:

- зададим направление вектора тока  $\dot{I}$ ;
- построим вектор падения напряжения на резисторе  $\dot{U}_R = R\dot{I}$ , который совпадает по направлению с вектором тока  $\dot{I}$ ;
- построим вектор падения напряжения на конденсаторе  $\dot{U}_C = \dot{I}/j\omega C = -j\dot{I}/\omega C$ , который отстаёт по фазе от вектора тока  $\dot{I}$  на  $\pi/2$ ;
- вектор напряжения на конденсаторе относительно «земли» противоположен вектору  $\dot{U}_C$ , следовательно, он на  $\pi/2$  опережает по фазе вектор  $\dot{U}_R$ .

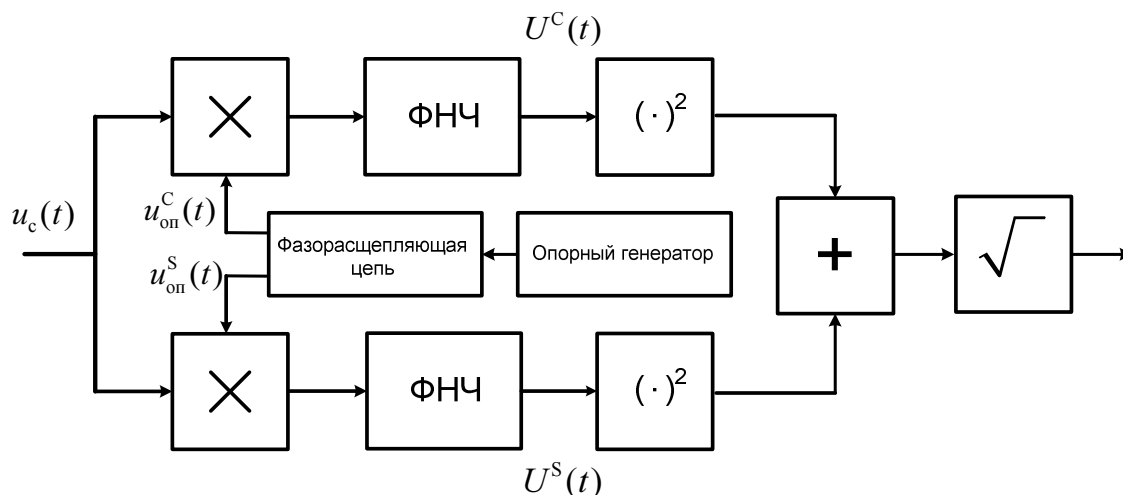
Таким образом, напряжения на резисторе и конденсаторе относительно заземлённой средней точки цепи соответствуют напряжениям

опорных колебаний  $u_{\text{оп}}^C(t)$  и  $u_{\text{оп}}^S(t)$ . Разность фаз этих колебаний независимо от частоты равна  $\pi/2$ . Однако соотношение их амплитуд от частоты зависит. Для получения на частоте  $f_0$  одинаковой амплитуды опорных колебаний емкостное сопротивление конденсатора должно быть равно активному сопротивлению резистора:

$$\frac{1}{2\pi f_0 C} = R.$$

Следовательно, постоянная времени  $RC$ -цепи должна удовлетворять условию  $RC = \frac{1}{2\pi f_0}$ .

Полная схема АД с квадратурными каналами показана на рис. 6.18.



**Рис. 6.18. АД с квадратурными каналами**

## 6.2. Фазовый демодулятор

Фазовый демодулятор (детектор) (ФД) предназначен для формирования постоянного напряжения, величина и знак которого определяются разностью фаз двух колебаний, поступающих на его входы. Одним из этих колебаний является демодулируемый сигнал  $u_c(t)$ , другим – опорное колебание  $u_{\text{оп}}(t)$ . При этом выходное напряжение ФД определяется разностью фаз  $\Delta\varphi = \varphi_c - \varphi_{\text{оп}}$  этих колебаний, приведенной к интервалу  $[-\pi, \pi]$ . В составе радиоприёмника ФД может выполнять следующие две основные функции:

- демодулятора ФМ сигнала;
- дискриминатора фазового сдвига (в системах фазовой автоподстройки частоты).

Характеристикой ФД называется зависимость выходного напряжения от разности фаз сигнала и опорного колебания при одинаковых частотах этих колебаний. Поскольку ФД реагирует на разность фаз колебаний, приведённую к интервалу  $[-\pi, \pi]$ , то характеристика ФД периодична с периодом  $2\pi$ .

### ФД на логических элементах

Линейную характеристику имеет ФД, построенный на логических элементах. Такое устройство может использоваться на сравнительно низких частотах, когда искажением формы импульсных сигналов из-за переходных процессов можно пренебречь. Схема ФД показана на рис. 6.19.

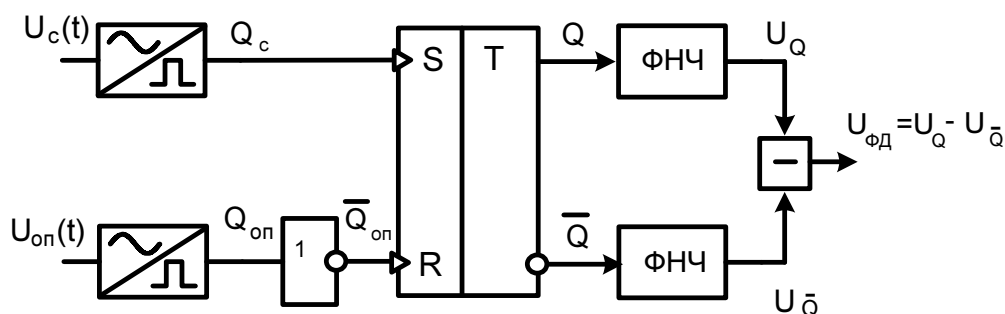


Рис. 6.19. ФД на логических элементах

В её состав входят два устройства формирования, которые преобразуют гармонические колебания  $u_c(t)$  и  $u_{оп}(t)$  в логические импульсные последовательности, логический инвертор (схема «НЕ») в канале опорного колебания, асинхронный динамический триггер, управляемый фронтами импульсов, два фильтра низких частот и схема вычитания напряжений. Фильтры служат для выделения постоянной составляющей напряжения импульсных последовательностей и должны иметь постоянную времени, которая много больше периода повторения импульсов.

Рассмотрим эюры напряжений в схеме при  $\Delta\varphi < 0$ , считая для простоты, что уровень логического нуля равен 0, а уровень логиче-

ской единицы 1 В (рис. 6.20). На верхнем графике показана эюра опорного колебания  $u_{\text{оп}}(t)$  и формируемая из него логическая последовательность импульсов  $Q_{\text{оп}}$ . На втором графике изображены аналогичные эюры для напряжения гармонического сигнала  $u_c(t)$ . Эти колебания имеют задержку относительно начала координат  $\Delta t = \Delta\varphi/\omega_0$ . На третьем графике показана логическая последовательность  $\bar{Q}_{\text{оп}}$  на выходе инвертора в канале опорного колебания.

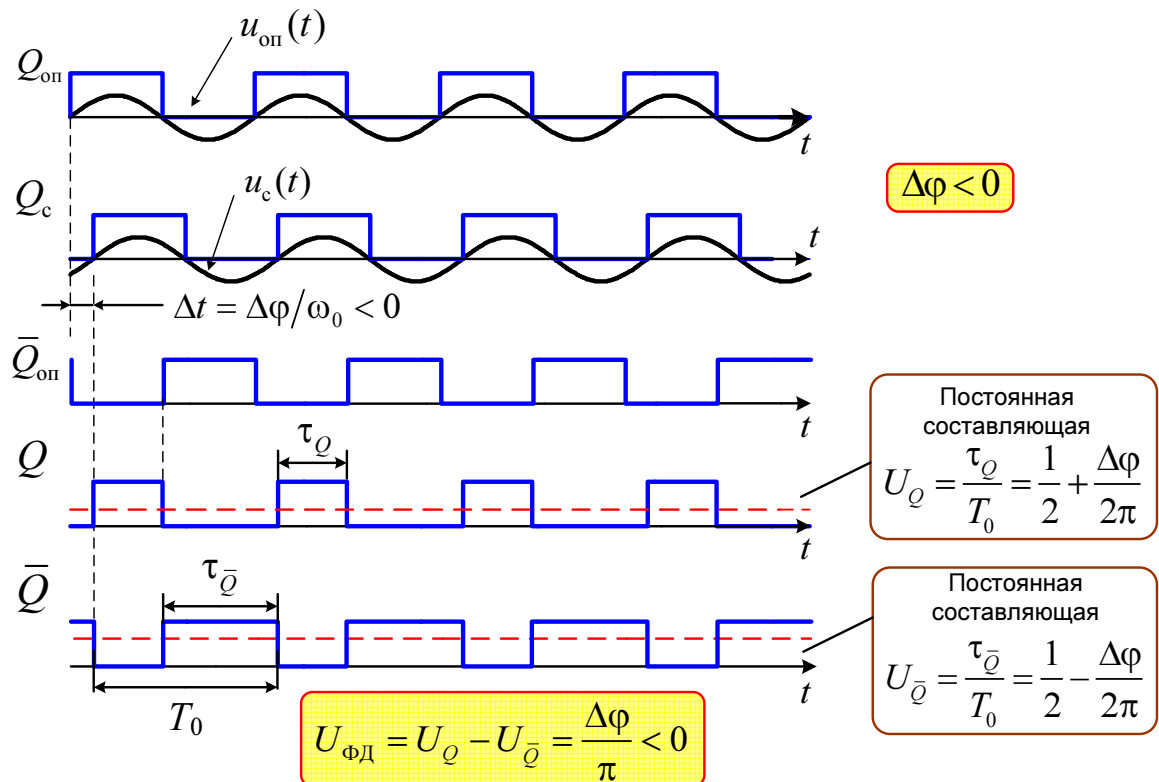


Рис. 6.20. Эюры напряжений в схеме ФД

На следующих двух графиках изображены импульсные последовательности  $Q$  и  $\bar{Q}$  на выходах триггера. Триггер устанавливается в состояние «1» в момент действия фронта импульсной последовательности  $Q_c$ , сформированной из сигнала, и «сбрасывается» в состояние «0» фронтом инвертированной последовательности  $\bar{Q}_{\text{оп}}$ , т.е. в момент спада импульса, сформированного из опорного колебания. В результате на неинвертирующем выходе триггера  $Q$  формируется импульс длительностью  $\tau_Q = T_0/2 + \Delta t = T_0/2 + \Delta\varphi/\omega_0$ , где  $T_0$  – период колебаний (как сигнала, так и опорного колебания). На инвертирующем выходе триггера  $\bar{Q}$  формируется последовательность импульсов длительностью



$\tau_{\bar{Q}} = T_0 - \tau_Q = T_0/2 - \Delta\varphi/\omega_0$ . (В рассматриваемом примере  $\Delta\varphi < 0$ , поэтому  $\tau_{\bar{Q}} > \tau_Q$ ).

Постоянная составляющая импульсной последовательности  $Q$ , выделяемая ФНЧ, равна среднему значению напряжения за период  $T_0$ :

$$U_Q = \frac{\tau_Q}{T_0} = \frac{1}{2} + \frac{\Delta\varphi}{\omega_0 T_0} = \frac{1}{2} + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}.$$

Аналогично, постоянная составляющая импульсной последовательности  $\bar{Q}$  на инвертирующем выходе равна

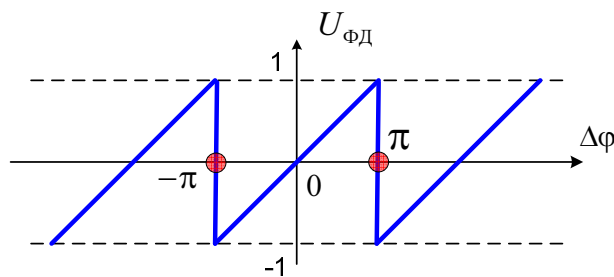
$$U_{\bar{Q}} = \frac{1}{2} - \frac{\Delta\varphi}{2\pi}.$$

Напряжение на выходе ФД, равное разности этих двух составляющих, прямо пропорционально разности фаз  $\Delta\varphi$  сигнала и опорного колебания:

$$U_{\text{ФД}} = U_Q - U_{\bar{Q}} = \frac{\Delta\varphi}{\pi}.$$

Это выражение справедливо для  $\Delta\varphi \in [-\pi, \pi]$ .

Рассматривая эпюры напряжений, можно убедиться, что при переходе разности фаз через  $\pi$  импульсные последовательности «меняются местами» и напряжение на выходе ФД скачком изменяется на противоположное по знаку. Максимальное по абсолютной величине напряжение на выходе ФД равно разности уровней логической единицы и логического нуля, т.е. 1 В. Таким образом, характеристика имеет вид, показанный на рис. 6.21. Её крутизна равна  $S_{\text{ФД}} = 1/\pi$  [В/рад].



**Рис. 6.21. Характеристика ФД на логических элементах**

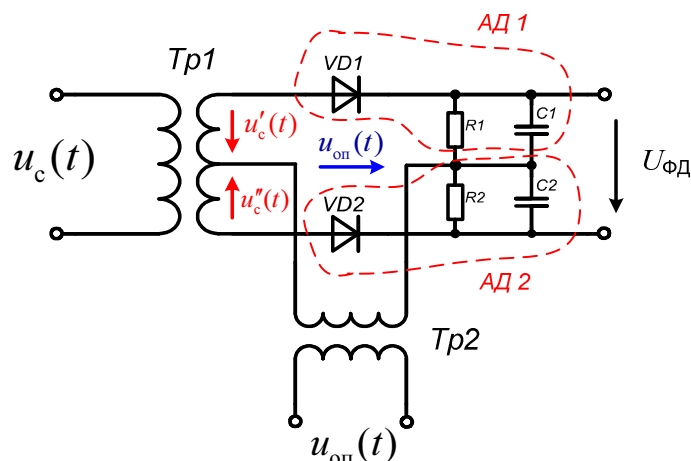
### **Балансный ФД векторомерного типа**

Наиболее распространённым типом полностью аналогового ФД является *балансный ФД векторомерного*<sup>\*)</sup> *типа*. В таком ФД раз-

<sup>\*)</sup> То есть «измеряющий фазу».

ность фаз сигнала и опорного колебания преобразуется в изменение амплитуды колебания, которое затем с помощью АД преобразуется в постоянное напряжение.

Схема балансного диодного ФД векторомерного типа показана на рис. 6.22. Она аналогична схеме балансного диодного смесителя, с той лишь разницей, что вместо выходного колебательного контура здесь включены элементы  $R$  и  $C$  последовательного диодного амплитудного детектора.



**Рис. 6.22. Балансный ФД векторомерного типа**

Выходное напряжение образуется как разность напряжений на выходах двух амплитудных детекторов:  $U_{\text{ФД}} = U_{\text{АД1}} - U_{\text{АД2}}$ . Можно показать, что при определённых условиях такой ФД фактически представляет собой смеситель с нулевой промежуточной частотой.

Рассмотрим принцип действия ФД при следующих условиях:

- коэффициенты передачи трансформаторов  $\text{Tr1}$  и  $\text{Tr2}$  равны 1;
- амплитудные детекторы линейны и безынерционны, коэффициенты передачи детекторов одинаковы.

Напряжение сигнала, индуцируемое во вторичной обмотке трансформатора  $\text{Tr1}$ , делится относительно средней точки на два равных по амплитуде противофазных колебания  $u'_c(t) = \frac{1}{2}u_c(t)$  и

$u''_c(t) = -\frac{1}{2}u_c(t)$ . Напряжения на входе первого (верхнего) и второго (нижнего) амплитудных детекторов равны соответственно

$$u_1(t) = u_{\text{оп}}(t) + u'_c(t) = u_{\text{оп}}(t) + \frac{1}{2}u_c(t),$$

$$u_2(t) = u_{\text{оп}}(t) + u_c''(t) = u_{\text{оп}}(t) - \frac{1}{2}u_c(t).$$

Рассмотрим векторную диаграмму напряжений при некоторой величине разности фаз  $\Delta\varphi$  между сигналом и опорным колебанием (рис. 6.23). Комплексная амплитуда напряжения на входе первого АД геометрически изображается вектором  $\dot{U}_1$ , равным сумме вектора комплексной амплитуды опорного колебания  $\dot{U}_{\text{оп}}$  и вектора  $\dot{U}'_c$ , соответствующего напряжению сигнала на верхней половине вторичной обмотки трансформатора. Напряжение на выходе АД пропорционально амплитуде входного колебания и, следовательно, пропорционально длине этого вектора. Аналогично, напряжение на выходе второго АД пропорционально длине вектора  $\dot{U}_2$ , равного сумме вектора комплексной амплитуды опорного колебания  $\dot{U}_{\text{оп}}$  и вектора  $\dot{U}''_c$ , соответствующего напряжению сигнала на нижней половине вторичной обмотки трансформатора.

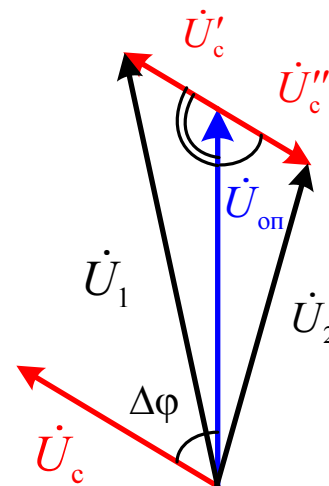


Рис. 6.23. Векторная диаграмма

Найдём длины векторов  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ . Для этого рассмотрим треугольник, образованный векторами  $\dot{U}_{\text{оп}}$ ,  $\dot{U}'_c$  и  $\dot{U}_1$ . Из векторной диаграммы видно, что угол между векторами  $\dot{U}_{\text{оп}}$  и  $\dot{U}'_c$  равен  $\pi - \Delta\varphi$ . Длина вектора  $\dot{U}_1$  может быть определена по теореме косинусов как

$$\begin{aligned} U_1 = |\dot{U}_1| &= \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c'^2 - 2U_{\text{оп}}U_c' \cos(\pi - \Delta\varphi)} = \\ &= \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c'^2 + 2U_{\text{оп}}U_c' \cos \Delta\varphi}. \end{aligned}$$

Аналогично, длина вектора  $\dot{U}_2$  равна

$$U_2 = |\dot{U}_2| = \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c''^2 - 2U_{\text{оп}}U_c'' \cos \Delta\varphi}.$$

Поскольку  $U'_c = U_c'' = U_c/2$ , то разность длин векторов  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ , определяющая напряжение на выходе ФД, равна

$$U_1 - U_2 = \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c^2/4 + U_{\text{оп}}U_c \cos \Delta\varphi} - \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_c^2/4 - U_{\text{оп}}U_c \cos \Delta\varphi}.$$

Следовательно, характеристика ФД определяется выражением

$$U_{\text{ФД}}(\Delta\varphi) = K_{\text{д}} U_{\text{оп}} \left[ \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left( \frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{оп}}} \right)^2 + \frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{оп}}} \cos \Delta\varphi} - \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left( \frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{оп}}} \right)^2 - \frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{оп}}} \cos \Delta\varphi} \right], \quad (6.2)$$

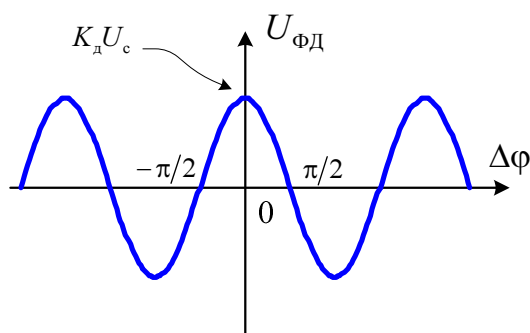
где  $K_{\text{д}}$  – коэффициент передачи АД, входящих в состав ФД.

Вид детекторной характеристики зависит от соотношения амплитуд сигнала и опорного колебания. Обычно  $U_{\text{оп}} \gg U_{\text{с}}$ . В этом случае, пренебрегая в (6.2) квадратичными слагаемыми и используя приближённую формулу  $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2}$ , можно получить следующее выражение для характеристики ФД:

$$U_{\text{ФД}}(\Delta\varphi) \approx K_{\text{д}} U_{\text{с}} \cos \Delta\varphi. \quad (6.3)$$

Видно, что в данном случае напряжение на выходе ФД не зависит от амплитуды опорного колебания и прямо пропорционально амплитуде сигнала и косинусу разности фаз сигнала и опорного колебания.

График характеристики ФД при  $U_{\text{оп}} \gg U_{\text{с}}$  показан на рис. 6.24. Поскольку эта характеристика описывается чётной функцией, т.е.



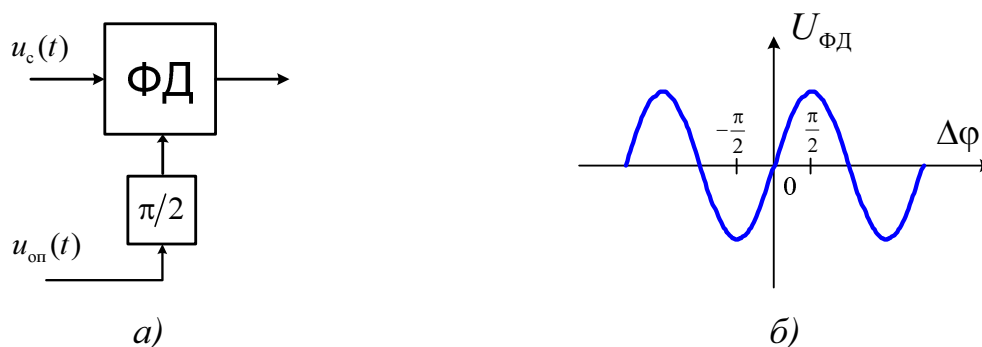
**Рис. 6.24. Характеристика ФД векторомерного типа**

$U_{\text{ФД}}(-\Delta\varphi) = U_{\text{ФД}}(\Delta\varphi)$ , то такой ФД ни в качестве демодулятора, ни в качестве дискриминатора непосредственно использовать нельзя. Для того чтобы характеристика ФД имела нуль при  $\Delta\varphi = 0$  и положительную крутизну в нуле, нужно сдвинуть её график по оси абсцисс вправо на  $\pi/2$ . Для этого из аргумента

$\Delta\varphi$  нужно вычесть  $\pi/2$ , а поскольку  $\Delta\varphi = \varphi_{\text{с}} - \varphi_{\text{оп}}$ , то для реализации этой операции достаточно ввести в опорное колебание дополнительный фазовый сдвиг  $\pi/2$ :

$$\Delta\varphi - \pi/2 = \varphi_{\text{с}} - (\varphi_{\text{оп}} + \pi/2).$$

Схема ФД с дополнительным фазовращателем показана на рис. 6.25,а, а его характеристика – на рис. 6.25,б.



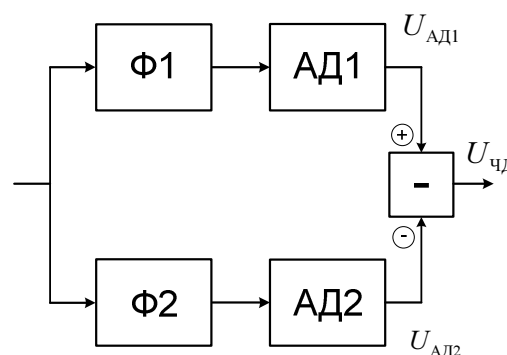
**Рис. 6.25. Схема (а) и характеристика (б) ФД векторомерного типа с фазовращателем в цепи опорного колебания**

### 6.3. Частотный демодулятор

Частотный демодулятор (ЧД) предназначен для преобразования модулированного по частоте колебания, поступающего с выхода УПЧ, в низкочастотное напряжение, изменяющееся по закону ЧМ. Обычно напряжение на выходе ЧД определяется не абсолютным значением частоты, а его отклонением от некоторой частоты  $f_0$ . Другая функция ЧД – использование его в качестве частотного дискриминатора для преобразования отклонения частоты несущей сигнала от её номинального значения в постоянное напряжение, величина и знак которого характеризуют величину и знак частотного отклонения. Частотные дискриминаторы используются в системах автоматической подстройки частоты.

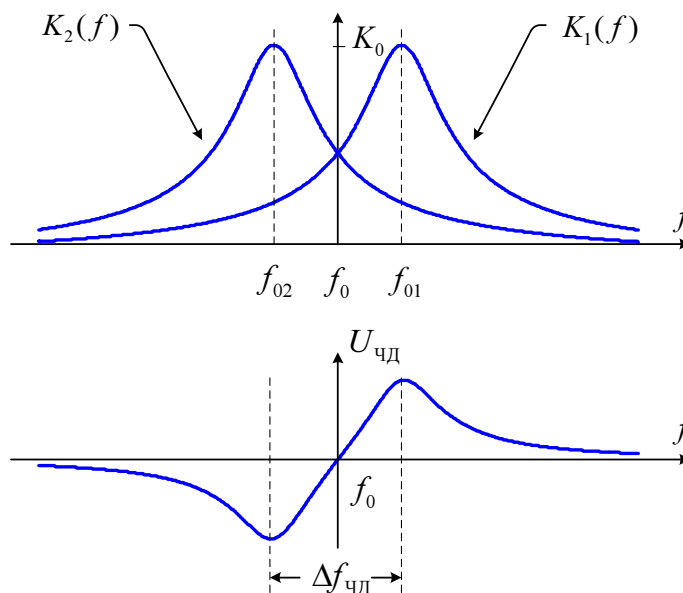
Работа ЧД обычно основана на преобразовании ЧМ сигнала в колебание с другим видом модуляции – амплитудной или фазовой – и последующей демодуляции этого колебания. Возможно также построение ЧД на основе аналитического определения мгновенной частоты сигнала.

Рассмотрим принцип действия демодулятора, основанного на преобразовании ЧМ в АМ, – *балансного ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами*. Его структурная схема изображена на рис. 6.26. ЧМ сигнал подаётся на два фильтра (колебательных контура)  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$ , имеющих одинаковую полосу пропускания, одинаковый резонанс-



**Рис. 6.26. Балансный ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами**

ный коэффициент передачи и различную резонансную частоту:  $f_{01}$  и  $f_{02}$  соответственно. Выходное напряжение ЧД  $U_{\text{чд}}$  образуется как разность напряжений на выходах амплитудных детекторов АД1 и АД2, подключённых к фильтрам:  $U_{\text{чд}} = U_{\text{АД1}} - U_{\text{АД2}}$ . Если оба детектора линейны и имеют одинаковый коэффициент передачи  $K_d$ , то  $U_{\text{чд}}$  пропорционально разности значений АЧХ фильтров на частоте сигнала. При этом на частоте  $f_0 = \frac{f_{01} + f_{02}}{2}$  напряжение на выходе ЧД равно нулю. АЧХ фильтров и характеристика ЧД (зависимость  $U_{\text{чд}}$  от частоты сигнала) показаны на рис. 6.27. Видно, что вблизи частоты  $f_0$  характеристика имеет практически линейный участок.



**Рис. 6.27. Характеристика балансного ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами**

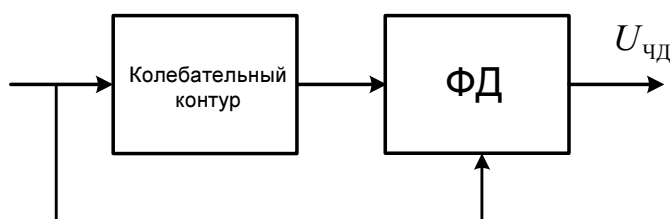
Частота  $f_0$ , при которой выходное напряжение ЧД равно нулю, называется *переходной частотой* демодулятора. Ширина области частот, в пределах которой характеристика ЧД близка к линейной, называется *апертурой характеристики*  $\Delta f_{\text{чд}}$ . Обычно апертуру приближённо определяют как расстояние между «горбами» характеристики. Крутизна характеристики ЧД

$$S_{\text{чд}} = \left. \frac{dU_{\text{чд}}}{df} \right|_{f=f_0}$$

зависит от амплитуды сигнала: чем больше амплитуда, тем больше напряжение на выходах амплитудных детекторов при той же расстройке по частоте и, следовательно, больше крутизна характеристики ЧД.

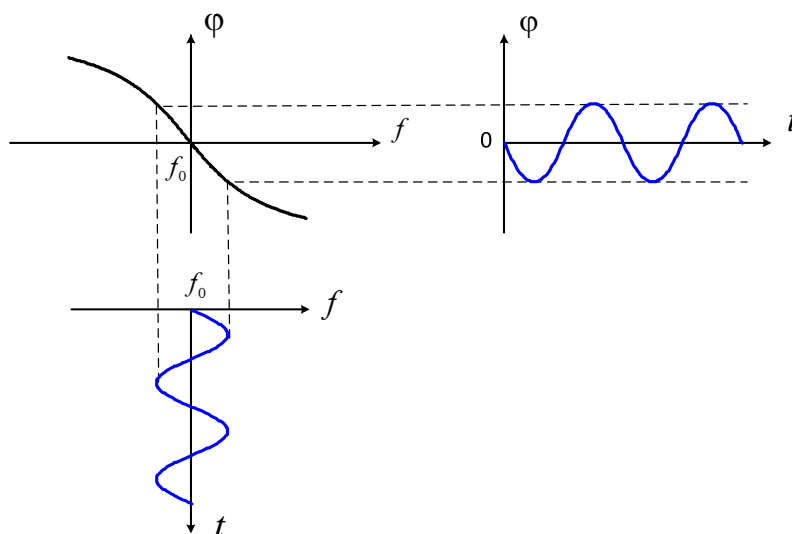
Другой тип частотного демодулятора основан на преобразовании ЧМ в ФМ и последующей демодуляции ФМ сигнала. Для выполнения такого преобразования можно использовать любую частотно-зависимую цепь, имеющую в интервале изменения частоты сигнала линейную ФЧХ. Этому условию приближённо удовлетворяет колебательный контур, резонансная частота которого равна частоте несущей ЧМ сигнала, а полоса пропускания больше ширины интервала изменения частоты. Для демодуляции полученного в результате такого преобразования ФМ сигнала можно использовать рассмотренный в п. 6.2 ФД на логических элементах.

Структурная схема ЧД данного типа изображена на рис. 6.28.



**Рис. 6.28. ЧД с преобразованием ЧМ в ФМ**

Рис. 6.29 поясняет преобразование ЧМ в ФМ. Здесь показаны ФЧХ контура, эпюра мгновенной частоты сигнала с гармонической ЧМ и эпюра фазового сдвига сигнала на выходе контура.



**Рис. 6.29. ФЧХ контура, эпюры мгновенной частоты сигнала и фазового сдвига сигнала на выходе контура**

### ЧД с квадратурными каналами

Принцип действия такого ЧД основан на аналитическом выражении для мгновенной частоты сигнала. Мгновенная угловая частота сигнала равна  $\omega(t) = \omega_{\text{оп}} + \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega_{\text{оп}} + \Delta\omega(t)$ , где  $\varphi(t) = \arctg \frac{U^S(t)}{U^C(t)}$  – фазовый сдвиг сигнала относительно опорного колебания с частотой  $\omega_{\text{оп}}$ ,  $U^S(t)$  и  $U^C(t)$  – низкочастотная синусная и косинусная составляющие сигнала соответственно. Обозначим отношение  $\frac{U^S(t)}{U^C(t)}$  как  $y(t)$ . Тогда по теореме о производной сложной функции

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \arctg y(t) = \frac{d}{dy} \arctg y(t) \cdot \frac{dy(t)}{dt} = \frac{1}{1+y^2(t)} \frac{dy(t)}{dt}.$$

Подставляя в это выражение переменную  $y(t) = \frac{U^S(t)}{U^C(t)}$ , получим

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi(t)}{dt} &= \frac{1}{1 + \left(\frac{U^S(t)}{U^C(t)}\right)^2} \frac{d}{dt} \frac{U^S(t)}{U^C(t)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{U^S(t)}{U^C(t)}\right)^2} \frac{U^{S'}(t)U^C(t) - U^{C'}(t)U^S(t)}{U^C(t)^2} = \\ &= \frac{U^{S'}(t)U^C(t) - U^{C'}(t)U^S(t)}{U^C(t)^2 + U^S(t)^2}, \end{aligned}$$

где  $U^{S'}(t) = \frac{dU^S(t)}{dt}$ ,  $U^{C'}(t) = \frac{dU^C(t)}{dt}$ .

Таким образом,

$$\Delta\omega(t) = \frac{U^{S'}(t)U^C(t) - U^{C'}(t)U^S(t)}{U^C(t)^2 + U^S(t)^2} = \frac{U^{S'}(t)U^C(t) - U^{C'}(t)U^S(t)}{U(t)^2},$$

где  $U(t)$  – амплитуда сигнала. Следует отметить, что в ЧД, построенном в соответствии с этим выражением, напряжение на выходе определяется только отклонением частоты сигнала от частоты опорного



колебания и не зависит от амплитуды сигнала. Характеристика такого ЧД линейная.

Если в радиоприёмнике с помощью системы автоматической регулировки усиления или амплитудного ограничителя обеспечить постоянство амплитуды сигнала на входе ЧД, то операцию деления на  $U(t)^2$  можно исключить. В этом случае напряжение на выходе ЧД определяется выражением

$$U_{\text{ЧД}}(t) = K_{\text{ЧД}} \left[ U^{S'}(t)U^C(t) - U^{C'}(t)U^S(t) \right],$$

где  $K_{\text{ЧД}}$  – коэффициент передачи ЧД, зависящий от параметров дифференцирующих цепей и перемножителей и амплитуды сигнала на входе ЧД. Такой ЧД также имеет линейную характеристику.

Структурная схема ЧД данного типа вместе со схемой формирования низкочастотных квадратурных составляющих изображена на рис. 6.30.

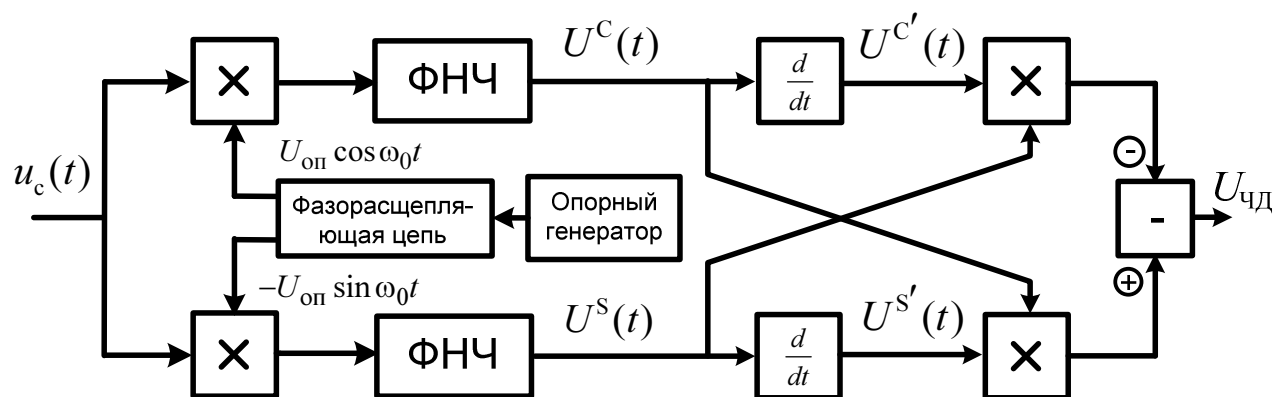


Рис. 6.30. Структурная схема ЧД с квадратурными каналами

### Контрольные вопросы

1. Как, используя эквивалентную схему последовательного диодного АД, объяснить принцип его действия?
2. Почему на выходе параллельного диодного АД необходимо ставить фильтр низких частот?
3. Какой вид имеет типичная детекторная характеристика и зависимость коэффициента передачи АД от амплитуды сигнала? Почему

при уменьшении амплитуды сигнала коэффициент передачи АД стремится к 0?

4. Какими причинами вызываются нелинейные искажения демодулированного колебания в последовательном диодном АД?

5. Почему для уменьшения нелинейных искажений, обусловленных инерционностью нагрузки, целесообразно уменьшать ёмкость конденсатора  $C$ , а не сопротивление резистора  $R$ ?

6. Почему в синхронном АД необходимо обеспечить синфазность опорного колебания и несущей демодулируемого сигнала?

7. По какой схеме строится АД с квадратурными каналами? В чём основное преимущество АД с квадратурными каналами по сравнению с синхронным АД?

8. Как, используя векторную диаграмму, объяснить принцип действия балансного ФД векторомерного типа?

9. При каком условии характеристика ФД векторомерного типа не зависит от амплитуды опорного колебания и определяется выражением  $U_{\text{ФД}}(\Delta\varphi) \approx K_{\text{д}} U_{\text{с}} \cos \Delta\varphi$ ?

10. Какой фазовый сдвиг нужно ввести в опорное колебание ФД векторомерного типа для того, чтобы его можно было использовать в качестве фазового дискриминатора?

11. По какой схеме строится ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами?

12. Какая величина называется крутизной характеристики ЧД?

13. Что называется апертурой характеристики ЧД?

14. Какой параметр называется переходной частотой ЧД?

15. По какой схеме строится ЧД с преобразованием частотной модуляции в фазовую и демодуляцией ФМ колебания?

16. На каком аналитическом выражении основан принцип действия ЧД с квадратурными каналами?

## Литература

1. Лишак М.Ю., Наумова Ю.Д. Аналоговые демодуляторы радиосигналов: основы теории и моделирование. – М.: Издательство МЭИ, 2016.