

## **Тема 3. Методы линейной обработки аналоговых сигналов и их схемотехническая реализация**

- масштабирующие усилители ИТУН, ИТУТ, ИНУН, ИНУН ;**
- линии задержки;**
- гираторы, аналоговые ключи, активные фильтры;**
- АМ – детекторы и частотные дискриминаторы**



# • Масштабирующие усилители ИТУН, ИТУТ, ИНУН, ИНУТ

- При исследовании цепей с трансформаторами, транзисторами, операционными усилителями нельзя построить эквивалентную схему, состоящую из RLC. Для построения эквивалентных схем вводят управляемые источники.

- Бесконечно большое входное сопротивление и бесконечно малое выходное

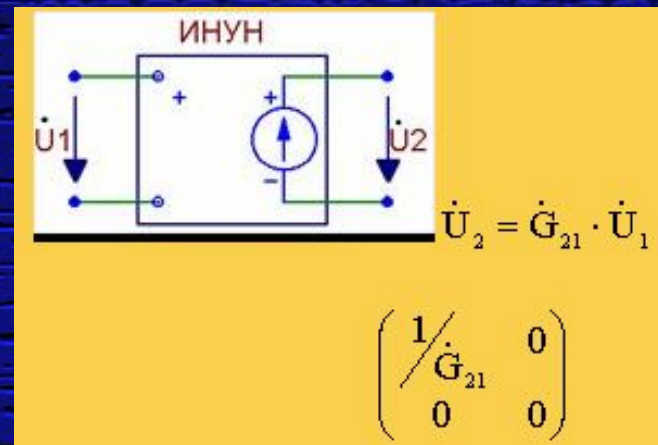


Рисунок - Источник напряжения управляемый напряжением

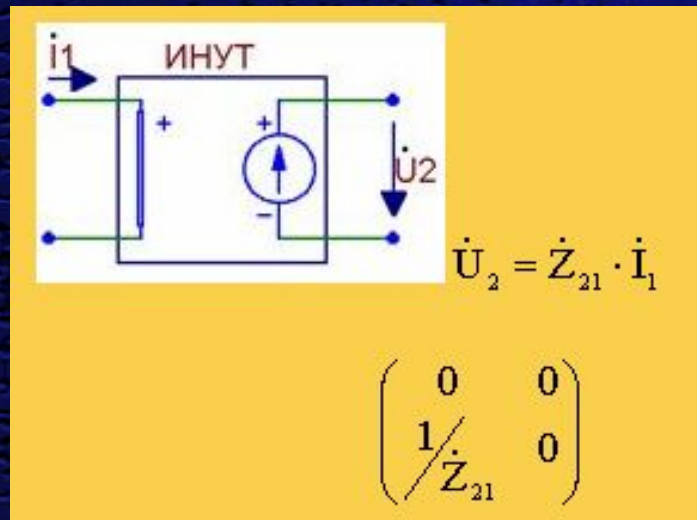


Рисунок - Источник напряжения управляемый током

- бесконечно малые входное и выходное сопротивления



□ бесконечно большие входное и выходное сопротивления; минус, потому что принято другое направление тока  $I_2$

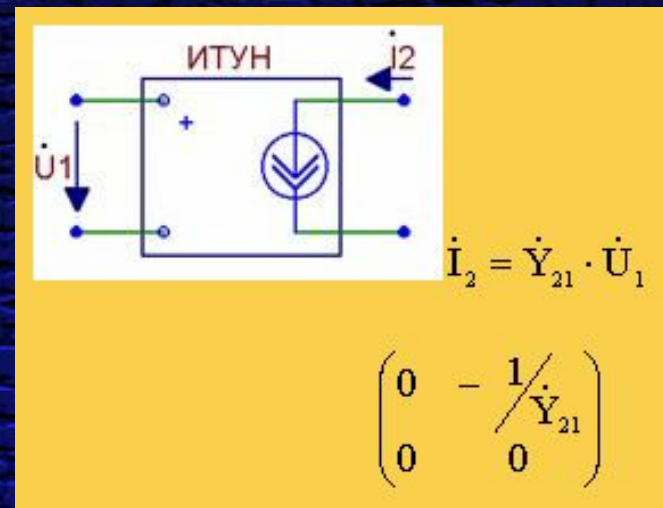


Рисунок - Источник тока управляемый напряжением

□ бесконечно малое входное сопротивление и бесконечно большое выходное

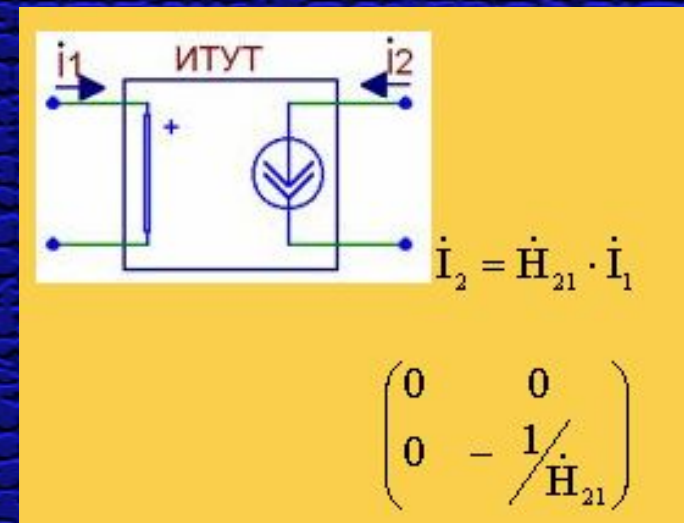


Рисунок - Источник тока управляемый током



- Используя вышеперечисленные источники построим схему замещения идеального трансформатора тока (работает только в одну сторону).

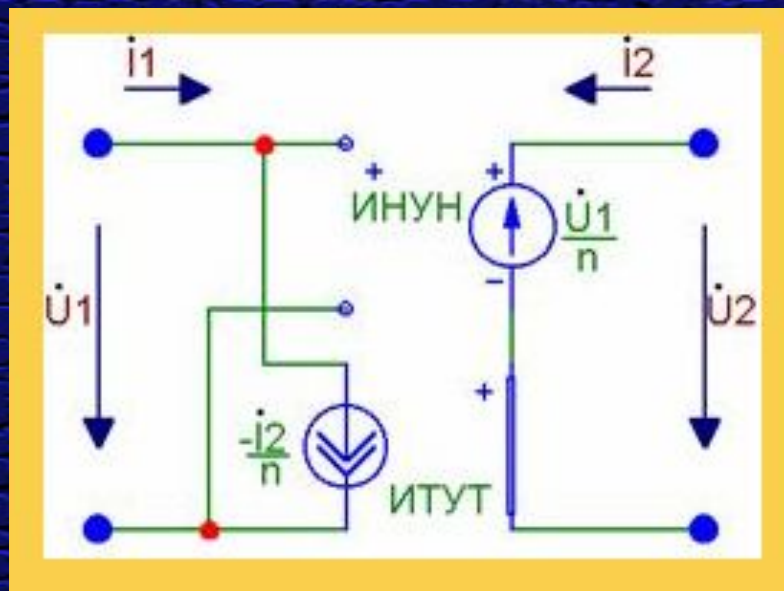


Рисунок - Схема замещения идеального трансформатора



# • *Линии задержки*

- *Задержки цифровых сигналов требуются прежде всего для временного согласования распространения сигналов по различным путям в ЦУ с целью борьбы с критическими временными состояниями, нарушающими работоспособность автоматов с памятью.*
- *Вариант технической реализации элементов задержки зависит от требуемых значений параметров задержки сигналов, а именно: величины, стабильности, регулируемости и т. д.*

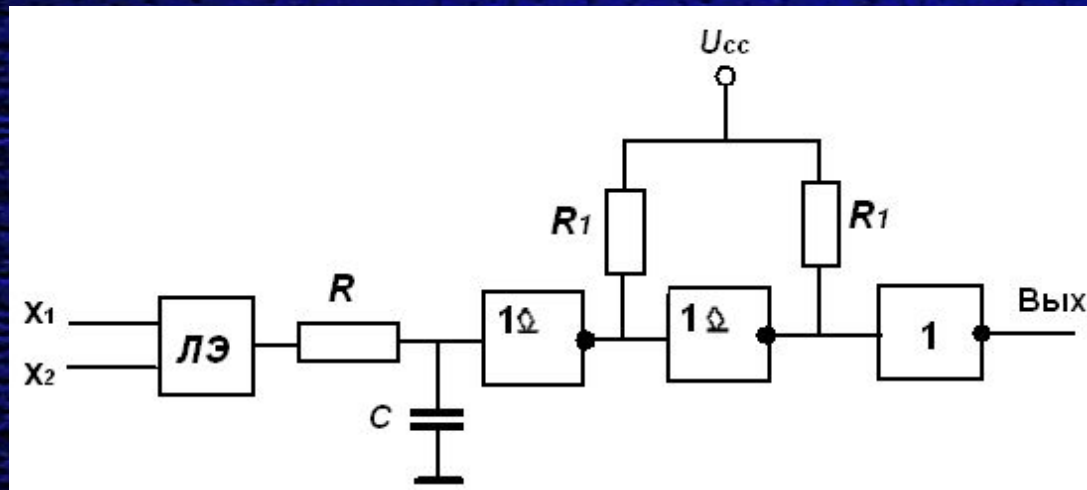
*На практике применяют следующие различные варианты реализации задержек:*

- *отрезки обычных или специальных коаксиальных кабелей;*
- *цепочки логических элементов;*
- *искусственные электромагнитные линии задержки;*
- *RC-цепочки;*
- *одновибраторы;*
- *схемы деления частоты тактовых сигналов.*



## □ RC-цепочки

- Задержку на большее время можно получить с помощью RC-цепочки, включаемой в цепь передачи сигнала, где она формирует экспоненциальные процессы перезаряда емкости через резистор  $R$  с постоянной времени  $RC$ . Если считать пороговым напряжением середину логического перепада, то время задержки  $t_c = RC \cdot \ln 2 = 0,7RC$  (индекс  $d$  происходит от англ. *delay*, что означает задержку). После RC-цепочки в схеме включены три инвертора для формирования достаточно крутых фронтов на выходе элемента задержки.





# **•Активные фильтры**

- Фильтры используют для получения схем с заданными частотными характеристиками. Существует четыре основных типа фильтров.**
- Фильтры нижних частот**
- Фильтры верхних частот**
- Полосовые фильтры**
- Режекторные фильтры**



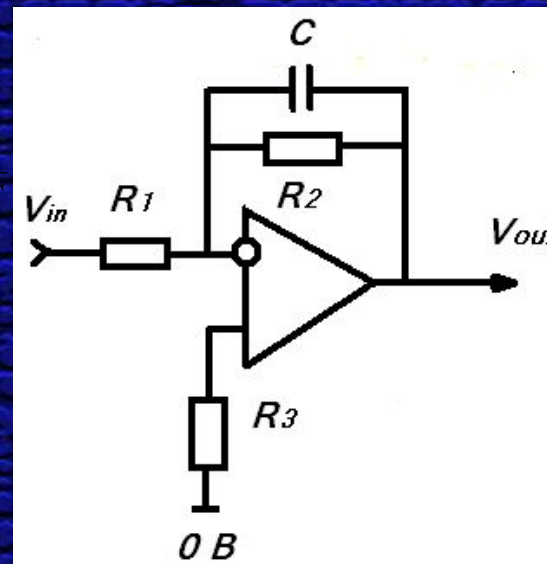
# • Фильтры низких частот

- **Фильтр низких частот** препятствует пропусканию сигналов, частота которых выше некоторого заданного значения. Типичная область применения фильтров низких частот - устранение высокочастотного шума в звуковых схемах, в этом случае такие фильтры называют шумопоглощающими.

**Частота спада  
АЧХ:**

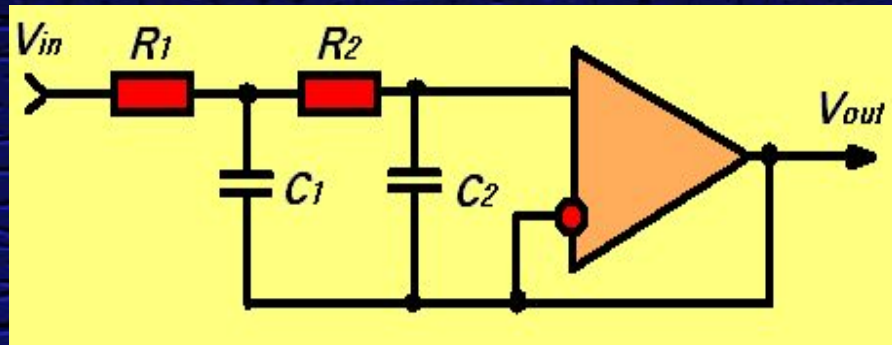
$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$



**а) простой фильтр низких частот**





б) классическая схема фильтра НЧ.

- Для критического ослабления:  $R_1=R_2=R$ ,  $C_2=C$ ,  $C_1=2C$

- Частота среза –

$$f_c = \frac{1}{2\pi R \sqrt{C_1 C_2}}$$

- Если  $C_1 > 2C_2$ , то частотная характеристика схемы имеет резонансный пик.

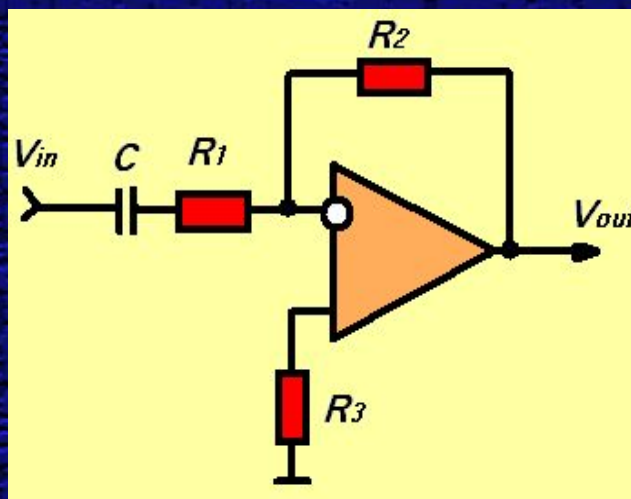


# • Фильтры верхних частот

- **Фильтры верхних частот** пропускают только те сигналы, частота которых выше некоторого заданного значения. Такие фильтры используются в звуковых схемах для устранения низкочастотного шума, вызываемого, к примеру, работой лентопротяжного механизма.

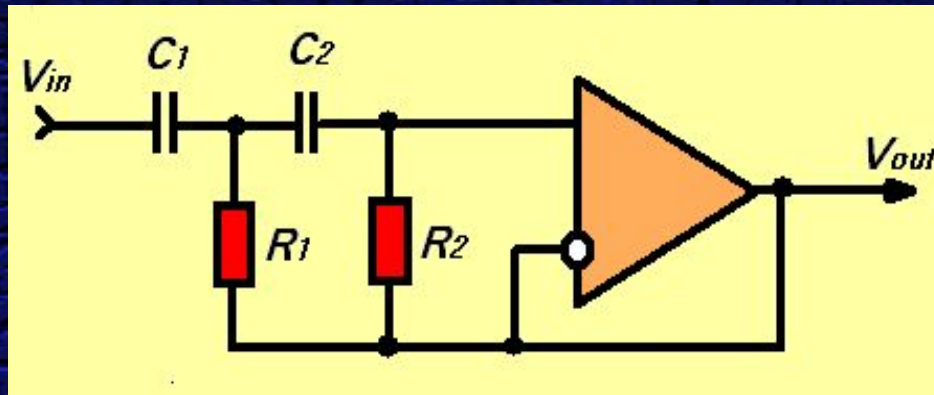
Частота спада АЧХ :

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$



в) простой фильтр ВЧ





**г) классическая схема фильтра ВЧ**

- Для критического ослабления:  **$C1=C2=C, R1=R, R2=2R,$**

- Частота среза:

$$f_c = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_1 R_2}}$$

- Если  $R2 > 2R1$ , то частотная характеристика схемы имеет резонансный пик.



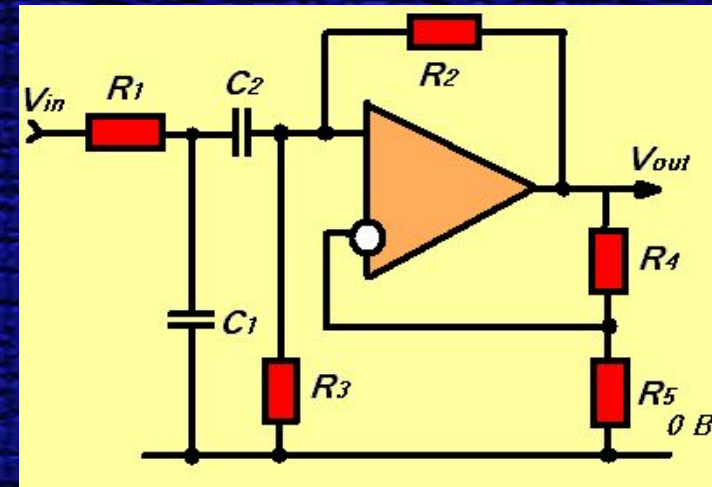
# • Полосовые фильтры

- Полосовые фильтры пропускают только частоты определенного диапазона, а режекторные фильтры (фильтр-пробка) препятствуют прохождению сигналов из определенного диапазона частот.

- Центральная частота :

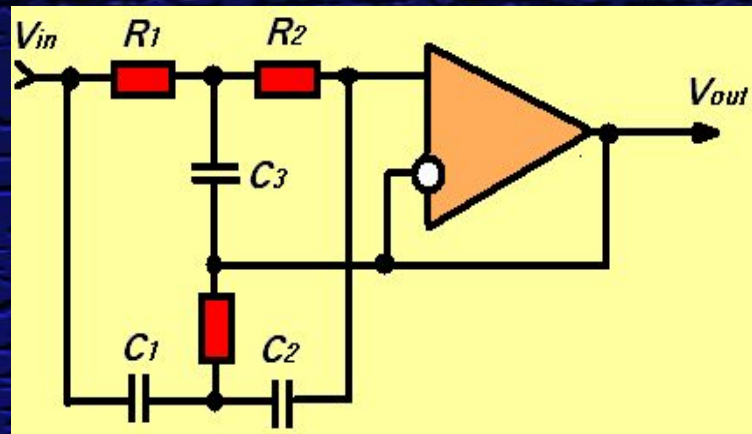
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad Q = \frac{R_5}{2R_5 \cdot R_4}$$

Если  $R_1=R_2=R$ ,  $R_3=2R$  и  $C_1=C_2=C$



д) полосовой фильтр





е) режекторный фильтр

- Центральная частота:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

Если  $R1=R2=R$ ,  $R3=R/2$  и  $C1=C2=C$ ,  $C3=2C$

Например, режекторный фильтр частотой 45...55 Гц широко используется в контрольно-измерительной аппаратуре для блокировки сетевых шумов частотой около 50 Гц.



# • Гираторы

- Гиратор – это активный индукторный фильтр – пробка, иногда называемый также узкополосным режекторным фильтром с синтезированной катушкой индуктивности.

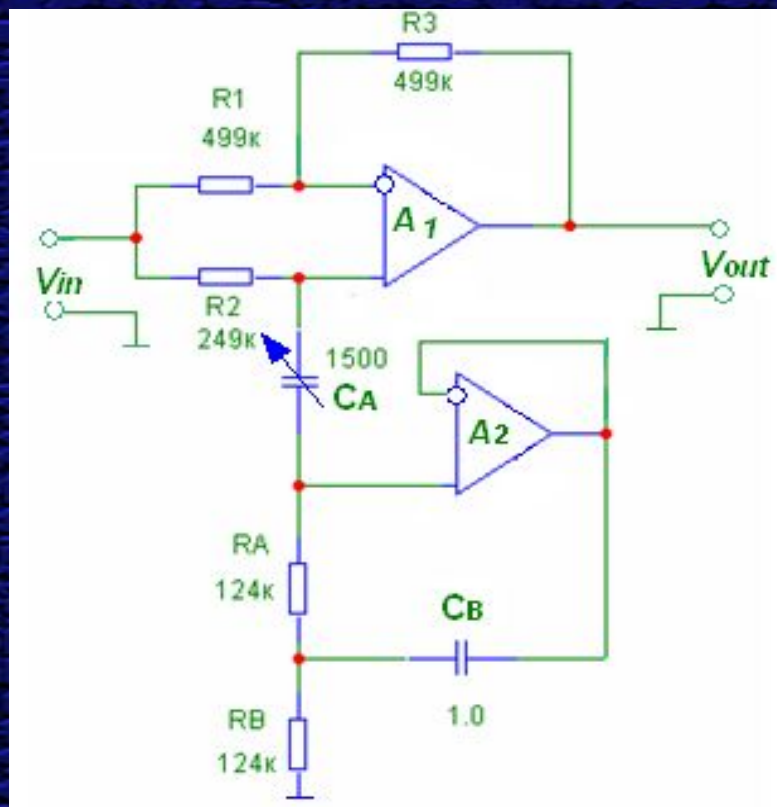


Рисунок. Гиратор (активный индукторный фильтр-пробка)



- Частота режекции определяется выражением:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_A R_B C_A C_B}}$$

- Если выполняется условие:

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_2}{R_A + R_B} = \frac{R_2}{2R}$$

- То это выражение можно упростить следующим образом:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R \sqrt{C_A C_B}}$$

- Для настройки фильтра можно заменить любой из компонентов  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $R_A$ ,  $R_B$  соответствующим переменным конденсатором или резистором. Обычно конденсатор  $C_A$  заменяют переменным конденсатором, а конденсатор  $C_B$  является постоянным конденсатором большой емкости.



- **Частота среза — это точки на АЧХ, в ко торой амплитуда сигнала уменьшается на 3 дБ, а вовсе не значение частоты, выше (или ниже) которой задерживаются все частоты.**



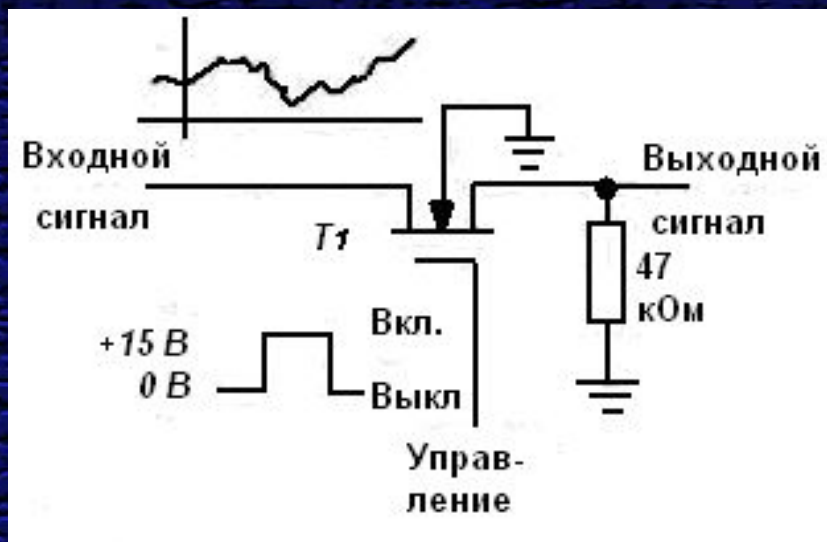
## • Аналоговые ключи

### • Аналоговые ключи на ПТ (полевых транзисторах):

- Очень часто ПТ, в основном МОП-транзисторы, применяются в качестве аналоговых ключей. В силу таких свойств, как малое сопротивление в проводящем состоянии («ВКЛ») при любом напряжении сигнала вплоть до 0 В, крайне высокое сопротивление в состоянии отсечки («ВЫКЛ»), малые токи утечки и малая емкость, они являются идеальными ключами, управляемыми напряжением, для аналоговых сигналов. Идеальный аналоговый (или линейный) ключ ведет себя как совершенный механический выключатель: во включенном состоянии пропускает сигнал к нагрузке без ослаблений или нелинейных искажений, в выключенном - ведет себя как разомкнутая цепь. Он имеет пренебрежимо малую емкость относительно земли и вносит ничтожно малые наводки в сигнал от переключающего его уровня, приложенного к управляющему входу.



- **Рассмотрим пример :**



*T1-канальный МОП-транзистор обогащенного типа, не проводящий ток при заземленном затворе или при отрицательном напряжении затвора. В этом состоянии сопротивление сток-исток ( $R_{\text{выкл}}$ ), как правило, больше 10000 МОм, и сигнал не проходит через ключ (хотя на высоких частотах будут некоторые наводки через емкость сток-исток;). Подача на затвор напряжения + 15 В приводит канал сток-исток в проводящее состояние с типичным сопротивлением от 25 до 100 Ом ( $R_{\text{вкл}}$ ) для ПТ, используемых в качестве аналоговых ключей.*



- Заметим, что ключ на ПТ-двунаправленное устройство, т. е. он может пропускать сигнал в обе стороны. Это легко понять, так как механический выключатель тоже обладает этим свойством.
- Приведенная схема будет работать при положительных сигналах, не выше 10 В; при более высоком уровне сигнала напряжение на затворе будет недостаточным, чтобы удержать ПТ в состоянии проводимости (Квкл начинает расти); отрицательные сигналы вызовут включение ПТ при заземленном затворе (при этом появится прямое смещение перехода канал-подложка; ).
- Если надо переключать сигналы обеих полярностей (т.е. в диапазоне от  $-10$  до  $+10$  В), то можно применить такую же схему, но с затвором, управляемым напряжением  $-15$  В (ВЫКЛ) и  $+15$  В (ВКЛ); подложка должна быть подсоединена к напряжению  $-15$  В.



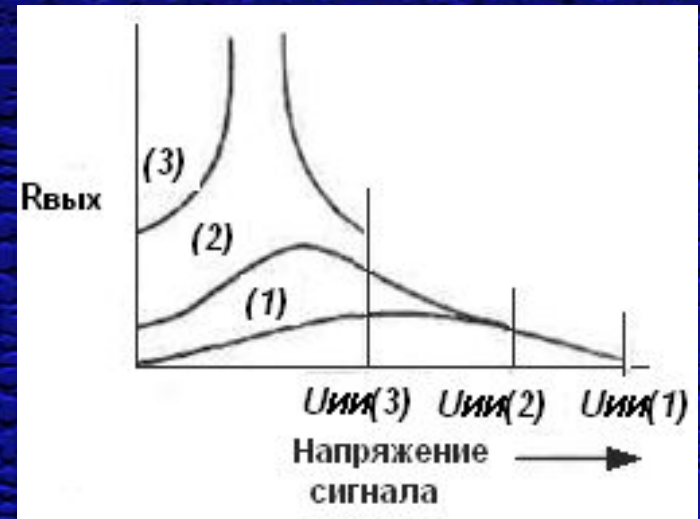
- Для любого ПТ-ключа сопротивление нагрузки должно быть в диапазоне от 1 до 100 кОм, чтобы предотвратить емкостное прохождение входного сигнала в состоянии «ВЫКЛ», которое имело бы место при большем сопротивлении. Сопротивление нагрузки выбирается компромиссным. Малое сопротивление уменьшит емкостную утечку, но вызовет ослабление входного сигнала из-за делителя напряжения, образованного сопротивлением проводящего ПТ  $R_{вкл}$  и сопротивлением нагрузки. Так как  $R_{вкл}$  меняется с изменением входного сигнала (при изменении  $U_{зи}$ ), это ослабление приведет к некоторой нежелательной нелинейности. Слишком низкое сопротивление нагрузки проявляется также и на входе ключа, нагружая источник входного сигнала.



## Сопротивление в открытом (включенном) состоянии.

- Ключи КМОП, работающие от относительно высокого напряжения питания (скажем, 15 В), будут иметь малые значения  $R_{вкл}$  во всем диапазоне значений сигнала, так как всегда тот или другой проводящий транзистор будет иметь прямое смещение затвора, равное по крайней мере половине напряжения питания. Но при меньшем напряжении питания сопротивление ключа  $R_{вкл}$  будет расти, и максимум его имеет место при уровне сигнала, среднем между напряжением питания и землей (или между двумя напряжениями питания при двуполярном питании) (рис. ).

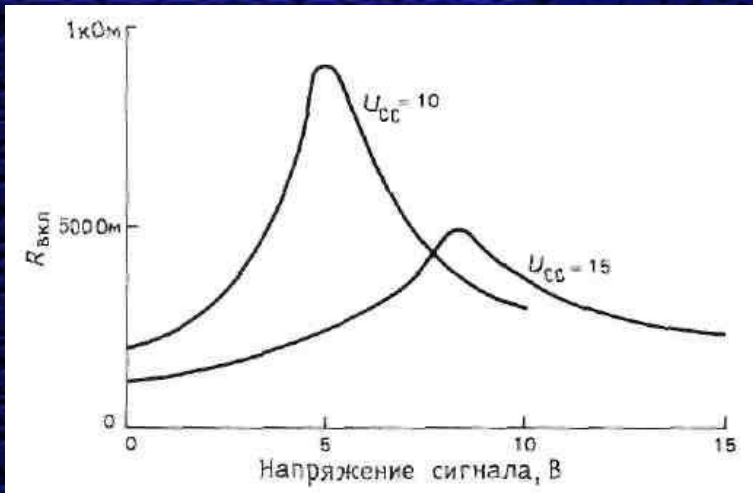
- При уменьшении  $U_{сс}$  сопротивление ПТ во включенном состоянии становится значительно выше (особенно вблизи точки  $U_{из} = U_{сс}/2$ ), так как для ПТ обогащенного типа  $U_p$  составляет по крайней мере несколько вольт и для достижения малых значений  $R_{вкл}$  требуется напряжение затвор-исток не меньше чем 5-10 В.



- Кроме того, что параллельное сопротивление двух ПТ растет при уровне сигнала, среднем между напряжением питания и землей, этот пик (при  $0,5 U_{сс}$ ) будет увеличиваться по мере уменьшения  $U_{сс}$ , и при достаточно низком  $U_{сс}$  ключ для сигналов с уровнем около  $0,5 U_{сс}$  будет представлять разомкнутую цепь.

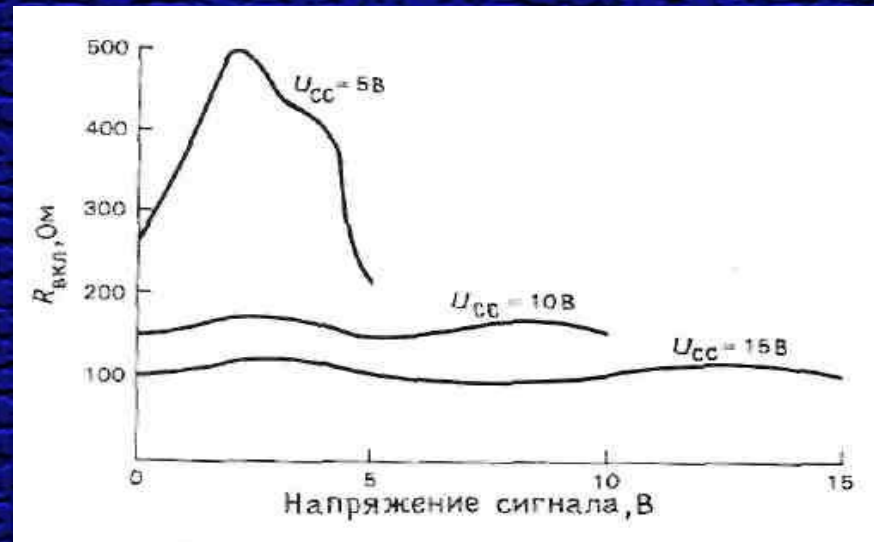


- Имеются различные приемы, которые разработчики ИМС аналоговых ключей применяют, чтобы сохранить значение  $R_{вкл}$  малым и примерно постоянным (для малых искажений) во всем диапазоне измерения сигналов.
- Например, в первоначально выпускавшемся аналоговом ключе 4016 использовалась простая схема, дающая графики  $R_{вкл}$  подобные тем, что показаны на рисунке:



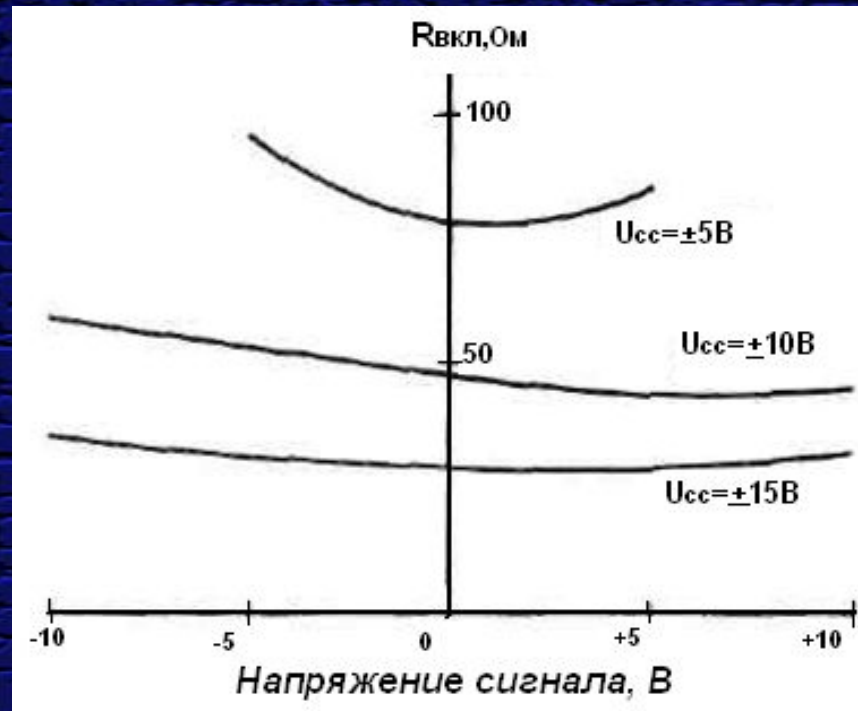
*Рис. Сопротивление включенного (замкнутого) канала аналогового КМОП-ключа типа 4016*

- В улучшенном ключе 4066 разработчики добавили несколько ПТ таким образом, что напряжение  $n$ -канальной подложки следует за напряжением сигнала, давая в результате кривые  $R_{вкл}$ , показанные на рис. «Вулканообразная» форма этих кривых с понижением  $R_{вкл}$  в центре заменила «Эверест» на графиках для 4016.





- Усложненные ключи, такие как 1Н5140 (или AD7510), предназначенные для серьезных применений, дают еще лучший результат, представленный в виде кривых  $K_{ш}$  на рисунке



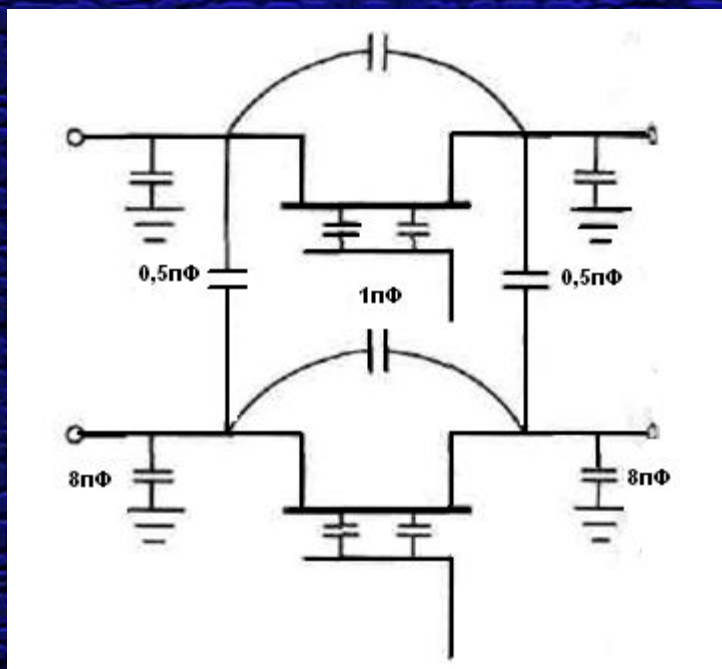
*Рис. Сопротивление замкнутого аналогового ключа из семейства 1Н5140, позволяющего переключать сигнал обеих полярностей; обратите внимание на масштаб вертикальной оси.*



# •Емкость

ПТ-ключи обладают следующими емкостями:

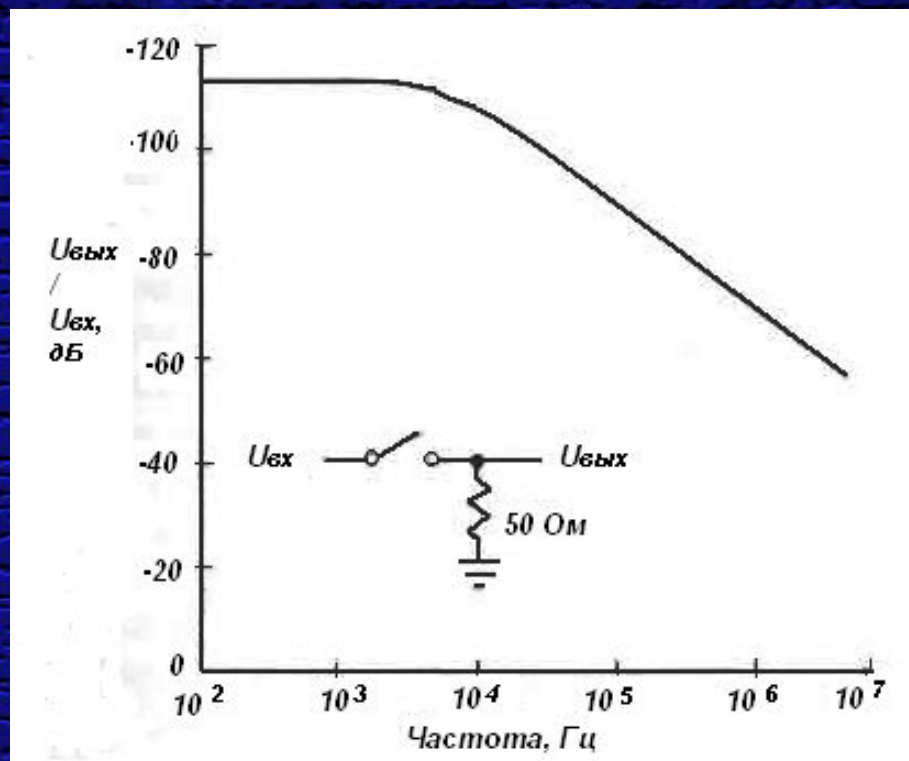
- между входом и выходом ( $C_{cu}$ ),
- между каналом и землей ( $C_s, C_u$ ),
- между затвором и каналом и между двумя ПТ в пределах одного кристалла ( $C_{ss}, C_{uu}$ );





- Рассмотрим, какие эффекты они вызывают.
- **Сси (емкость вход-выход)**. Наличие этой емкости приводит к прохождению сигнала через разомкнутый ключ, которое на высоких частотах возрастает. На рисунке показан этот эффект для ключей серии 1Н5140. Обратите внимание на использование 50-омной нагрузки - сопротивления, обычного для радиосхем, но много меньше нормального для низкочастотных сигналов, где типичное значение полного сопротивления нагрузки составляет 10 кОм и более.

• Даже при нагрузке 50 Ом сквозное прохождение сигнала на высоких частотах становится значительным (на частоте 30 МГц емкость 1 пФ имеет полное сопротивление 5 кОм, что вызывает сквозное прохождение —40 дБ). И разумеется, имеется значительное ослабление (и нелинейность в передаче) сигнала при работе на 50-омную нагрузку, поскольку типичное значение  $R_{вкл}$  составляет 30 Ом (75 Ом в худшем случае). При нагрузке 10 кОм ситуация со сквозной передачей сигнала, конечно же, намного хуже.





- **СС, Ск (емкость относительно земли).** Шунтирующая на землю емкость приводит к упомянутому ранее спаду частотной характеристики. Ситуация усугубляется при высокоомном источнике сигналов, однако даже при фиксированном сопротивлении источника сопротивление ключа  $R_{вкл}$  в сочетании с шунтирующей емкостью на выходе образует фильтр нижних частот.
- **Емкость затвор-канал.** Емкость между управляющим затвором и каналом вызывает еще один эффект, а именно наводку неприятных (даже когда они малы) переходных помех на цепь сигнала при замыкании или размыкании ключа
- **Ссс, СИИ (емкость между ключами).** Если разместить несколько ключей на одном кристалле кремния размером с кукурузное зерно, то не следует удивляться, заметив наводки между каналами («перекрестные помехи»). Виновницей, разумеется, является емкость между каналами ключей. Эффект усиливается по мере роста частоты и увеличения полного сопротивления источника сигнала, к которому подключен канал.
- **Динамические помехи.** Во время переходных процессов от включенного состояния к выключенному и обратно в аналоговых ПТ-ключах могут возникать неприятные эффекты. Скачок управляющего сигнала, поданный на затвор(ы), может создавать емкостную наводку в канале (каналах) и исказить коммутируемый сигнал до неузнаваемости. Это наиболее серьезно при уровнях сигнала, соответствующих высокому сопротивлению ключа. Подобные эффекты возникают и в мультиплексорах (типа 4066) во время изменения адреса канала; кроме того, в мультиплексоре возможно кратковременное соединение входов через открытые ключи, если задержка выключения канала превосходит задержку включения.



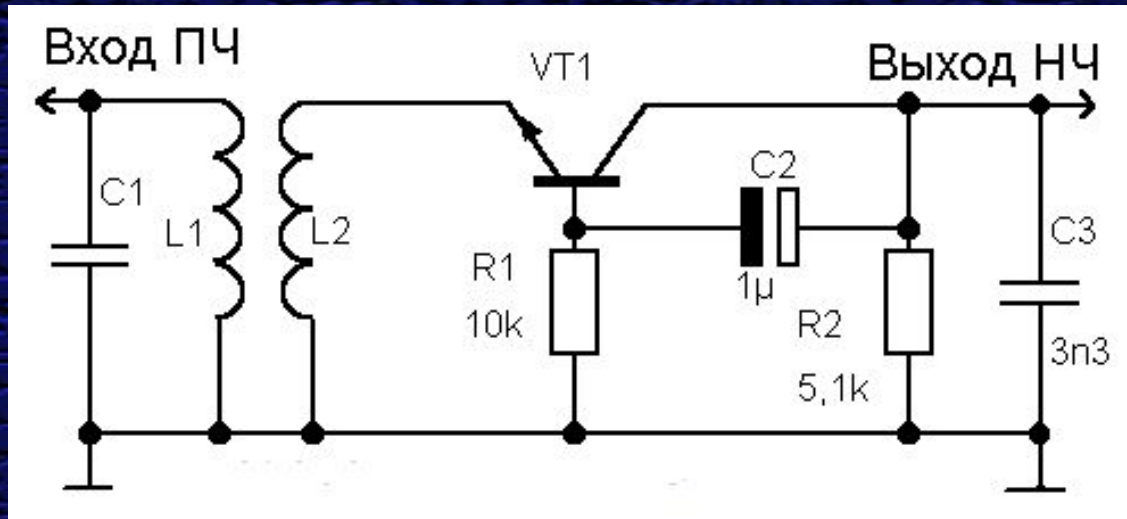
- **АМ – детекторы и частотные дискриминаторы**

- Амплитудный детектор:

*В большинстве простых АМ приемников функции демодулятора выполняет обычный диодный детектор, создающий значительные нелинейные искажения, быстро растущие при увеличении глубины модуляции ( $m$ ), и достигающие 10% при  $m = 0,5$  и 25 % при  $m = 1$ ). Поэтому говорить о сколько-нибудь приемлемом качестве звучания (особенно на пиках сигнала) просто несерьезно. Это кстати, одна из причин почему в АМ передатчиках вынужденно ограничивают глубину модуляции.*

- *Существенно более линейны активные детекторы: на эмиттере повторителя, на операционном усилителе, синхронные детекторы, однако они достаточно сложны и мало пригодны для доработки имеющихся радиовещательных приемников.*





- Элементы  $C1$ ,  $L1$  и  $L2$  (выходной контур усилителя промежуточной частоты приемника) и  $R2C3$  (нагрузка детектора) уже имеются в обычном диодном детекторе. И для реализации приведенной схемы необходимо (удалив старый диод) добавить всего три элемента  $VT1$ ,  $R1$ ,  $C2$ .



## Работа схемы

- Функции детектора элемента выполняет транзистор VT1. По промежуточной частоте его база соединена с коллектором через конденсатор C2. Иными словами, по этой частоте описываемый детектор полностью эквивалентен диодному: промежуточная частота "видит" перед собой транзистор в диодном включении с замкнутым (по высокой частоте) переходом коллектор-база. Постоянная составляющая тока детектора обеспечивает работу транзистора VT1 в активном режиме на низкой частоте. То есть по НЧ это уже **усилительный каскад** (как это ни странно звучит).
- Причем каскад охвачен 100% отрицательной обратной связью. Напряжение обратной связи снимается с коллектора транзистора VT1 и через конденсатор C2 подается на его базу. Отрицательная обратная связь и обеспечивает значительное снижение искажений

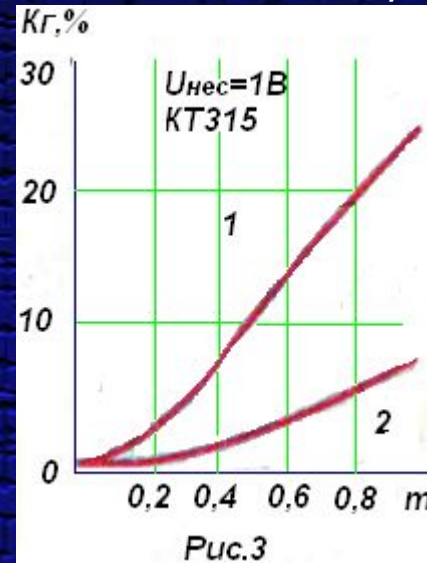
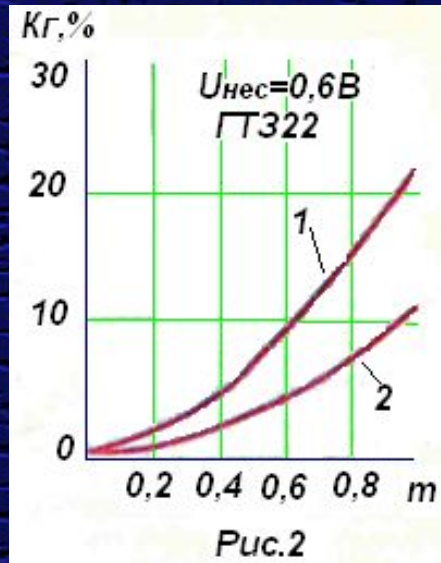


## Как же физически происходит это снижение?

- Для того, чтобы открыть переход база-эмиттер транзистора надо, чтобы мгновенное напряжение превысило бы порог 0,7 В (для кремниевых транзисторов).
- Рассмотрим отдельно напряжения на эмиттере и базе VT1 как сумму  $U_{пч}$ ,  $U_{нч}$  и постоянной составляющей. На эмиттере присутствует только  $U_{пч}$ , а на базе сумма  $U_{нч}$  и постоянной составляющей (по промежуточной частоте база заблокирована на корпус через C2 и C3).
- Фокус состоит в том, что на отрицательным полупериодах НЧ сигнала (то есть при минимальном значении амплитуды промежуточной частоты) выходное НЧ напряжение (отрицательное), подаваясь на базу VT1 снижает порог открывания VT1
- В таком состоянии чтобы VT1 открылся на его эмиттере достаточно уже не 0,7 В, а в несколько раз меньше. Иными словами напряжение открывания диода база-эмиттер VT1 не стоит неподвижно на 0,7 В (как у простого диода), а адаптивно меняется в соответствии с низкочастотной огибающей.



- К чему это приводит показано на рисунках 2 и 3, где приведены экспериментальные зависимости коэффициентов гармоник ( $K_g$ ) выходного НЧ сигнала от глубины модуляции ( $m$ ) для предлагаемого детектора (кривые 2) и обычного диодного детектора (кривые 1), полученного при исключении из схемы элементов  $R1C2$  и соединении базы и коллектора транзистора  $VT1$ .



- Зависимости, приведенные на рисунке 2, получены при использовании германиевого транзистора и амплитуде несущей на эмиттере  $VT1$  равной  $0,6 В$ , а на рисунке 3 — при использовании кремниевого транзистора и амплитуде несущей  $1 В$ . Из приведенных графиков видно, что применение такого детектора позволяет снизить коэффициент гармоник более чем втрое, причем при глубине модуляции менее  $0,5$  коэффициент гармоник снижается впятеро и не превышает  $2 \%$ .



# Частотный дискриминатор

- Во многих практических задачах необходимо синхронизировать по частоте и (или) по фазе последовательности импульсов. Для этих целей целесообразно применять частотные и фазовые дискриминаторы.
- Частотный дискриминатор вырабатывает сигнал при отклонении частоты импульсов от заданной, определяемой напряжением генератора постоянного напряжения. Если частота входных импульсов будет достаточно велика, то частотный дискриминатор будет выдавать максимальное по модулю отрицательное напряжение; если же частота входных импульсов будет достаточно низка, то он будет выдавать максимальное положительное напряжение; в противном случае будет осуществлено линейное преобразование разности частот.



- На Рис.4 и Рис.5 показаны диаграммы работы схемы Рис.6. На  $V_{x1}$  и  $V_{x2}$  подаются сигналы постоянного напряжения (а, пунктир) и импульсная последовательность, формирующая пилообразный сигнал (а) на входе ОУ, соответственно. Частота входной последовательности и "пилы" равны. Максимальное значение пилы зависит от ее частоты; чем больше частота, тем меньше амплитуда. На выходе ОУ сигнал (б). На выходе схемы сигнал (в).

