

Усилители постоянного тока

1. Почему в УПТ получили широкое распространение дифференциальные каскады?
2. Какова максимально достижимая величина коэффициента усиления по напряжению у дифференциального усилителя?
3. Есть ли ОС в дифференциальном усилителе, и, если да, то какие и чем они определяются?
4. С какой целью в УПТ используют цепь сдвига уровня напряжения?
5. Что предусмотрено в ДУ для снижения дрейфа нуля? Влияет ли это на коэффициент усиления по напряжению?
6. Что такое ГСТ? Для чего это устройство применяют в УПТ?
7. Что такое "токовое зеркало"? Где оно находит применение?
8. Каким образом у УПТ можно обеспечить высокое входное сопротивление?
9. Какова максимально возможная амплитуда выходного сигнала в УПТ с дифференциальным входным каскадом?
10. Как обеспечивается нулевой уровень выходного сигнала на выходе УПТ при нулевом уровне входного сигнала?
11. Можно ли использовать ДУ в качестве фазоинвертора? Если да, то как и какова его усилительная способность (K_{uo}) по каждому каналу?

Стабилизаторы напряжения

12. Какие требования предъявляются к транзисторам РЭ в стабилизаторах с импульсивным регулированием?
13. Может ли в стабилизаторе выходное напряжение превышать входное? Показать с использованием принципиальной электрической схемы?
14. Почему в стабилизаторах напряжения РЭ выполняется на составных транзисторах?
15. Каким образом компенсационный стабилизатор напряжения защищается от перегрузок по току?
16. Как влияют свойства РЭ стабилизатора с импульсным регулированием на КПД стабилизатора?
17. Каким образом регулируется выходное напряжение в компенсационных стабилизаторах напряжения?
18. Что нужно предпринять с целью увеличения коэффициента стабилизации стабилизатора?

Генераторы

19. Для генератора синусоидальных колебаний сформулировать условно баланса фаз и амплитуд и привести пример принципиальной схемы.
20. Как стабилизировать частоту генерируемых колебаний в генераторах?
21. Как в генераторе прямоугольных импульсов можно управлять длительностью полупериодов выходного сигнала? Привести примеры схем?

Простейший ключ

22. Что такое глубина насыщения транзистора в ключе и на какие его свойства и как она оказывает влияние?
23. Как уменьшить задержку включения ключа?
24. Каким образом можно предотвратить глубокое насыщение транзистора в ключе и какова цена достижения этого результата?
25. Чем определяется скорость выхода из насыщения транзистора в простейшем биполярном ключе?
26. Каким образом в ключе на биполярном транзисторе можно уменьшить длительность фронта выходного сигнала?
27. Каким образом в ключе на биполярном транзисторе можно управлять длительностью среза выходного сигнала?

Почему в УПТ получили широкое распространение дифференциальные каскады?

Усилителями постоянного тока называют такие устройства, которые могут усиливать медленно изменяющиеся электрические сигналы. Они способны усиливать и переменные и постоянные составляющие входного сигнала. Усилители постоянного тока имеют много разновидностей. Т.к. такие устройства пропускают наряду с переменной составляющей еще и постоянную, то отдельные каскады должны быть связаны между собой либо непосредственно, либо через резисторы, но не через разделительные конденсаторы или трансформаторы, которые не пропускают постоянную составляющую.

Основной проблемой УПТ является:

дрейф нуля - отклонение напряжения на выходе усилителя от начального (нулевого) значения при отсутствии входного сигнала. Основной причиной этого явления является температурная и временная нестабильность активных элементов схемы усилителя, резисторов, источников питания.. Любые медленные процессы, связанные с колебаниями температуры, напряжения питания, изменениями параметров всех активных и пассивных элементов схемы усилителя создают низкочастотные флуктуации практически на всех элементах схемы, в результате которых на выходе и появляется какой-то уровень напряжения и его, в дальнейшем, трудно отличить от полезного сигнала.

Одним из возможных путей уменьшения дрейфа нуля является использование **дифференциальных усилителей**.

Дифференциальный усилительный каскад имеет два входа и усиливает разность напряжений, приложенных к ним. Если на оба входа подать одинаковое (синфазное) напряжение, то усиление будет чрезвычайно мало. Т.о., дифкаскад не усиливает синфазный сигнал. Дифференциальный каскад состоит из двух транзисторов, эмиттеры которых соединены и подключены к общему резистору. Таким образом, дифференциальные усилители имеют очень низкий дрейф нуля и высокую И степень подавления синфазных помех. Но при этом требуется высокая степень симметрии схемы.

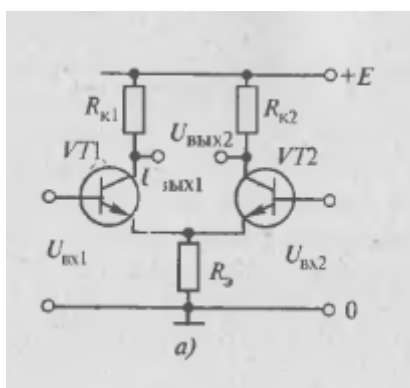


Схема ДУ (в рисунках Иванова клеммы на выходе коллектора VT1 нет)

2. Какова максимально достижимая величина коэффициента усиления по напряжению у дифференциального усилителя?

Дифференциальный усилительный каскад имеет два входа и усиливает разность напряжений, приложенных к ним.

Д. У. – имеет две входные и две выходные шины. Он предназначен для усиления переменного и постоянного сигнала на фоне большого уровня помех.

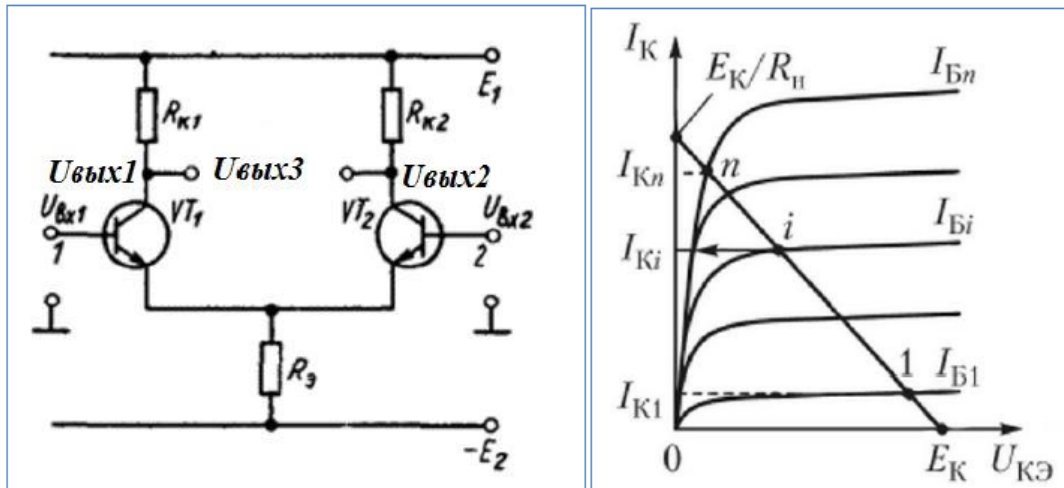


Рис 1а. Классический транзисторный Д.У. Рис 16. Передаточная характеристика

Если дифференциальный усилитель рассматривается как два каскада, выполненных по схеме с общим эмиттером, то для каждого из них можно записать: $K_u = (U_{\text{вых}}/2)/(U_{\text{вх}}/2) = R_k h_{21Э} / (h_{11Э} + h_{21Э} R_E)$. Для современных дифференциальных усилителей это значение может достигать порядка нескольких миллионов.

$$u_{\text{вых1}} = -K * u_{\text{вх1}}$$

$$u_{\text{вых2}} = -K * u_{\text{вх2}}$$

Где $K = K_1 * K_2$ – коэффициент усиления по напряжению каждого плеча.

Результирующее (между выходными клеммами) изменение выходного напряжения будет определяться разностью $u_{\text{вых1}} - u_{\text{вых2}}$

$$u_{\text{вых,диф}} = u_{\text{вых1}} - u_{\text{вых2}} = -K * u_{\text{вх1}} - (-K * u_{\text{вх2}}) = -K * (u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}) = -K * u_{\text{вх,диф}}$$

отсюда следует, что его выходной сигнал $U_{\text{вых,диф}}$ пропорционален разности входных сигналов $U_{\text{вх,диф}} = U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}$;

$$K_{\text{диф}} = \frac{u_{\text{вых,диф}}}{u_{\text{вх,диф}}}$$

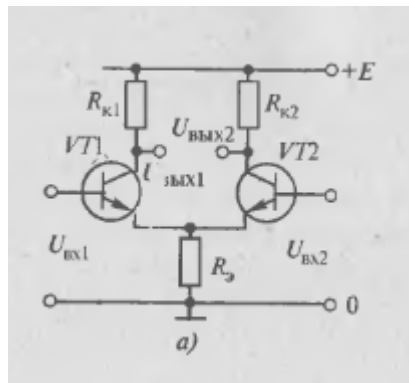
В случае воздействия на входы дифференциального каскада двух симметричных сигналов $U_{\text{вх2}} = -U_{\text{вх1}}$ и идеальной симметрии схемы получаем

$$u_{\text{вых,диф}} = -K u_{\text{вх,диф}} = -K(u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}) = -K[u_{\text{вх1}} - (-u_{\text{вх1}})] = -K * 2u_{\text{вх1}}$$

$$K_{\text{диф}} = \frac{U_{\text{вых,диф}}}{U_{\text{вх,диф}}} = \frac{-K * 2u_{\text{вх1}}}{2u_{\text{вх1}}} = -K = -K_T \frac{R_K}{R_{\text{вх}} \gamma_T} \approx -h_{21Э} \frac{R_K}{R_{\text{вх}} \gamma_T}$$

Отсюда следует, что в случае воздействия на входы симметричного дифференциального каскада двух симметричных сигналов его коэффициент усиления численно равен коэффициенту усиления одного плеча каскада, т.е. коэффициенту усиления обычного резисторного каскада.

3. Есть ли ОС в дифференциальном усилителе, и, если да, то какие и чем они определяются?



ДУ отличается высокой стабильностью работы, малым дрейфом нуля, большим коэффициентом усиления дифференциального сигнала и большим коэффициентом подавления синфазных помех. Любой ДУ выполняется по принципу сбалансированного полностью симметричного моста ($I_1 = I_2$ все параметры транзисторов совпадают).

При анализе работы ДУ принято выделять в нем два плеча, одно из которых состоит из транзистора VT1 и резистора Rk1, второе — из транзистора VT2 и резистора Rk2. Каждое плечо ДУ является каскадом ОЭ. Таким образом, можно заключить, что в состав ДУ входят два каскада ОЭ. В общую цепь эмиттеров транзисторов также включен резистор R_e .

Для корректной работы ДУ необходимо выполнить 2 условия:

- сделать плечи каскада симметричными (для обеспечения одинаковой реакции на одинаковые воздействия и для избежания дрейфа нуля)
- обеспечить наличие ООС для уменьшения коэффициента усиления синфазного сигнала.

Синфазные сигналы - сигналы с равными амплитудами, формами и фазами.

Изменение температуры, паразитные наводки, старение элементов и др. можно рассматривать как синфазные входные воздействия \Rightarrow нужно их подавлять, они вредны для работы любого усилителя.

Как раз таки резистор R_e обеспечивает последовательную ООС по току. Рассмотрим синфазное воздействие: Пусть на оба входа пришло положительное воздействие. Тогда токи через транзисторы увеличатся, \Rightarrow увеличится ток через $R_e \Rightarrow \uparrow \Rightarrow$ увеличится напряжение на эмиттере \Rightarrow транзисторы подзапрутся.

$I_1 = I_2 + \Delta I$; $I_2 = I_1 + \Delta I$. Выгодно ставить как можно больший резистор R_e , но с увеличением R_e приходится сталкиваться с проблемой обеспечения необходимого режима работы транзисторов по постоянному току. Т.е. приходится увеличивать для данных I_1 ; I_2 питание E . Это неразумно, поэтому часто ставят вместо резистора ГСТ.

Если же мы имеем дело с парафазным сигналом, то приращения ΔI и $-\Delta I$ вызовут противоположные приращения токов в плечах, и результирующий ток через резистор R_e , а значит, и напряжение на нём не изменится. Таким образом, ООС играет роль только для синфазного сигнала.

С какой целью в УПТ используют цепь сдвига уровня напряжения?

При построении многокаскадных УПТ емкостная или трансформаторная связь не может быть использована, так как ни конденсаторы, ни трансформаторы не пропускают постоянный ток. Поэтому для соединения отдельных каскадов используют гальваническую (непосредственную) связь. При этом базу транзистора каждого последующего каскада непосредственно соединяют с коллектором предыдущего. Это требование приводит к возникновению определенных трудностей, связанных с необходимостью согласования режимов соседних каскадов по постоянному току. Согласование режимов соседних каскадов может быть выполнено с использованием цепи сдвига уровня напряжения.

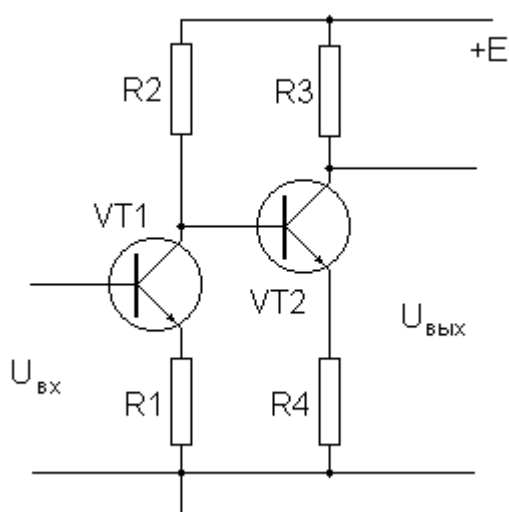
Схемы сдвига постоянного уровня только сдвигают сигнал на фиксированную величину напряжения и не оказывают никаких воздействий на приращение сигнала, вызванное действием входного.

Простейшей схемой сдвига уровня является эмиттерный повторитель, в эмиттерную цепь которого включают последовательно соединенные сопротивление и источник тока. Тогда выходной сигнал снимается с источника тока, а резистор выполняет роль балластного сопротивления, на котором падает избыток напряжения.

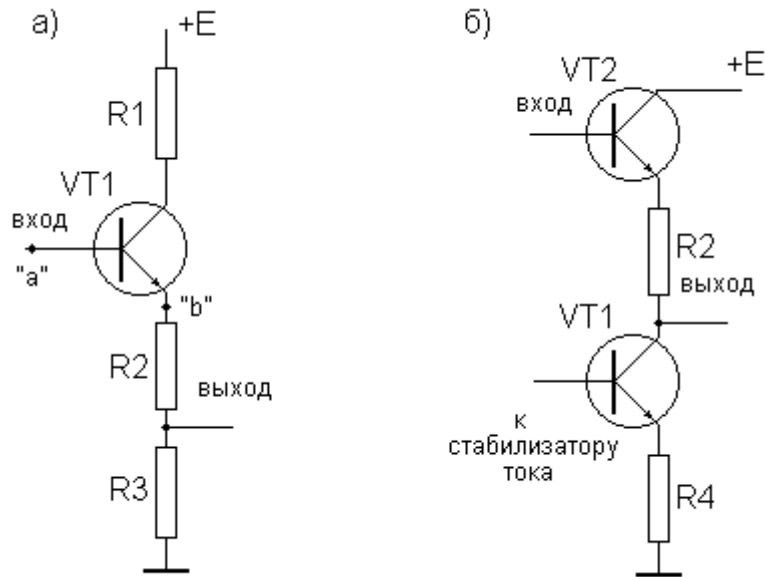
Вариант 2.

При построении усилителя постоянного тока возникает проблема согласования постоянных напряжений между каскадами. Рассмотрим для примера двухкаскадный усилитель постоянного тока (УПТ) (рис. 8). Для работы транзисторов в активном режиме необходимо обеспечить определенные напряжения между базой и эмиттером, эмиттером и коллектором каждого транзистора.

Так как в схеме УПТ отсутствуют переходные емкости, то постоянное напряжение с коллектора транзистора VT1 передается на базу транзистора VT2, и тогда для обеспечения нормального напряжения между базой и эмиттером этого транзистора требуется увеличить R3, а для обеспечения $U_{кэ2}$ нужно уменьшить R4. При этом коэффициент усиления второго каскада падает по сравнению с первым. Чтобы не уменьшался коэффициент усиления второго каскада, используют каскад сдвига уровня, который включается между VT1 и VT2. Каскад сдвига уровня (рис. 9а) представляет из себя эмиттерный повторитель с делителем в цепи эмиттера. Постоянное напряжение в точке «b» практически равно постоянному напряжению в точке «a» (т. к. $U_{ва} \gg 0,3 \text{ В}$ — мало).



двухкаскадный УПТ



каскады сдвига уровней

Следовательно, постоянное напряжение на выходе каскада U_C равно:

$$U_C \approx \frac{R_2}{R_2 + R_3} U_A \quad (9)$$

Выбрав достаточно малое отношение R_3/R_2 , получим снижение напряжения на входе следующего каскада. Чтобы обеспечить большой коэффициент передачи цепочки R_2, R_3 для переменной составляющей напряжения, вместо R_3 ставят иногда транзистор со стабилизированным током коллектора. Выходное сопротивление такого транзистора для переменной составляющей R_{\sim} много больше сопротивления постоянной составляющей R_+ .

Поэтому при малом коэффициенте передачи постоянной составляющей

$$K_+ = \frac{R_+}{R_+ + R_2} < 1$$

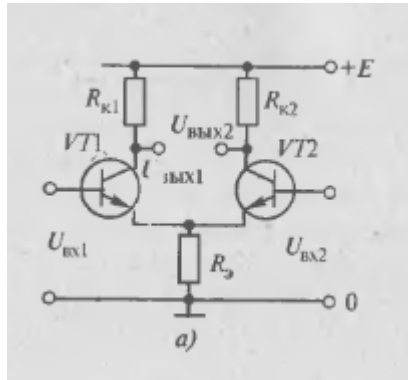
можно добиться практически полной передачи переменной составляющей

$$K_{\sim} = \frac{R_{\sim}}{R_{\sim} + R_+} \approx 1$$

Сопротивление R_4 служит для обеспечения нормального режима работы транзистора VT2.

1) Что предусмотрено в ДУ для снижения дрейфа нуля? Влияет ли это на коэффициент усиления по напряжению?

Принципиальная схема дифференциального усилителя:



ДУ отличается высокой стабильностью работы, малым дрейфом нуля, большим коэффициентом усиления дифференциального сигнала и большим коэффициентом подавления синфазных помех.

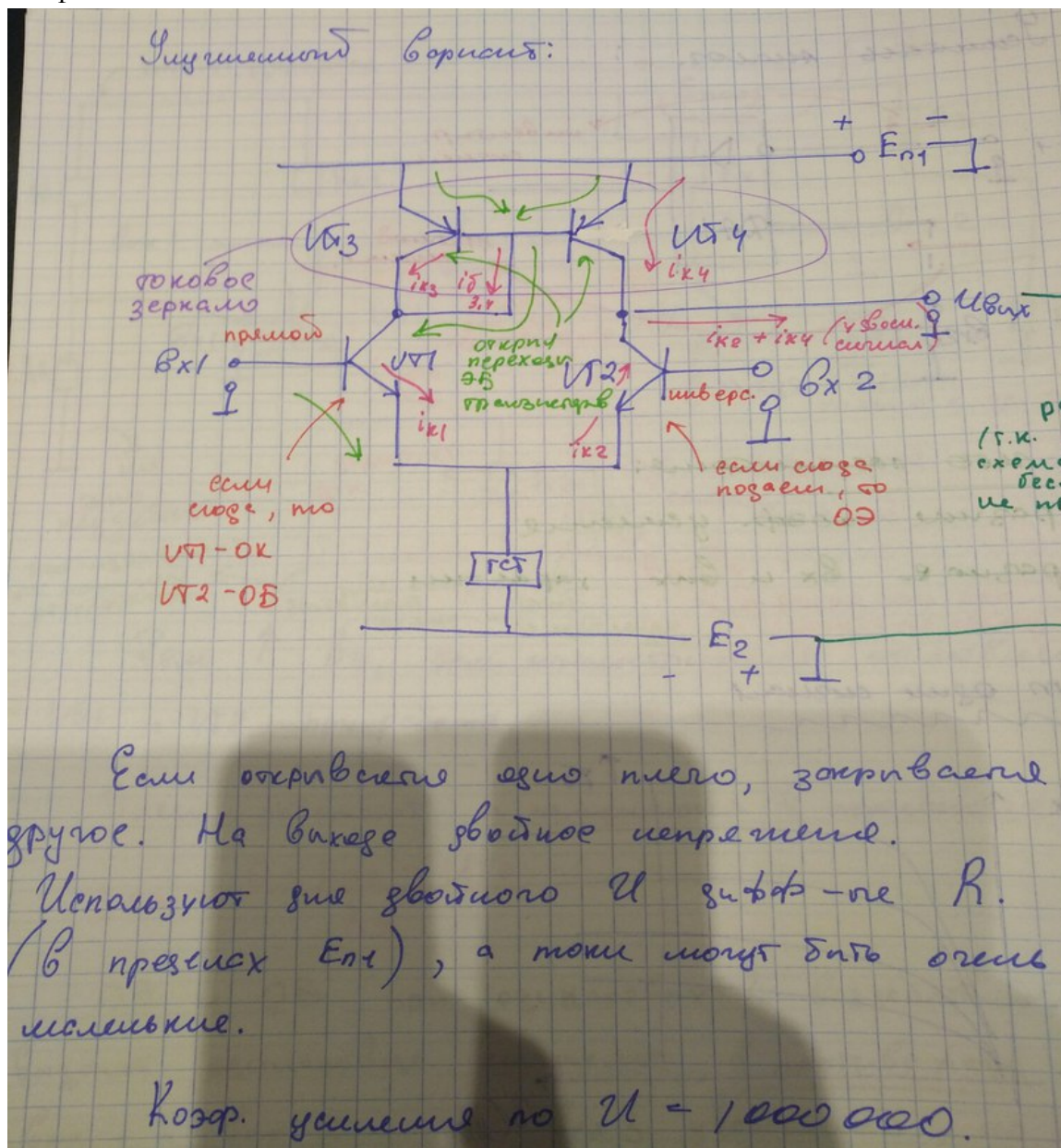
Любой ДУ выполняется по принципу сбалансированного полностью симметричного моста ($R_{к1} = R_{к2}$, все параметры транзисторов совпадают).

При анализе работы ДУ принято выделять в нем два плеча, одно из которых состоит из транзистора VT1 и резистора $R_{к1}$, второе — из транзистора VT2 и резистора $R_{к2}$. Каждое плечо ДУ является каскадом ОЭ. Таким образом, можно заключить, что в состав ДУ входят два каскада ОЭ. В общую цепь эмиттеров транзисторов также включен резистор $R_{Э}$. Для корректной работы ДУ необходимо выполнить 2 условия:

- сделать плечи каскада симметричными (для обеспечения одинаковой реакции на одинаковые воздействия и для избежания дрейфа нуля)
- обеспечить наличие ООС для уменьшения коэффициента усиления синфазного сигнала.

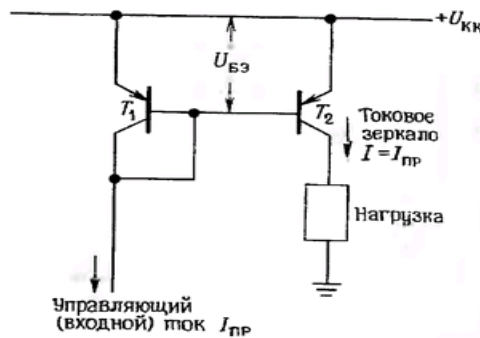
2) Что такое ГСТ? Для чего это устройство применяют в УПТ?

ГСТ - генератор стабильного тока. В УПТ (усилителях постоянного тока) генератор стабильного тока вставляют вместо резистора R_z , так как чем больше сопротивление R_z , тем более стабильно работает усилитель. ГСТ имеет сопротивление, которое стремится к бесконечности. Кроме того чем больше R_z , тем меньше значение приведенного дрейфа (т.е. на выходе появляется сигнал без подачи сигнала на вход), а следовательно и влияния синфазной составляющей.



3) Что такое "токовое зеркало"? Где оно находит применение?

Токовое зеркало — генератор тока, управляемый током. Чаще всего выходной ток равен управляющему или отличается от него в целое число раз. Токовое зеркало – это схема, предназначенная для копирования через одно активное устройство, контролируя ток в другом активном устройстве цепи, сохраняя постоянный ток на выходе, независимо от нагрузки. "Копируемый" ток может быть и иногда является переменным током. Концептуально, идеальное токовое зеркало – это просто идеальный инвертирующий операционный усилитель, который также меняет направление тока, или это управляемый током источник тока.

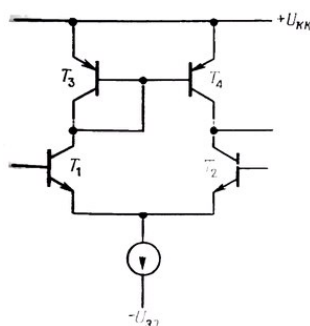


Использование: Токовое зеркало используется для смещения токов и питания активных нагрузок в цепях. Токовые зеркала на транзисторах чрезвычайно широко используются в аналоговых интегральных схемах благодаря своей простоте (требуется всего два согласованных транзистора) и эффективности. Токовые зеркала обычно используются для того, чтобы «скопировать» один управляющий ток на множество каскадов, и тем самым задать их ток покоя.

Использование токового зеркала в качестве активной нагрузки.

Иногда желательно, чтобы однокаскадный дифференциальный усилитель, как и простой усилитель с заземленным эмиттером, имел большой коэффициент усиления. Красивое решение дает использование токового зеркала в качестве активной нагрузки усилителя (рис. 2.72). Транзисторы T1 и T2 образуют дифференциальную пару с источником тока в эмиттерной цепи. Транзисторы T3 и T4, образующие токовое зеркало, выступают в качестве коллекторной нагрузки. Тем самым обеспечивается высокое значение сопротивления коллекторной нагрузки, благодаря этому коэффициент усиления по напряжению достигает 5000 и выше при условии, что нагрузка на выходе усилителя отсутствует. Такой усилитель используют, как правило, только в схемах, охваченных петлей обратной связи, или в компараторах. Запомните, что нагрузка для такого усилителя обязательно должна иметь большое общее сопротивление, иначе усиление будет существенно ослаблено.

Схема дифференциального усилителя с токовым зеркалом в качестве активной нагрузки



ДУ с токовым зеркалом в качестве активной нагрузки.

Каким образом у УПТ можно обеспечить высокое входное сопротивление?

Полевой транзистор – это полупроводниковый полностью управляемый ключ, управляемый электрическим полем.

Входное сопротивление УПТ может быть существенно увеличено при использовании в каскаде **полевых транзисторов**. При построении таких схем предпочтение отдается полевым транзисторам с управляющим р-п переходом. Это обусловлено следующими причинами: более высокой стабильностью их характеристик, большой электрической прочностью заряда (меньше боится пробоя статическим электричеством) большей допустимой разностью входных напряжений. Входное сопротивление ДУ, выполненного на биполярных транзисторах, также может быть значительно увеличено при использовании в каскаде составных транзисторов. Следствием этого является уменьшение входного тока усилителя, что крайне важно при его использовании в виде интегральной схемы.

Или:

Рассматриваем ДУ на входе УПТ.

$$R_{вх\ tr\ оэ} = r_{б} + r_{э}(B+1)$$

$$R_{вх\ ду} = 2(r_{б} + r_{э}(B+1)) \approx 2r_{э}(B+1)$$

$$r_{э} = \phi_T / (I_{э\ p.t.})$$

Т.о., для обеспечения высокого входного сопротивления нужно уменьшить $I_{э\ p.t.}$ с учетом того, что $I_{э\ p.t.} \gg I_{к0}$.

4) Какова максимально возможная амплитуда выходного сигнала в УПТ с дифференциальным входным каскадом?

На рис. 2.18 показана упрощенная схема двухтактного эмиттерного повторителя, выполненная на комплементарных (n-p-n- и p-n-p-) транзисторах. В те моменты времени, когда входное напряжение положительно, работает повторитель на транзисторе VT1, а когда отрицательно – на транзисторе VT2. В нагрузке сигналы транзисторов складываются (такой режим работы транзисторов с отсечкой половины сигнала называется режимом Б). По сравнению с обычными усилительными каскадами, в которых рабочая точка выбирается на середине линейного участка характеристики (режим А) в двухтактных каскадах в 2 раза увеличивается максимальная амплитуда выходного сигнала (а, следовательно, мощность возрастает в 4 раза). Кроме того, при нулевом входном напряжении токи обоих транзисторов близки к нулю и мощность не рассеивается.

Иванов в пон. рассказывал, что максимальная амплитуда = $E_{пит}/2$

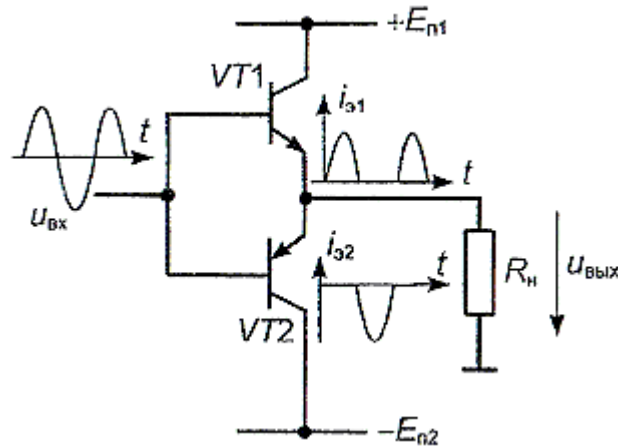
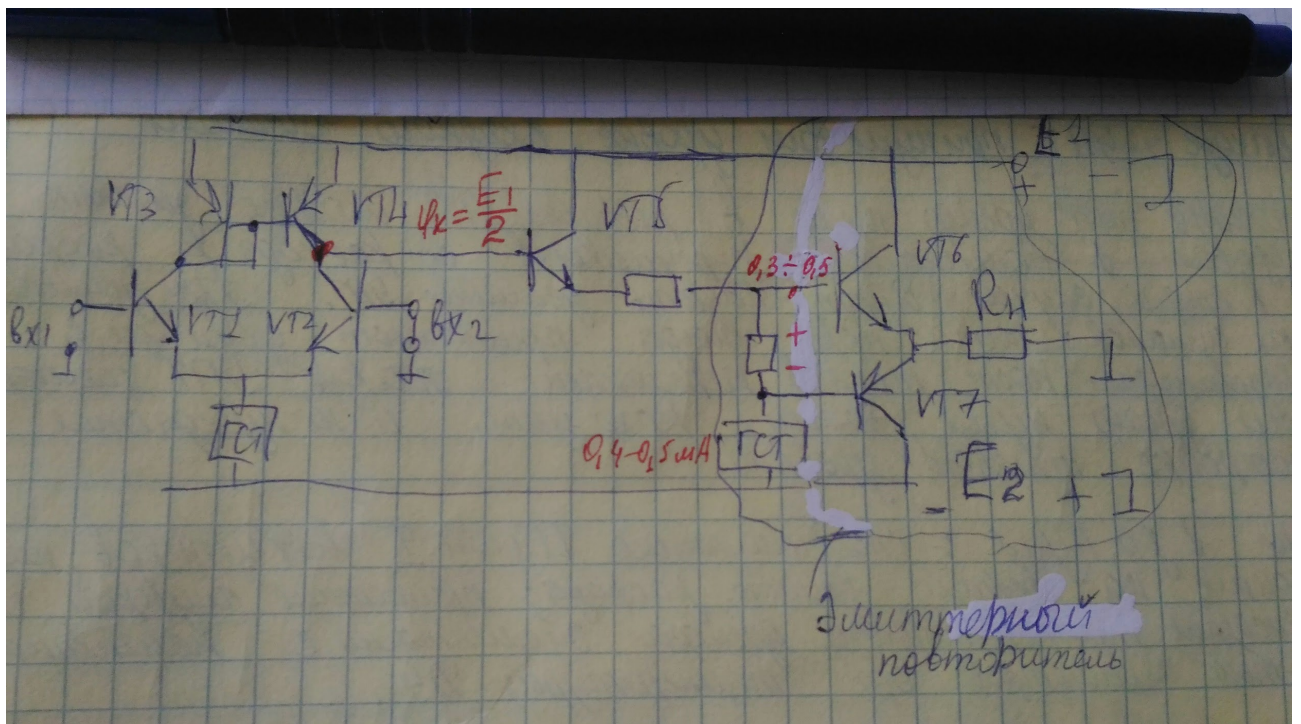
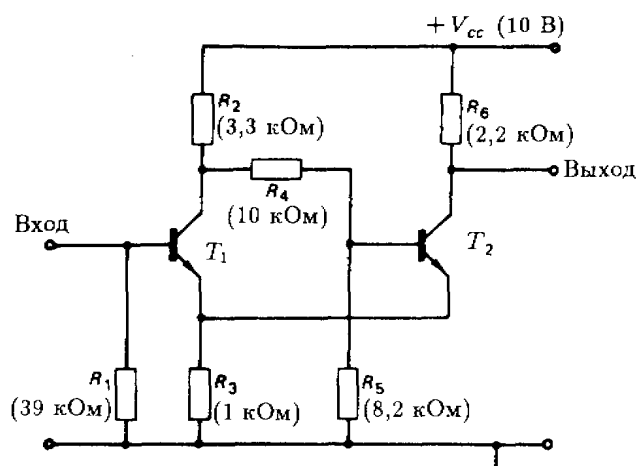


Рисунок 2.18



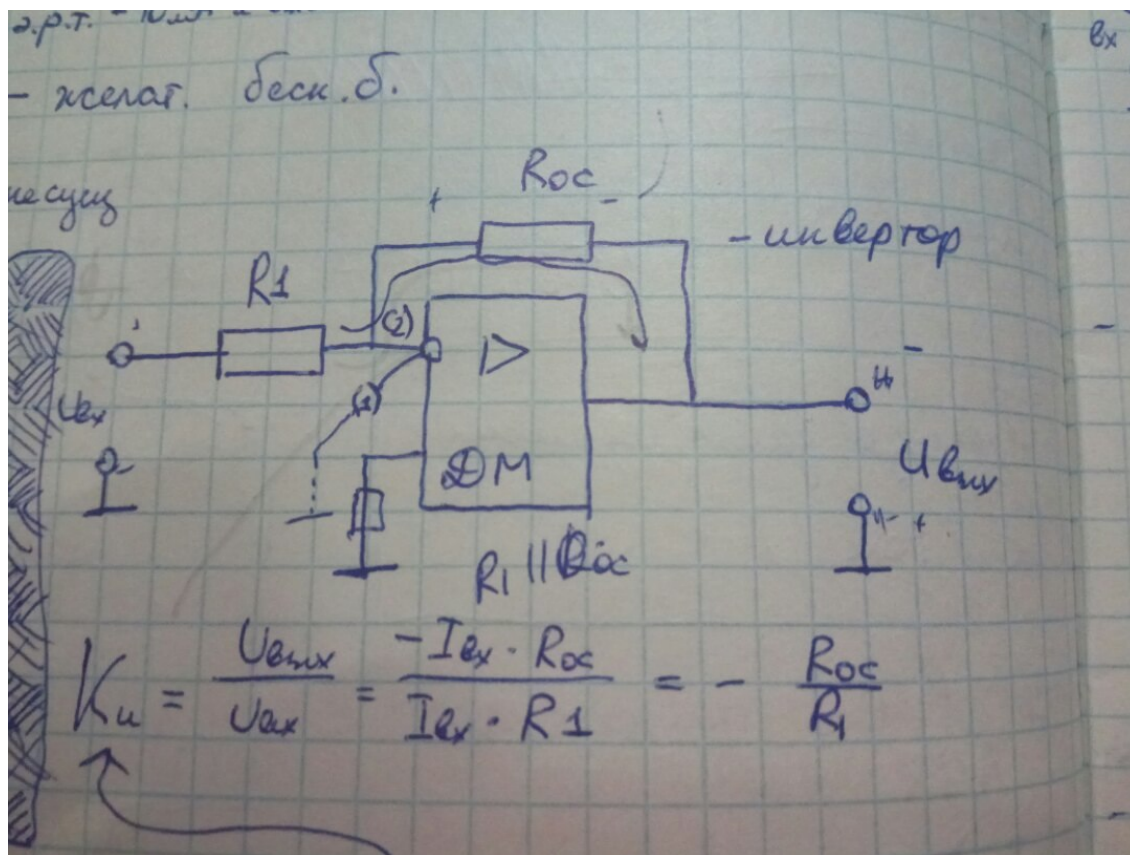
5) Как обеспечивается нулевой уровень выходного сигнала на выходе УПТ при нулевом уровне входного сигнала?



Очень распространенной схемой для формирования и ограничения импульсов является триггер Шмитта, изображенный на рис. 28.15. При отсутствии входного сигнала база Т1 имеет нулевой потенциал, и транзистор закрыт. Транзистор Т2 в это время находится в состоянии насыщения, поскольку на его базу подано положительное напряжение, определяемое делителем R2-R4-R5. Выходное напряжение (коллектор Т2) при этом практически равно нулю. Ток транзистора Т2, протекающий через эмиттерный резистор R3, создает положительное напряжение на эмиттерах, которое смещает эмиттерный переход Т1 в обратном направлении. При увеличении входного напряжения в положительном направлении транзистор Т1 начинает проводить ток, когда напряжение на его базе превысит напряжение на эмиттере на +0,6 В. Когда это произойдет, транзистор Т1 начинает пропускать ток, потенциал его коллектора снижается и это понижение передается на базу транзистора Т2. В результате ток транзистора Т2 уменьшается, падает потенциал эмиттеров транзисторов Т1 и Т2 и транзистор Т1 начинает пропускать еще больший ток и т. д. Таким образом, транзистор Т1 очень быстро достигает насыщения, а транзистор Т2 — отсечки. Выходное напряжение при этом равно VCC. Если теперь входное напряжение упадет до нуля, произойдет обратный процесс, в результате чего транзистор Т1 закроется, а транзистор Т2 придет в насыщение.

Обеспечить минимальный дрейф нуля в каскадах УПТ можно за счет последовательного уменьшения номиналов коллекторных резисторов от каскада к каскаду. Однако в этом случае будет падать усиление УПТ. При усилении малых сигналов постоянного тока иногда применяют усилители с преобразованием постоянного тока в переменный. Такие УПТ имеют малый дрейф нуля, большой коэффициент усиления и не нуждается в подстройке нулевого уровня. Также уменьшает дрейф нуля стабилизация напряжения или тока всех источников питания, влияющих на режим усилительного каскада; применение глубокой ООС; компенсация температурного дрейфа элементами с нелинейной зависимостью параметров от температуры. Радикально уменьшить дрейф нуля помогает использование дифференциальных каскадов (ДУ).

- 6) Можно ли использовать ДУ в качестве фазоинвертора? Если да, то как и какова его усилительная способность (K_u) по каждому каналу?



$$K_u = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = \frac{-I_{\text{ВХ}} * R_{\text{ОС}}}{I_{\text{ВХ}} * R_1} = -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}$$

Точка 1 - подвешенный ноль - из-за большого коэффициента усиления ДУ $U_{\text{вх}}^* \rightarrow 0$

Фазоинвертор — устройство, преобразующее выходной сигнал в 2 сигнала, сдвинутых по фазе на 180° .

Большая часть классических схем фазоинверторов основывается на использовании схем дифференциального усилителя.

Идеальную дифференциальную пару усилителя образуют два усилительных прибора (каждый из них имеет свое нагрузочное сопротивление), включенных таким образом, чтобы позволять току сигнала перераспределяться между нагрузочными сопротивлениями без каких бы то ни было потерь.

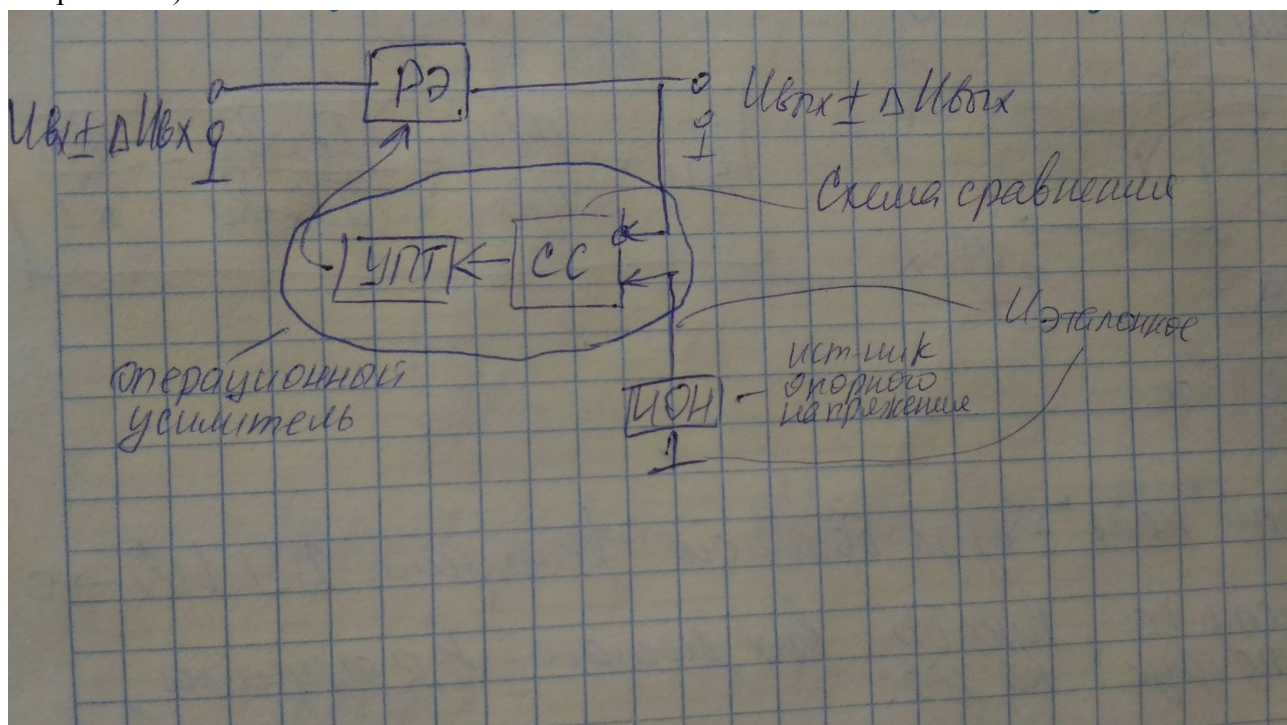
Утечка тока сигнала с катода на землю значительно снижает эффективность такого усилителя, поэтому величина сопротивления общего резистора в цепи питания дифференциального усилителя является критичной и, в идеале, должна приближаться к бесконечности.

Усилительная способность по каждому из каналов вдвое меньше, чем у обычного каскада ОЭ, так как входной сигнал распределяется на два.

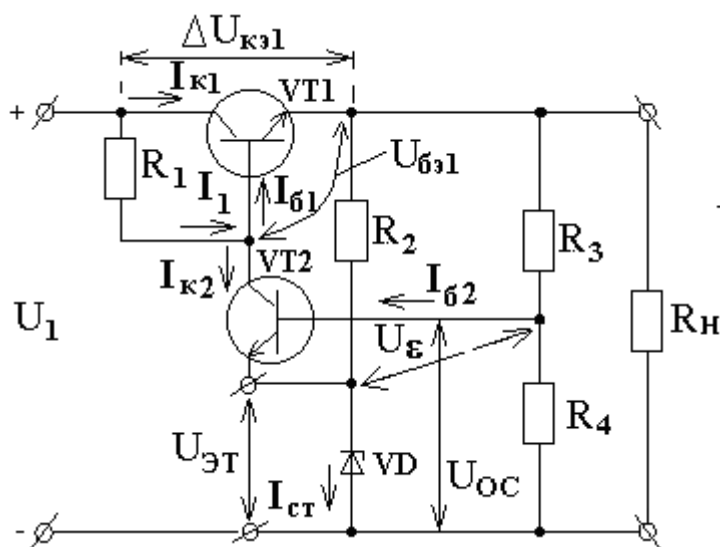
Какие требования предъявляются к транзисторам РЭ в стабилизаторах с импульсным регулированием?

Регулирующий транзистор в стабилизаторе используется в качестве регулируемого сопротивления. Он управляется усилителем постоянного тока, который повышает уровень сигнала рассогласования, поступающего от схемы сравнения.

Транзисторы выбирают исходя из значений коэффициента передачи тока β , напряжения насыщения между коллектором и эмиттером $U_{КЭнас}$. Транзистор должен обладать большим коэффициентом усиления по току β . Для этого вместо одного транзистора **часто используют несколько**, включенных в виде составного транзистора. При этом $\beta_{экв}$ равно произведению всех β_i транзисторов в составе составного транзистора. Также транзисторы **должны обладать небольшой инерционностью**, так как это может ухудшить работу стабилизатора. Кроме того транзисторы должны обладать **низким входным сопротивлением** и **высоким выходным** ($\Rightarrow U_{РЭ}$ будет самое высокое падение напряжения)..



1) Может ли в стабилизаторе выходное напряжение превышать входное? Показать с использованием принципиальной электрической схемы ?

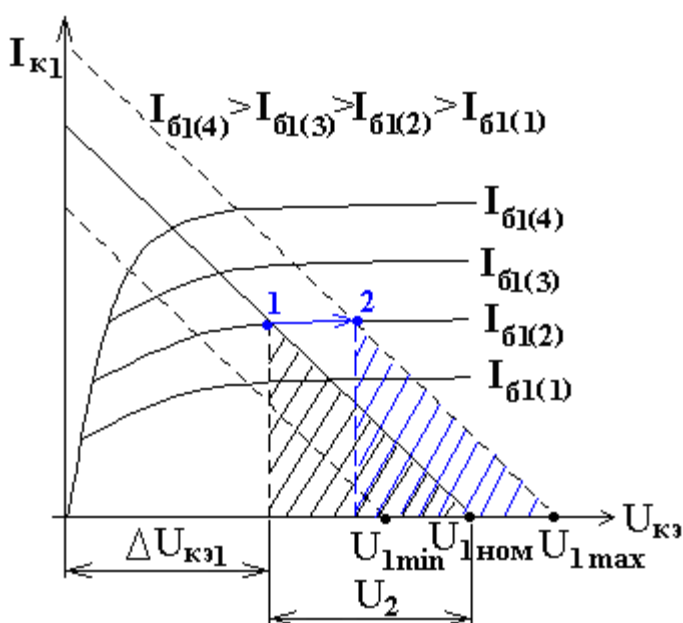


На рисунке представлена принципиальная схема компенсационного стабилизатора непрерывного действия с последовательным РЭ. Регулирующий элемент выполнен на транзисторе VT1, УПТ на транзисторе - VT2, источником эталонного напряжения служит стабилитрон VD, резистор R2 ограничивает ток стабилитрона. Делитель напряжения выполнен на резисторах R3, R4.

При возрастании напряжения U1 в первоначальный момент времени

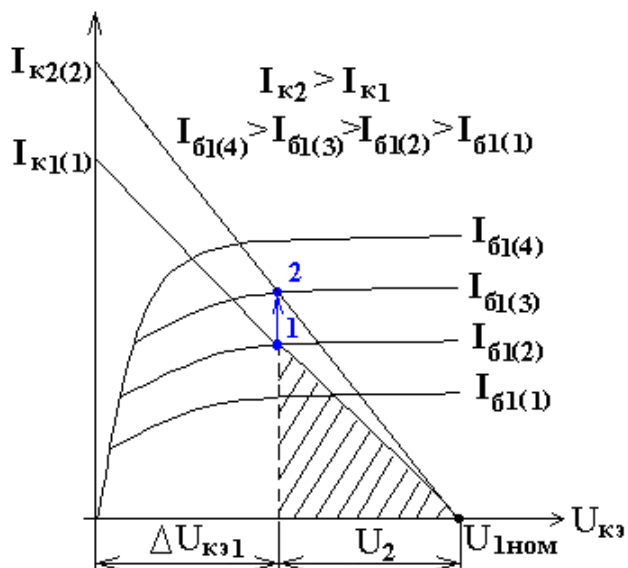
возрастает напряжение на нагрузке U2 и напряжение обратной связи OC, снимаемое с нижнего плеча делителя напряжения R4. Напряжение ошибки Ue увеличивается, потенциал эмиттера транзистора VT2 остается постоянным, а потенциал базы становится наиболее положительным. Транзистор VT2 открывается, что приводит к увеличению тока 2. По закону Кирхгофа для узла: $I_{61} = I_1 - I_{к2}$, поэтому ток базы транзистора VT1 уменьшается и транзистор прикрывается. Падения напряжения увеличивается, а напряжение в нагрузке восстанавливается.

Рассмотрим перемещение рабочей точки на выходных характеристиках транзистора (РЭ) при возрастании входного напряжения. При этом нагрузочная прямая перемещается параллельно вправо по отношению к нагрузочной прямой для номинального уровня $I_{ном}$.



При возрастании напряжения U1 катет прямоугольного треугольника U2 остается постоянным, изменяется падение напряжения $\Delta U_{кэ1} = U_1 - U_2$. Рабочая точка переходит из положения "1" в "2".

Рассмотрим принцип действия компенсационного стабилизатора при изменении тока нагрузки.



При возрастании тока нагрузки возрастает потребляемый ток от источника I_{K1} , что приводит к увеличению падения напряжения на РЭ - $\Delta U_{KЭ1}$ и уменьшению напряжения на нагрузке. Рабочая точка переходит из положения "1" в "2" и происходит приоткрывание транзистора VT1 за счет увеличения тока базы. Напряжение на нагрузке восстанавливается.

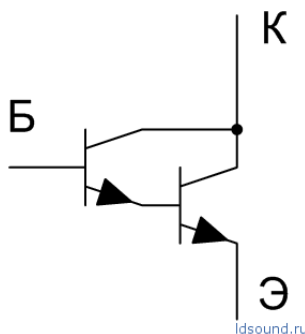
Длительность включенного состояния регулирующего транзистора определяется длительностью управляющего импульса импульсного модулятора. Связь входного и

выходного напряжений имеет вид: $U_{вых} = U_{вх} \cdot K_z$, где $K_z = t_{и}/T$ - коэффициент заполнения импульса на выходе

регулирующего элемента (T - период импульса, $t_{и}$ - время включения). Как видно из этой формулы выходное напряжение никогда не может превышать входное, так как $K_z < 1$.

2) Почему в стабилизаторах напряжения РЭ выполняется на составных транзисторах?

Составной транзистор (транзистор Дарлингтона) — объединение двух или более биполярных транзисторов с целью увеличения коэффициента усиления по току. Такой транзистор используется в схемах, работающих с большими токами (например, в схемах стабилизаторов напряжения, выходных каскадов усилителей мощности) и во входных каскадах усилителей, если необходимо обеспечить большой входной импеданс.

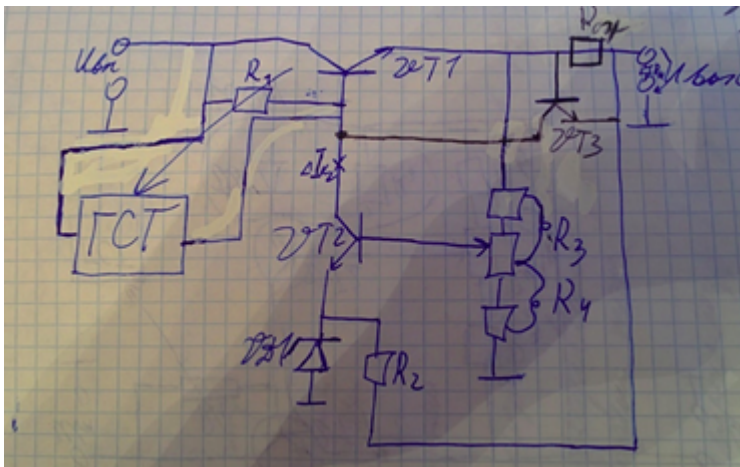


Условное обозначение составного транзистора

Составной транзистор имеет три вывода (база, эмиттер и коллектор), которые эквивалентны выводам обычного одиночного транзистора. Коэффициент усиления по току типичного составного транзистора (иногда ошибочно называемого «супербета»), у мощных транзисторов ≈ 1000 и у маломощных транзисторов ≈ 50000 . Это означает, что небольшого тока базы достаточно для того, чтобы составной транзистор открылся.

Транзистор должен обладать большим коэффициентом усиления по току β . Для этого вместо одного транзистора часто используют несколько, включенных в виде составного транзистора. При этом $\beta_{\text{экв}}$ равно произведению всех β_i транзисторов в составе составного транзистора. Составной транзистор имеет больший коэффициент усиления по току $\beta_1 \cdot \beta_2$

3) Каким образом компенсационный стабилизатор напряжения защищается от перегрузок по току?



На рисунке изображён стабилизатор с защитой от КЗ. Защита организуется транзистором VT3 и

резистором $R_{огр}$. При КЗ выходной ток равен $U_{бэ}/R_{огр} = 0,7/R_{огр}$

Другой вариант

Перегрузки стабилизаторов имеют место при переходных процессах и в аварийных режимах и могут привести к выходу из строя транзисторов, в первую очередь регулирующих. Наиболее распространенным видом перегрузок являются токовые перегрузки, возникающие при коротких замыканиях в цепи нагрузки. При этом через транзистор РЭ протекает большой ток, что приводит к перегреву транзистора. Для ограничения максимального тока через транзистор РЭ в стабилизаторах напряжения используют различные схемы защиты, принцип действия которых основан на шунтировании управляющего перехода транзистора РЭ другим транзистором при превышении тока нагрузки заданного значения.

Фрагмент схемы стабилизатора с защитой от токов к.з. приведен на рис. 3.4.

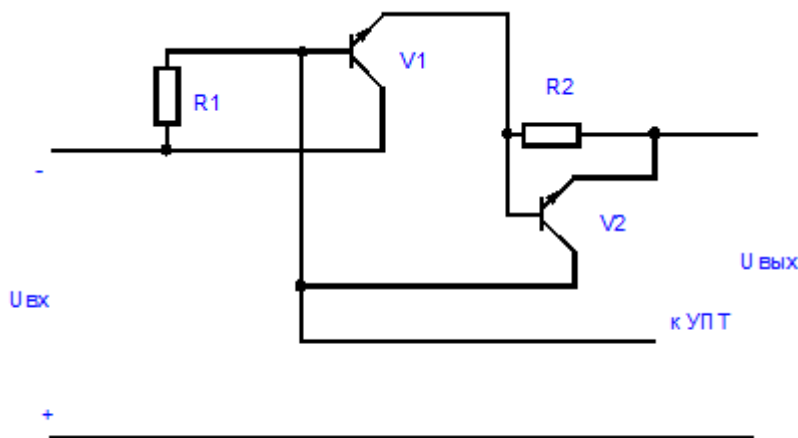
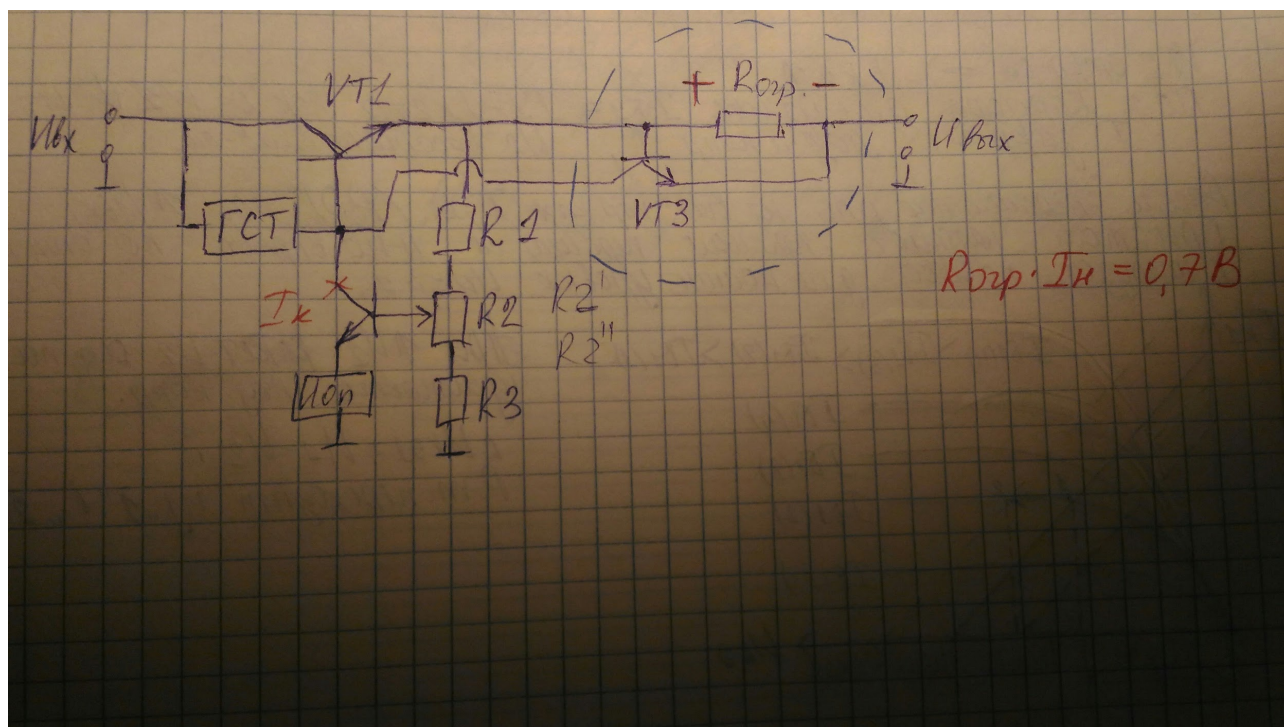


Рис. 3.4.

В нормальном режиме в этой схеме транзистор $V2$ заперт, так как падение напряжения на резисторе $R2$ не достаточно для его отпирания и не влияет на работу $V1$. В режиме

перегрузки U_{R2} увеличивается, транзистор $V2$ открывается и шунтирует базовую цепь $V1$ уменьшая тем самым базовый ток этого транзистора. Транзистор $V1$ запирается и уменьшает ток через нагрузку.



4) Как влияют свойства РЭ стабилизатора с импульсным регулированием на КПД стабилизатора?

КПД стабилизатора с импульсным регулированием равно $P_n / P_{вх} = U_n / (U_n + U_{рэ}) = 1 / (1 + U_{вых}/U_{вх})$, где $U_{рэ}$ - падение напряжения на импульсном элементе. Следовательно, чем меньше сопротивление регулирующего элемента, тем меньше падение на нем и значит КПД выше. Кроме того КПД увеличится, если увеличится коэффициент B усиления по току у транзистора в РЭ.

5) Каким образом регулируется выходное напряжение в компенсационных стабилизаторах напряжения?

В компенсационных стабилизаторах напряжения напряжение на выходе связано с напряжением на входе следующей формулой: $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} K_z$, где $K_z = t_{\text{и}} / T$ - коэффициент заполнения импульса на выходе регулирующего транзистора (T - период импульса, $t_{\text{и}}$ - время включения). Следовательно, выходное напряжение можно регулировать, изменяя длительность импульсов и их период. Также можно регулировать выходное напряжение, используя внешний делитель напряжения (R_2, R_3 как правило).

Альтернативный ответ(не только для импульсного стабилизатора)

Принцип работы компенсационного стабилизатора основан на использовании цепи ООС. Для реализации указанного принципа устройство кроме регулирующего (исполнительного) элемента (РЭ) должно содержать измерительный элемент (ИЭ), элемент сравнения и источник эталонного напряжения $U_{\text{эт}}$ (рис. 13.17). Выходное напряжение измерительного элемента, пропорциональное стабилизируемому параметру, сравнивается в элементе сравнения с эталонным напряжением, и полученный сигнал ошибки $u_{\text{ош}} = U_{\text{эт}} - u_{\text{из}}$ управляет коэффициентом передачи РЭ. Увеличение $u_{\text{ош}}$, вызванное уменьшением выходного параметра, увеличив коэффициент передачи РЭ, что ведет к восстановлению исходного значения выходного напряжения. И наоборот, увеличение выходного напряжения, уменьшая сигнал ошибки, уменьшает коэффициент передачи РЭ

--

б) Что нужно предпринять с целью увеличения коэффициента стабилизации стабилизатора?

Или более коротко (возможно, и более верно):

Коэффициент стабилизации равен отношению относительного изменения входного напряжения к относительному изменению выходного напряжения при постоянном сопротивлении нагрузки.

Ксти, характеризует стабильность выходного напряжения U_n , при изменении входного

$$K_{cmU} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} \cdot \frac{U_n}{\Delta U_n}$$

напряжения $U_{вх}$.

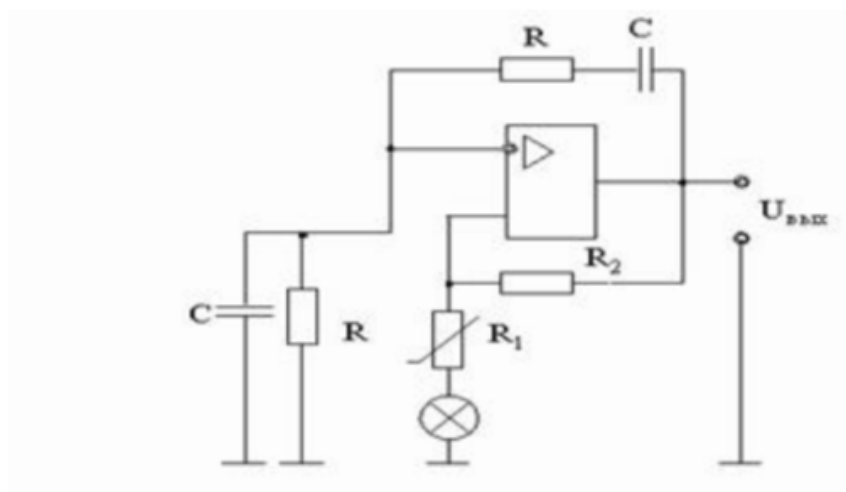
Следовательно, для увеличения коэффициента стабилизации необходимо или уменьшать изменение напряжения на выходе, или увеличивать отношение $U_{вых}/U_{вх}$. $U_{вых} / U_{вх} = K_z$, где $K_z = t_{и} / T$ - коэффициент заполнения импульса на выходе регулирующего транзистора. Следовательно, для увеличения коэффициента стабилизации необходимо увеличить K_z , а для этого нужно, чтобы на выходе модулятора длительности были импульсы с большей частотой.

- 1) Для генератора синусоидальных колебаний сформулировать условно баланса фаз и амплитуд и привести пример принципиальной схемы.

$$\Delta\phi = 2\pi n \text{ (баланс фаз)}$$
$$|K\beta| \geq 1 \text{ (баланс амплитуд)}$$

В генераторе должна быть положительная обратная связь (ПОС), т. е. сигнал, проходя через цепь ПОС, сдвигается по фазе на угол ϕ , а проходя через усилитель, сдвигается на тот же угол и возвращается на вход усилителя в той же фазе, в какой начинался цикл прохождения сигнала по петле ПОС. Это условие называют балансом фаз. 2) Баланс амплитуд означает, что незатухающие колебания в замкнутом контуре могут существовать только тогда, когда усилитель компенсирует потери в схеме обратной связи. (Пройдя контур, сигнал увеличивается.) (Коэффициент усиления и коэффициент передачи звена обратной связи приняты комплексными, т.е. учитывается их зависимость от частоты.) Пример принципиальной схемы:

Пример принципиальной схемы:



2) Как стабилизировать частоту генерируемых колебаний в генераторах?

Определенные отклонения частоты генерации могут происходить за счет изменения режимов работы и параметров элементов схемы, в частности под действием температуры. Нестабильность частоты генерации обратно пропорциональна добротности контура. Поэтому в качестве высокостабильных генераторов используют устройства с частотно-избирательными элементами высокой добротности, которой обладает кварцевый резонатор. Также можно осуществить параметрическую стабилизацию, которая достигается подбором элементов схемы (конденсаторов, катушек индуктивности, резисторов, транзисторов и др.), параметры которых в процессе работы изменяются мало (т.е. стойки к изменениям температуры)

3) Как в генераторе прямоугольных импульсов можно управлять длительностью полупериодов выходного сигнала? Привести примеры схем?

Электронным генератором называют устройство для формирования незатухающих электрических колебаний различной формы, частоты и мощности. Очень часто генераторы выполняют на основе ОУ.

Мультивибратором называют генератор напряжения с формой, близкой прямоугольной. Его название отражает тот факт, что такое напряжение при разложении в ряд Фурье представляется рядом, содержащим много высших гармоник (*мульти* — много).

По характеристике ОУ (см. рис. 2.13, б) видно, что выходное напряжение усилителя линейно зависит от входного только в очень узком диапазоне — сотнях милливольт. Если входное напряжение выходит за пределы этого диапазона, то выходной сигнал может принимать только два значения: $+U_{\text{ВЫХ}}$ ($\approx +12$ В) и $-U_{\text{ВЫХ}}$ (≈ -12 В). На этой особенности операционного усилителя основан принцип формирования прямоугольного напряжения мультивибратора (рис. 2.20, а).

Предположим, что в момент включения между входами усилителя небольшая (достаточно единиц милливольт) отрицательная разность потенциалов. При этом на выходе сформируется напряжение $+U_{\text{ВЫХ}}$, а на неинвертирующий вход с делителя R_1, R_2 будет подан положительный потенциал $+U_D$. Конденсатор начнет заряжаться по цепи « $U_{\text{ВЫХ}} - R_3 - C$ —корпус», стремясь достичь потенциала $+U_{\text{ВЫХ}}$. Потенциал на инвертирующем входе начнет расти до тех пор, пока не превысит потенциал на неинвертирующем входе $+U_D$. В этот момент усилитель сформирует

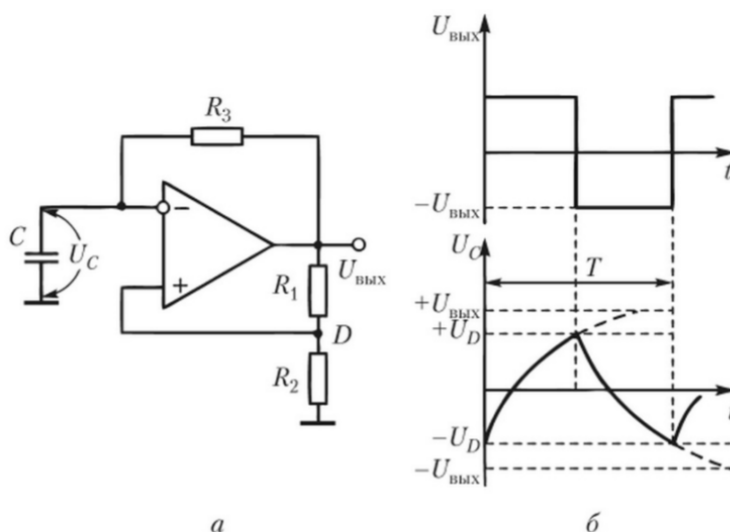


Рис. 2.20. Мультивибратор (а) и графики, поясняющие его работу (б)

(Далее все с методы к ЛР4, которая непосредственно от Иванова. Понимайте как хотите)

- 1) Что такое глубина насыщения транзистора в ключе и на какие его свойства и как она оказывает влияние?

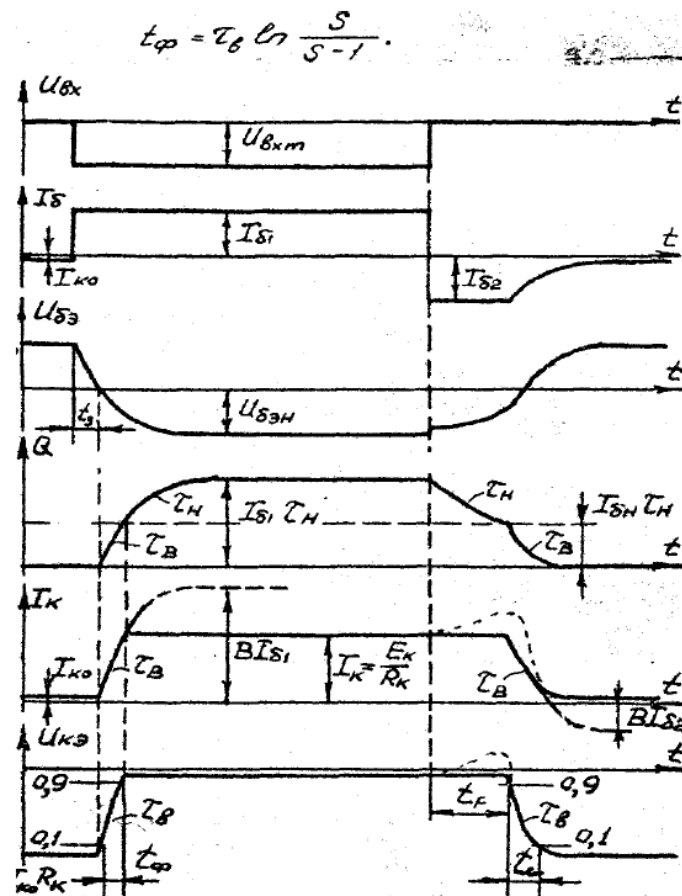


Рис. 13. Временные диаграммы работы транзисторного ключа

Режим насыщения имеет место при прямом смещении обоих р-п переходов транзистора. При этом падение напряжения на переходах, как правило не превышает нескольких милливольт. На коллекторных характеристиках транзистора область насыщения характеризуется линией насыщения ОН (см. рисунок). Каждой точке этой линии соответствует некоторое значение напряжения $U_{Кэ} = U_{К \text{ нас}}$ и тока $I_{К} = I_{К \text{ нас}}$. Ток $I_{К \text{ нас}}$ называется коллекторным током насыщения. $R_{\text{нас}} = U_{К \text{ нас}} / I_{К \text{ нас}}$, где $R_{\text{мс}}$ - сопротивление насыщенного транзистора. Каждой точке линии насыщения соответствует некоторое граничное значение тока базы $I_{Б \text{ нас}}$, при котором транзистор входит в насыщение. При насыщении нарушаются соотношения, характеризующие связь между током базы и коллектора в активном режиме. Критерием насыщения является нарушение этого соотношения $I_{Б} > I_{Б \text{ нас}}$. Для количественной оценки глубины насыщения вводят параметр -степень насыщения.

Степень насыщения определяется как относительное превышение базовым током того значения $I_{Б \text{ нас}}$, которое характерно для границы насыщения: $N = (I_{Б} - I_{Б \text{ нас}}) / I_{Б \text{ нас}}$

Иногда оценку глубины насыщения производят с помощью коэффициента насыщения, который показывает, во сколько раз ток, протекавший в цепи базы, больше базового тока, при котором транзистор входит в насыщение. $S = I_{Б} / I_{Б \text{ нас}}$ При насыщении сопротивление транзистора минимально и практически не зависит от значений $I_{Б}$ и $R_{К}$. Оно и является выходным сопротивлением ТК в стационарном замкнутом состоянии. Начиная со значений

степени насыщения $N = 3 \dots 5$ и выше межэлектродные напряжения транзистора мало зависят от тока базы. Поэтому более высокую степень насыщения применять нецелесообразно. Весьма существенным достоинством режима насыщения является практическая независимость тока коллектора от температуры окружающей среды.

2) Как уменьшить задержку включения ключа?

Важнейшим показателем работы электронных ключей является их быстродействие, которое оценивается скоростью протекания переходных процессов при переключении. Мгновенное переключение транзисторного ключа невозможно из-за инерционных свойств транзисторов, а также паразитных реактивных элементов схемы и проводников. Следовательно для уменьшения задержки включения ключа необходимо:

- использовать транзисторы с минимальной инерционностью
- максимально уменьшить паразитные емкости
- задержка включения транзистора будет тем меньше, чем больше N_{mc} , следовательно этот показатель необходимо увеличить

Задержкой включения транзистора является время перезаряда входной паразитной емкости от $U_{бэзаперт}$ до $U_{бэоткр}$. Для простейшего ТК постоянная времени перезаряда (где

$$C_{вх} = C_{бэбар} + C_{бэпар}, \text{ а}$$

$$t_{вх} = C_{вх}(R_1 || R_2);$$

$$t_z = t_{вх} \cdot \ln(1 + U_{бэзаперт}/U_{бэоткр}). \text{ Через это время откроется эмиттерный переход.}$$

Чтобы уменьшить задержку включения ключа необходимо брать транзистор с минимальной инерционностью, максимально уменьшить паразитную емкость. Кроме того задержка включения транзистора будет тем меньше, чем больше глубина насыщения

3) Каким образом можно предотвратить глубокое насыщение транзистора в ключе и какова цена достижения этого результата?

Транзистор может переходить из области насыщения в область отсечки минуя активную область. Это может происходить, если рассасывание избыточных носителей заряда, накопленных у эмиттерного и коллекторного переходов происходит одновременно. Следовательно, при увеличении импульса тока базы, открывающего транзистор, уменьшится длительность положительного фронта и транзистор попадет в область глубокого насыщения. Это приводит к увеличению времени обратного переключения. Следовательно ток в момент включения необходимо увеличить, так как это приведет к более быстрому рассасыванию заряда. Но увеличенный ток может привести к инверсному рассасыванию, что нежелательно. Для получения необходимого эффекта в схему добавляют форсирующий конденсатор (на рисунке *Сускор*). Он позволяет увеличить ток базы на короткий промежуток времени, что приводит к увеличению быстродействия ключа. Кроме того существует альтернативный метод для предотвращения глубокого насыщения транзистора. Для этого используют диод Шоттки, имеющий малое время восстановления. Транзисторы с такими диодами называют ненасыщенными. Использование форсирующего конденсатора имеет свои отрицательные стороны. Во время динамической отсечки ток базы падает до нуля и конденсатор не успевает разрядиться. И после запирающего транзистора на базе окажется дополнительное смещение. Также очередной открывающий импульс может поступить раньше, чем уменьшится до нуля напряжение смещения. Следовательно длительность положительного фронта увеличивается.

Необходимо манипулировать деталями, окружающими транзистор.

$$S = \frac{I_{\text{бт}}}{I_{\text{бн}}} \quad I_{\text{бт}} = \frac{U_{\text{вх}}^1 - U_{\text{бэоткр}}}{R_1} - \frac{U_{\text{вх}}^1 - U_{\text{бэсм}}}{R_2}$$

4) Чем определяется скорость выхода из насыщения транзистора в простейшем биполярном ключе?

При увеличении импульса тока базы, открывающего транзистор, уменьшается длительность положительного фронта и транзистор попадает в область глубокого насыщения. Что приводит к увеличению времени обратного переключения. Ток в момент выключения желательно увеличивать, так как это способствует более быстрому рассасыванию заряда и следовательно увеличивается скорость выхода из насыщения транзистора. Однако этот ток приводит к инверсному рассасыванию, что нежелательно из-за выбросов тока коллектора. Удовлетворить эти противоречивые требования удастся путем введения в цепь управления форсирующего конденсатора.

Чтобы уменьшить длительность фронта, надо уменьшить глубину насыщения.

$$t_{\phi} = \tau_e \ln \frac{S - 0.1}{S - 0.9}$$

5) Каким образом в ключе на биполярном транзисторе можно уменьшить длительность фронта выходного сигнала?

Для уменьшения длительности фронта выходного сигнала нужно уменьшать время жизни неосновных носителей заряда τ_n . Кроме того с ростом управляющего тока длительность фронта существенно уменьшается. Также длительность фронта уменьшается при увеличении степени насыщения транзистора.

Также можно применить высокочастотные транзисторы.

Управление длительностью среза в ключе на биполярном транзисторе осуществляется изменением параметров, указанных в формуле ниже

$$t_{\text{сз}} = \tau \ln \frac{I_{\text{б1}} / S + I_{\text{б2}}}{I_{\text{б2}}}$$

6) Каким образом в ключе на биполярном транзисторе можно управлять длительностью среза выходного сигнала?

Большая часть среза приходится на то время, когда транзистор находится в режиме отсечки. Следовательно для уменьшения длительности среза нужно использовать более высокочастотный транзистор и уменьшать постоянную времени $\tau = R_k C_k$, от которой в большей степени зависит $\tau_{\text{среза}}$. Кроме того длительность среза уменьшится при увеличении запирающего сигнала. Следовательно длительностью среза выходного сигнала можно управлять посредством изменения уровня запирающего сигнала.