

Московский Государственный Технический Университет
имени Н.Э.Баумана

С . Р . Иванов

КЛЮЧЕВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу « Электроника »

Работа № 3. КЛЮЧЕВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА

Цель работы - исследовать статические режимы и переходные процессы в схеме простого транзисторного ключа. Продолжительность работы - 3,5 часа.

Теоретическая часть

Транзисторные ключи (ТК) являются основой логических элементов ЭВМ. Для отображения двоичных символов используются статические состояния ТК, в которых транзистор работает в режимах отсечки или насыщения. Во время переходных процессов при переключении из одного статического состояния в другое транзистор работает в нормальном и инверсном активных режимах.

Основными параметрами статических состояний ТК являются напряжение насыщения $U_{кэн}$ и обратный ток $I_{к0}$. Режим отсечки ТК (рис. 12) характеризуется низким уровнем напряжения

$U_{\text{вых}} = -E_k + I_{к0} R_k \approx -E_k$. В режиме насыщения через ТК протекает ток

$$I_{кн} = \frac{E_k - U_{кэн}}{R_k} \approx \frac{E_k}{R_k}; \quad U_{\text{вых}} = U_{кэ} \approx 0.$$

Основными параметрами переходных процессов являются: при включении ТК t_3 - время задержки и t_{ϕ} - длительность фронта, а при выключении $t_{рас}$ - время рассасывания накопленного в базе заряда и t_c - длительность среза.

На рис. 13 представлены временные диаграммы, иллюстрирующие переходные процессы в ТК. Время задержки $t_3 \approx \tau_{\text{вх}} \ln\left(1 + \frac{U_{\phi 0}}{E_{\phi 0}}\right)$, где $\tau_{\text{вх}} = R_{\phi} C_{\text{вх}}$; $U_{\phi 0}$ - начальное напряжение на Свх. Длительность фронта определяется по формуле

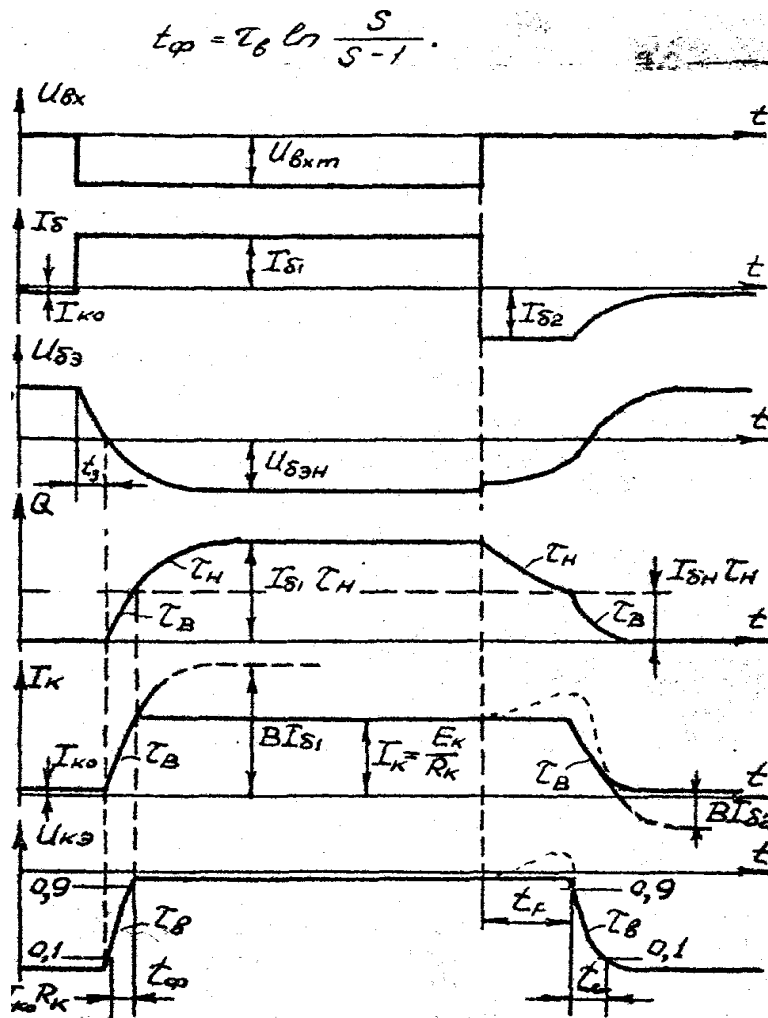


Рис. 13. Временные диаграммы работы транзисторного ключа

Для удобства измерения фронта его часто определяют как время нарастания тока от уровня $0.1 I_{KH}$ до уровня $0.9 I_{KH}$; $t_{\phi} = \tau_b \ln \frac{S - 0.1}{S - 0.9}$. В этих

формулах $\tau_b = \frac{1}{2\pi f_b}$ (f_b - верхняя граничная частота каскада ОЭ), а

$S = \frac{I_{\delta 1}}{I_{\delta n}} = \frac{I_{\delta 1} B R_k}{E_k}$ - коэффициент насыщения. Ток базы, соответствующий границе насыщения, $I_{\delta n} = \frac{I_{KH}}{B}$.

Время рассасывания заряда в базе $t_{pac} = \tau_u \ln \frac{S I_{\delta n} + I_{\delta 2}}{I_{\delta n} + I_{\delta 2}}$, где τ_u - время жизни неосновных носителей в базе в режиме насыщения.

Время рассасывания характеризуется интервалом времени от момента подачи запирающего входного напряжения $+E_{\delta 2}$ до момента, когда заряд в базе уменьшается до граничного значения $Q_{гр} = I_{\delta n} \tau_u$ при котором транзистор переходит из насыщенного состояния в активный режим. Если коллекторный переход запирается раньше эмиттерного ($t_k < t_3$) то транзистор переходит в нормальный активный режим, если наоборот ($t_3^u < t_k^u$), то в инверсный

активный режим. В последнем случае на графике I_k и U_k появляется характерный выброс (рис. 13, штриховые линии).

Заканчивается переходный процесс при выключении транзистора срезом выходного напряжения (задним фронтом). Длительность t_c можно оценить, считая, что процесс формирования заднего фронта заканчивается при $Q \approx 0$. Тогда $t_c = \tau_e \ln \frac{I_{\beta 1} / S + I_{\beta 2}}{I_{\beta 2}}$.

Однако в реальных схемах большая часть среза выходного напряжения происходит, когда транзистор находится в режиме отсечки. Поэтому длительность среза определяется постоянной времени $\tau_k = R_k C_k$ или $\tau_k = R_k (C_k + C_n)$ с учетом емкости нагрузки C_n . Конденсатор C в схеме ТК (рис. 12. пунктир) является форсирующим. Он позволяет увеличить токи базы $I_{\beta 1}$ и $I_{\beta 2}$ на короткий промежуток времени, в то время как стационарные токи базы практически не меняются, это приводит к повышению быстродействия ТК. Другим способом увеличения быстродействия ТК является введение нелинейной обратной связи. Диод с малым временем восстановления (диод Шоттки), включенный между коллектором и базой, предотвращает глубокое насыщение ТК, фиксируя потенциал коллектора относительно потенциала базы. Такие ТК называют ненасыщенными.

Описание макета

Макет, схема которого показана на рис. 14, позволяет исследовать статические состояния ключа и переходные процессы в нем. В первом случае с помощью переключателя В1 возможна подача в цепь базы низкого уровня напряжения от источника G1 с сопротивлением в его -цепи R1. Для измерения постоянных токов и напряжений в цепях ключа используется прибор, установленный на панели лабораторного стенда о пределах измерения тока $J1=20$ мА, $J2=200$ мкА, $U1=20$ В, $U2=0,2$ В.

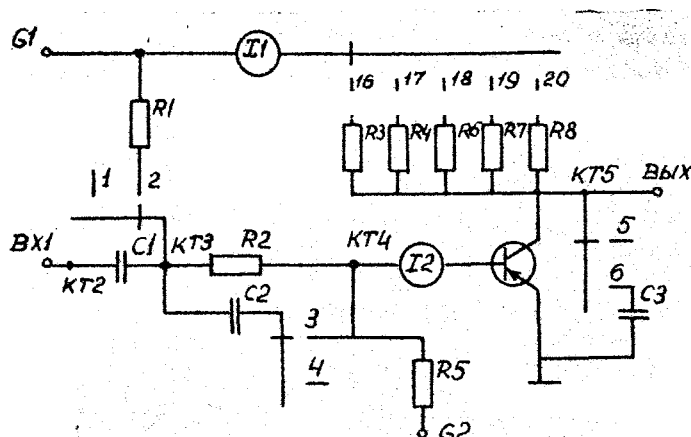


Рис. 14. Схема макета лабораторной работы и 3

При исследовании переходных процессов на вход схемы подаются импульсы отрицательной полярности амплитудой не более 15 В от генератора прямоугольных импульсов. В схеме макета предусмотрена возможность установки в коллекторной и базовой цепях транзистора

различных деталей (резисторов и конденсаторов) с целью исследования влияния их параметров на свойства исследуемого ключа. Так, возможна смена резисторов в коллекторной цепи (переключатель В4), подключение к схеме ускоряющего конденсатора С2 (переключатель В2), подключение к выходу ключа нагрузочного конденсатора С3 (переключатель В3). В схеме установлен маломощный низкочастотный транзистор МП42А ($f_a = 1...3$ МГц, $V_{ст} = 30...60$, $C_{к} = 30$ пф, $R_{кмакс} = 200$ мВт). Резисторы и конденсаторы имеют следующие номиналы:

$R_1 = 75$ кОм,	$R_6 = 5,1$ кОм
$R_2 = 3$ кОм	$R_7 = 10$ кОм
$R_3 = 130$ Ом.	$R_8 = 75$ кОм
$R_4 = 910$ Ом,	$C_1 = 10,0$ мкф
$R_5 = 30$ кОм	$C_2 = 1000$ пФ
	$C_3 = 470$ пф.

Напряжение источника G1 следует установить равным 10 В.

Задание

1. Измерить статический коэффициент усиления по току транзистора, установленного в ключе.

2. Исследовать статические состояния ТК при различных R_k . Определить величину сопротивления R_k , соответствующую границе насыщения.

3. Исследовать характеристики ТК в динамическом режиме. Выявить зависимости основных параметров переходных процессов $t_f, t_{рас}, t_c$ от амплитуда входного напряжения. Построить соответствующие графики. Для одного из значений входного напряжения рассчитать $t_f, t_{рас}, t_c$ по приведенным формулам. Оценить расхождение расчетных величин и измеренных.

4. Исследовать влияние форсирующего конденсатора на основные параметры переходных процессов.

5. Определить, на какие параметры ТК оказывает влияние конденсатор нагрузочной цепи.

6. Определить, при каких параметрах коммутируемых элементов схемы ТК макета возникает инверсное запираение.

Контрольные ВОПРОСЫ

1. Каково назначение ключевой схемы?
2. Какими основными параметрами характеризуется ключ?
3. Как зависят параметры переходных процессов от глубины насыщения?
4. Что такое инверсное запираение ТК?

5. В чем смысл введения форсирующего конденсатора?
6. Как влияет емкость нагрузки на длительность переходных процессов?
7. Как влияет амплитуда входного сигнала на параметры ТК?
8. Поясните процессы в ТК по временной диаграмме.

Литература

Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. - У.: Высшая школа, 1982. - 495 с., ил.

Вопросы по ключам.

1. Что такое глубина насыщения транзисторного ключа и на какие его свойства и как она оказывает влияние?

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. $R_{нас} = U_{к\text{нас}} / I_{к\text{нас}}$, где $R_{нас}$ - 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 и максимально уменьшить паразитные емкости. Кроме того задержка включения транзистора будет тем меньше, чем больше $N_{мс}$.

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 $C_{ускор}$). 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 отпирающий импульс может поступить раньше, чем уменьшится до нуля напряжение смещения. Следовательно длительность положительного фронта увеличивается.

4. Что такое инверсное запертие ключа и в каких случаях оно возникает?

Если рассасывание заряда сначала завершается у эмиттерного перехода, то происходит инверсное запертие ключа, т.е. эмиттерный переход запирается раньше коллекторного. Это сопровождается всплеском тока коллектора. Эмиттерный переход смещается в обратном направлении раньше коллекторного. Таким образом транзистор оказывается в инверсной активной области. Ток эмиттера уменьшается, но это не вызывает изменение тока базы. Увеличивается ток коллектора, что способствует более быстрому рассасыванию избыточных носителей заряда, накопленных у коллекторного перехода. После рассасывания зарядов коллекторного перехода транзистор оказывается в области динамической отсечки. Следовательно, в отличие от нормального запирающего, при инверсном запирающем транзистор при переходе из области насыщения в область отсечки проходит не через нормальную активную область, а через инверсную активную область.

5. Зачем резистор в цепи базы транзисторного ключа шунтируется конденсатором? Какой емкостью он должен обладать?

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.

6. На ключ подавались управляющие сигналы, длительностью 0,1 таун и 10 таун. Какими параметрами выходные импульсы будут различаться и почему?

τ_n - время жизни неосновных носителей заряда. Заряд базы меняется по следующему закону: $Q(t) = GB \tau_n (1 - e^{-t/\tau_n})$. Следовательно с увеличением τ_n будет увеличиваться начальный заряд базы. Но с увеличением τ_n происходит более медленное рассасывание заряда в базе. Длительность фронта выходного сигнала прямо пропорционально τ_n и следовательно выходной импульс от сигнала с большим τ_n будет обладать большей длительностью фронта, чем сигнал с меньшим τ_n .

7. 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 удается путем введения в цепь управления форсирующего конденсатора.

8. 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.

9. 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.

10. Каким образом в ключе можно уменьшить задержку выключения?

Время задержки выключения уменьшится, если уменьшится время рассасывания заряда. В свою очередь рассасывания заряда ускорится, если транзистор не вводить в состояние глубокого насыщения. Для этого используют ненасыщенные транзисторы.

Использованные в этих транзисторах диоды Шоттки позволяют значительно уменьшить задержку выключения, так как имеют малое время восстановления.

11. Каковы достоинства и недостатки ТТЛ-ключа со сложным инвертором?

К недостаткам ТТЛ-ключа с простым инвертором относится: - низкая помехоустойчивость - малая нагрузочная способность - малое быстродействие при работе на емкостную нагрузку. Улучшенными параметрами по сравнению с предыдущей схемой обладает ТТЛ-ключ со сложным инвертором. Его помехоустойчивость по логическому нулю выше, чем у схемы с простым инвертором, а по логической единице ниже. В ТТЛ-схеме со сложным инвертором постоянная времени заряда нагрузочной емкости существенно уменьшается. За счет этого ТТЛ-схема со сложным инвертором имеет большее быстродействие по сравнению с простым инвертором. К недостаткам ТТЛ-схемы со сложным инвертором относится сильная генерация токовых помех по цепи питания, обусловленная броском тока через сложный инвертор при переключении схемы из состояния логического нуля в единицу.

12. Чем определяются уровни выходного напряжения для ТТЛ-ключа со сложным инвертором?

Логическая схема состоящая из ТТЛ-ключа реализует схему И-ИЛИ-НЕ. На выходе системы устанавливается логический ноль, если на всех входах поступают сигналы, соответствующие логической единицы. При всех остальных комбинациях сигналов на входах схемы выходное напряжение соответствует логической единице.

13. Какие требования предъявляются к МЭТ в ТТЛ-ключах и как они обеспечиваются?

Многоэмиттерный транзистор специально разработан для микроминиатюрных логических устройств и не имеет дискретного аналога. Количество эмиттеров у многоэмиттерного транзистора должно соответствовать количеству входов у данной схемы. На рисунке показана структура многоэмиттерного транзистора. У многоэмиттерного транзистора каждая пара смежных эмиттеров вместе с разделяющим их р-слоем базы образует горизонтальный транзистор типа $p^+ - p - p^+$. Если на одном из эмиттеров действует прямое напряжение, а на другом обратное, то первый будет инжектировать электроны, а второй будет собирать те из них, которые инжектированы через боковую поверхность эмиттера и прошли без рекомбинации расстояние между эмиттерами. Такой транзисторный эффект называется паразитным. Чтобы избежать этого эффекта расстояние между эмиттерами должно превышать диффузионную длину носителей в базовом слое. Кроме того необходимо, чтобы МЭТ имел как можно меньший инверсный коэффициент передачи тока. В противном случае возможен паразитный эффект подобный предыдущему.

14. Чем определяется нагрузочная способность ТТЛ-ключа в состоянии «0»?

Нагрузочная способность ТТЛ-ключа характеризует его способность получать сигнал от нескольких источников информации и одновременно быть источником информации для ряда других элементов. Для численной характеристики нагрузочной способности используют коэффициент разветвления по выходу Краз. Этот параметр определяет число единичных нагрузок - аналогичных ключей, которые можно одновременно подключить к выходу ключа. Нагрузочная способность ТТЛ-ключа в состоянии "0" характеризуется параметром $K_{0раз} = I_{0вых} / I_{0вх}$, где $I_{0вых}$ - выходной ток логического нуля, $I_{0вх}$ - входной ток логического нуля.

15. Какова нагрузочная способность ТТЛ-ключа в состоянии «1»?

Нагрузочная способность ТТЛ-ключа в состоянии "1" характеризуется параметром $K_{1раз} = I_{1вых} / I_{1вх}$, где $I_{1вых}$ - выходной ток логической единицы, $I_{1вх}$ - входной ток логической единицы.

16. Есть ли в ТТЛ-ключе обратные связи? Если есть, то какие и где?

17. Зачем в эмиттерной цепи фазоинвертора ТТЛ-ключа установлен дополнительный транзистор? Как он влияет на свойства ключа?

Дополнительным транзистором в эмиттерной цепи фазоинвертора ТТЛ-ключа является транзистор VT3. Этот транзистор вместе с двумя резисторами R3 и R4 является нелинейной цепью коррекции. Она позволяет увеличить быстродействие данной схемы и приблизить ее АПХ (амплитудо-передаточная характеристика) к прямоугольной. Последнее улучшает формирующие свойства схемы. Принцип действия данной схемы основан на зависимости ее сопротивления от состояния транзистора VT5, в основном определяется сопротивлением резистора R3 которое велико. Поэтому на начальном этапе формирования на выходе схемы напряжения логического нуля весь эмиттерный ток транзистора VT2 втекает в базу транзистора VT5, что форсирует его включение. После включения VT5 насыщается и VT3, шунтируя эмиттерный переход транзистора VT5 низкоомным сопротивлением резистора R4. Это, во-первых, уменьшает степень насыщения транзистора VT5 и, во-вторых, при последующем выключении увеличивает ток, удаляющей из базовой области этого транзистора избыточный заряд неосновных носителей. Оба эти фактора способствуют снижению времени рассасывания заряда, что повышает быстродействие схемы.

18. Какую роль играет резистор в коллекторной цепи верхнего плеча выходного каскада ТТЛ-ключа? Как выбрать его сопротивление?

В момент переключения схемы в ее выходной цепи протекает так называемый "сквозной ток", обусловленный тем, что в течении интервала рассасывания запираемого транзистора оба транзистора выходного двухтактного усилителя (выходной двухтактный усилитель представлен в этой схеме транзисторами VT4, VT5, резистором R5 и диодом VDn) оказывается насыщенным. Это приводит к тому, что ток потребления схемы имеет явно выраженный импульсный характер. Поэтому с увеличением частоты переключения среднее значение тока, потребляемое схемой растет. Растет и ее суммарная потребляемая мощность. Кроме того, протекание импульсов тока за счет действия индуктивности соединительных проводов может привести к появлению ложных срабатываний соседних элементов. Для ограничения величины "сквозного тока" в коллекторную цепь VT4 включен резистор R5. Однако чрезмерное увеличение сопротивления этого резистора, во-первых, увеличивает мощность, рассеиваемую в схеме, и, во-вторых, уменьшает ее нагрузочную способность.

Что влияет на помехозащищенность ТТЛ-ключа и каким образом ее можно увеличить?

Помехозащищенность ключа рассчитывают минимальную из двух величин:

положительной и отрицательной

статических помех, $U_{+п} = U_{0вх} пор - U_{0вх}$ и $U_{-п} = U_{1вх} - U_{1вх} пор$. Статическая

помехоустойчивость это максимально допустимое отклонение напряжения, при котором еще не происходит изменения уровней выходного напряжения. Следовательно для увеличения помехозащищенности ключа необходимо увеличивать U_{+n} и U_{-n} , которые в свою очередь могут быть увеличены если будут увеличено пороговое напряжение логического нуля и уменьшено пороговое напряжение логической единицы. Кроме того существует еще одна особенность в работе с ТТЛ-ключами. Если вход схемы остается неподключенным к источнику сигнала, то можно считать, что на него подан сигнал "1". Однако на практике неиспользуемые входы рекомендуется не оставлять свободными, а через дополнительный резистор $R_{доп}$ подключать в вывод +Ш. В противном случае, так как в состоянии "1" по входу схема обладает большим входным сопротивлением, резко увеличивается вероятность воздействия на нее помех, что снижает надежность работы ключа. Почему ТТЛ-ключи являются источниками помех и как с такими помехами бороться? В момент переключения схемы в ее выходной цепи протекает так называемый "сквозной ток", обусловленный тем, что в течении интервала рассасывания запираемого транзистора оба транзистора выходного двухтактного усилителя (выходной двухтактный усилитель представлен в этой схеме транзисторами VT_4 , VT_5 , резистором R_5 и диодом VD_n) оказывается насыщенным. Это приводит к тому, что ток потребления схемы имеет явно выраженный импульсный характер. Поэтому с увеличением частоты переключения среднее значение тока, потребляемое схемой растет. Растет и ее суммарная потребляемая мощность. Кроме того, протекание импульсов тока за счет действия индуктивности соединительных проводов может привести к появлению ложных срабатываний соседних элементов. Для ограничения величины "сквозного тока" в коллекторную цепь VT_4 включен резистор R_5 . Однако чрезмерное увеличение сопротивления этого резистора, во-первых, увеличивает мощность, рассеиваемую в схеме, и, во-вторых, уменьшает ее нагрузочную способность. Для исключения действия помех шины питания должны выполняться с малой собственной индуктивностью и по всей длине шунтироваться дополнительными конденсаторами $S_{доп}$ с малой паразитной индуктивностью. Использование такого технического решения позволяет свести к минимуму действие на устройство внутренних помех.

21. От чего зависит нагрузочная способность ТТЛ-ключа и как ею управлять?

Нагрузочная способность ТТЛ-ключа характеризует его способность получать сигнал от нескольких источников информации и одновременно быть источником информации для ряда других элементов. Для численной характеристики нагрузочной способности используют коэффициент разветвления по выходу $K_{раз}$. Этот параметр определяет число единичных нагрузок - аналогичных ключей, которые можно одновременно подключить к выходу ключа. $K_{раз}$ - меньший из двух коэффициентов $K_{Ораз}$ и $K_{1раз}$. Нагрузочная способность ТТЛ-ключа в состоянии "0" характеризуется параметром $K_{Ораз} = I_{Овых} / I_{Овх}$, где $I_{Овых}$ - выходной ток логического нуля, $I_{Овх}$ - входной ток логического нуля. Нагрузочная способность ТТЛ-ключа в состоянии "1" характеризуется параметром $K_{1раз} = I_{1вых} / I_{1вх}$, где $I_{1вых}$ - выходной ток логической единицы, $I_{1вх}$ - входной ток логической единицы. Следовательно управлять нагрузочной способностью ТТЛ-ключа можно меняя значения коэффициентов разветвления по "0" и "1", которые в свою очередь можно менять изменяя входные и выходные токи логических сигналов, которые зависят от напряжений логических сигналов.

22. Что добавлено в ТТЛ-ключе со сложным инвертором для устранения скола на передаточной характеристике при смене уровня выходного сигнала с высокого на низкий?

Для устранения скола на передаточной характеристике ТТЛ-ключа в него добавлен резистор R_5 . В момент переключения схемы с высокого уровня на низкий в ее выходной

цепи протекает так называемый "сквозной ток", обусловленный тем, что в течении интервала рассасывания запираемого транзистора оба транзистора выходного двухтактного усилителя (выходной двухтактный усилитель представлен в этой схеме транзисторами VT4, VT5, резистором R5 и диодом VDn) оказывается насыщенным. Это приводит к тому, что ток потребления схемы имеет явно выраженный импульсный характер. Поэтому с увеличением частоты переключения среднее значение тока, потребляемое схемой растет. Для ограничения величины "сквозного тока" в коллекторную цепь VT4 и включен резистор R5.

23. Каким образом достигнуто поочередное отпирание выходных транзисторов у ТТЛ-ключа со сложным инвертором?

На рисунке приведена схема ТТЛ-ключа со сложным инвертором. Транзистор T3 выполняет функции эмиттерного повторителя с нагрузкой в виде транзистора T4. При воздействии сигнала "1" на все входы транзистор T2 насыщен. Следовательно транзистор T4 также насыщен из-за невысокого потенциала на его входе (точка а), создаваемого эмиттерным током транзистора T2 на резисторе R3. Благодаря низкому потенциалу коллектора транзистора T2 (точка б) транзистор T3 закрыт. При воздействии сигнала "0" хотя бы на один из входов транзистор T2 закрывается, а транзистор T3 открывается из-за повышения потенциала точки б и работает как эмиттерный повторитель. Диод Д служит для обеспечения режима смещения транзистора T3, т.е. для того, чтобы этот транзистор был закрыт при насыщенном транзисторе T2.

24. Всегда ли в ТТЛ-ключе выходные транзисторы находятся в противоположных состояниях (один открыт, другой заперт)? И если нет, то к чему это ведет?

25. Для чего в выходной цепи ТТЛ-ключа со сложным инвертором установлен диод?

Диод Д служит для обеспечения режима смещения транзистора T3, т.е. для того, чтобы этот транзистор был закрыт при насыщенном транзисторе T2. Прямое напряжение на диоде составляет около 0,5 В и служит для запирания транзистора T3. Это напряжение создается даже при очень малых (порядка микроампер) токах закрытого транзистора T3.

26. Каким образом перевести ТТЛ-ключ в третье состояние и зачем это необходимо?

На рисунке показан ТТЛ-ключ с третьим (высокоимпедансным) состоянием. Это состояние необходимо, так как непосредственное объединение выходов стандартных элементов ТТЛ не представляется возможным, так как может привести к выходу из строя транзисторов выходного усилителя мощности. Появление на выходе хотя бы одного из параллельно включенных элементов сигнала логического "0" переводит остальные элементы, формировать на выходе логическую "1", в режим короткого замыкания по входу, что недопустимо. Избежать этого позволяет третье состояние ТТЛ-ключа. Для организации третьего состояния многоэмиттерный транзистор VT1, выполняющий операцию И, снабжается n-м эмиттером, который через вспомогательный транзисторный ключ VT6 соединен с общей шиной. Для управления транзисторным ключом используется схема, повторяющая входной каскад стандартного ТТЛ. Она включает входной транзистор VT7 и усилитель на транзисторе VT8, включенном по схеме эмиттерного повторителя. Эмиттерный транзистор VT7 является входом управления третьим состоянием элемента (вход z). Его база через резистор R8 соединена с шиной питания, а коллектор подключен к выходу усилителя на транзисторе VT8. Сигнал, снимаемый с резистора R6, управляет состоянием транзисторного ключа VT6. Дополнительно коллектор VT6 через диод VDn+1 подсоединен к базе транзистора VT4 выходного усилителя мощности. При $z = 1$ оба транзистора выходного двухтактного усилителя мощности оказываются запертыми и логический элемент отключается от выходного вывода. Это соответствует высокоимпедансному состоянию, при котором выходной сигнал элемента при любых комбинациях его входных сигналов не попадает на его выход.

27. Что такое ТТЛ-ключ с открытым коллектором и в каких случаях он находит применение?

ТТЛ-ключ с открытым коллектором предназначен для согласования логических схем с внешними исполнительными и индикаторными устройствами, например светодиодными индикаторами, лампочками накаливания, обмотками реле и т.д. его отличие от ТТЛ-ключа со сложным инвертором заключается в выполнении выходного усилителя мощности по одноктактной схеме без собственного нагрузочного резистора. Его принципиальная схема приведена на рисунке. В данном элементе также отсутствует цепь нелинейной коррекции. Это связано с тем, что элемент ставится на выходе логического устройства и к нему в меньшей степени предъявляется требование квантования сигнала. Обычно выходной транзистор VT3 схемы выполняется

с большими допустимыми значениями коллекторного тока и напряжения, чем обычный элемент. В отличие от стандартных ТТЛ-ключ с открытым коллектором допускает параллельное включение выходных выводов. При этом относительно выходных сигналов каждого элемента реализуется логическая операция И.

28. Чем определяется быстродействие ТТЛ-ключа при его включении?

Важнейшим показателем работы электронных ключей является их быстродействие, которое оценивается скоростью протекания переходных процессов при переключении. Мгновенное переключение ТТЛ-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 и максимально уменьшить паразитные емкости. Такими свойствами обладают неинерционные транзисторы. Быстродействие ТТЛ-ключа определяется временем рассасывания заряда и чем быстрее оно происходит, тем быстрее происходит включение ключа.

29. Чем определяется скорость выключения ТТЛ-ключа?

Процесс выключения ключа можно разделить на время рассасывания неосновных носителей в базе и время спада коллекторного тока. При подаче обратного скачка напряжения коллекторный ток остается неизменным, т.к. заряд в базе не может рассосаться мгновенно и транзистор остается в режиме насыщения. Следовательно на скорость выключения ТТЛ-ключа главным образом влияет время рассасывания неосновных носителей в базе. Для ускорения выключению используют форсирующий конденсатор.

30. За счет чего ТТЛ-ключ со сложным инвертором способен работать на значительную емкостную нагрузку?

В ТТЛ-схеме со сложным инвертором постоянная времени заряда нагрузочной емкости существенно уменьшается. За счет этого ТТЛ-схема со сложным инвертором имеет большее быстродействие по сравнению с простым инвертором и может работать на значительную емкостную нагрузку.

31. При каком числе нагрузок (большем или меньшем) оконечный транзистор ТТЛ-ключа дольше выходит из насыщения?

32. С помощью каких характеристик описывается поведение ключей?

Характеристики ключей описываются с помощью следующих характеристик: 1. Амплитудная передаточная характеристика (АПХ) - характеризует изменение выходного напряжения элемента при плавном изменении напряжения на (п-1)-м его входе при условии, что нагрузка остается постоянной. 2. Выходная характеристика - отражает изменение выходного напряжения ключа от тока, протекающего в цепи нагрузки, при неизменной комбинации входных логических переменных. 3. Входная характеристика - отражает зависимость входного тока одного из входов ключа от изменения его входного напряжения, при условии, что на все остальные входы поданы значения пассивного логического уровня, а нагрузка на выходе постоянна.

33. Что такое передаточная характеристика ключа и какие параметры ключа можно из нее извлечь?

На рисунке показана передаточная характеристика инвертирующего ключа (слева) и неинвертирующего (справа). Амплитудная передаточная характеристика (АПХ) - характеризует изменение выходного напряжения элемента при плавном изменении напряжения на (п-1)-м его входе при условии, что нагрузка остается постоянной. Как видно из рисунка по передаточной характеристике можно определить такие параметры ключа как: U_{OVX} , $U_{OVX\ пор}$, $U_{1VX\ пор}$, U_{1VX} , $?U_{+пор}$, $?U_{-пор}$, U_{VYX} , U_{1VYX}

34. Пользуясь какими характеристиками ключа и как можно определить его нагрузочную способность?

Нагрузочная способность ТТЛ-ключа характеризует его способность получать сигнал от нескольких источников информации и одновременно быть источником информации для ряда других элементов. Для численной характеристики нагрузочной способности используют коэффициент разветвления по выходу $K_{раз}$.

Этот параметр определяет число единичных нагрузок - аналогичных ключей, которые можно одновременно

подключить к выходу ключа. $K_{раз}$ - меньший из двух коэффициентов $K_{Ораз}$ и $K_{1раз}$.

Нагрузочная способность

ТТЛ-ключа в состоянии "0" характеризуется параметром $K_{Ораз} = I_{OVYX} / I_{OVX}$, где

I_{OVYX} - выходной ток

логического нуля, I_{OVX} - входной ток логического нуля. Нагрузочная способность ТТЛ-ключа в состоянии "1"

характеризуется параметром $K_{1раз} = I_{вых} / I_{вх}$, где $I_{вых}$ - выходной ток логической единицы, $I_{вх}$ - входной ток логической единицы. Входные токи логических сигналов можно определить по входной характеристике ключа, а выходные токи по выходной характеристике. Следовательно нагрузочную способность ключа можно определить по входным и выходным характеристикам.

35. Каким образом экспериментально можно оценить быстродействие ключа?

Динамические свойства ключа, такие как быстродействие, оцениваются по переходной характеристике. Для этого на один вход системы подают импульсный сигнал, все другие входы системы объединяют и подают на них уровень напряжения, который отключает эти входы (для ТТЛ-ключа это высокий уровень). На выход системы присоединяется нагрузка, в соответствии с коэффициентом разветвления. К параметрам определяющим быстродействие ключа относятся: $t_{0,1зд}$ и $t_{0,0зд}$, $t_{0Дзд}$ распр, $t_{1,0зд}$ распр. Эти параметры можно определить из передаточной характеристики которая показана на рисунке. Однако подчас затруднительно поставить этот эксперимент. Тогда прибегают к упрощенной оценке быстродействия ключа, используя для этого среднее время задержки распространения сигнала; как интервал времени оно равно полусумме задержки распространения сигнала при включении $t_{0Дзд}$ распр и выключении $t_{1,0зд}$ распр. Для оценки $t_{зд.р.ср.}$ собирают цепочку из нечетного числа исследуемых инвертирующих схем и закольцовывают ее. В цепи начинают циркулировать перепады напряжения, периоды следования которых определяется общей задержкой цепи для положительного и отрицательного перепадов напряжения. $t_{зд.р.ср.} = 0,5 T / n$, где T - период колебаний в цепи, n - число элементов (ключей в кольце).

36. Почему в настоящее время широкое распространение имеют ТТЛ, ЭСЛ и КМОП ключи?

Главным элементом импульсных устройств радиотехники, автоматики и вычислительной техники являются электронные ключи (ТТЛ, ЭСЛ и КМОП). Электронный ключ (аналог металлического контакта) - активный элемент (транзистор, тиристор, электровакуумная лампа), включенный в цепь нагрузки и осуществляющий ее коммутацию, т.е. замыкание или размыкание, при воздействии внешнего управляющего сигнала. Дискретные выходные сигналы ключа позволяют использовать ключ не только как коммутатор цепи нагрузки, но и в качестве основного элемента логических схем, реализующих функции булевой алгебры.

37. Как для простейшего однотранзисторного ключа графически определить верхний и нижний уровни выходного напряжения?

Верхний и нижний уровни выходного напряжения для ключа можно определить из его передаточной характеристики (см. рисунок). $U_{0вых}$ - верхний уровень напряжения. $U_{1вых}$ - нижний уровень напряжения.

38. Каким образом на уровни выходного сигнала влияет коэффициент разветвления по выходу?

$K_{раз}$ - меньший из двух коэффициентов $K_{Ораз}$ и $K_{1раз}$. Нагрузочная способность ТТЛ-ключа в состоянии "0" характеризуется параметром $K_{Ораз} = I_{0вых} / I_{0вх}$, где $I_{0вых}$ - выходной ток логического нуля, $I_{0вх}$ - входной ток логического нуля. Нагрузочная способность ТТЛ-ключа в состоянии "1" характеризуется параметром $K_{1раз} = I_{1вых} / I_{1вх}$, где $I_{1вых}$ - выходной ток логической единицы, $I_{1вх}$ - входной ток логической единицы. Как видно из рисунка, чем меньше выходной ток логической "1", тем больше выходное напряжение логической "1" и, чем больше выходной ток логического нуля, тем больше выходное напряжение логического "0". Аналогично определяется зависимость входных токов и напряжений (по входной характеристике). Следовательно, увеличение $K_{1раз}$ приводит к уменьшению $I_{1вых}$, а уменьшение $K_{Ораз}$ - к уменьшению $U_{0вых}$.

Вопросы по ЭСЛ-ключам.

1. Каким образом в ЭСЛ-ключе обеспечивается работа транзисторов в НАО? Всегда ли справедливо это утверждение?

На рисунке показан базовый элемент ЭСЛ. Здесь в отличие от обычного переключателя тока на выходах системы включены эмиттерные повторители. Благодаря малому выходному сопротивлению эмиттерный повторитель повышает нагрузочную способность схемы и ускоряет перезарядку нагрузочной емкости. Транзисторы ЭСЛ-схемы работают в активном режиме, что исключает время рассасывания носителей заряда в базе транзистора, т.е. существенно повышает быстродействие схемы. В отсутствие эмиттерных повторителей активный режим работы транзисторов обеспечить крайне сложно, так как коллектор транзистора основной схемы оказывается непосредственно связан с базой входного транзистора входного транзистора нагрузочной схемы, что неизбежно приводит к насыщению последнего. В случае применения эмиттерных повторителей напряжение на базе открытого нагрузочного транзистора равно: $U_{б1 \text{ нагр}} = U_{1 \text{ вых}} - U_{бэ3}$, т.е. сдвинуто по отношению к коллекторному напряжению основного транзистора VT1 на величину падения напряжения на эмиттерном переходе повторителя $U_{бэ3}$. Для обеспечения активного режима нагрузочного транзистора необходимо сместить коллекторный переход в обратном направлении, т.е. выполнить условие: $U_{к1 \text{ нагр}} \geq U_{б1 \text{ нагр}}$. Нарушение этого условия приводит к насыщению транзисторов.

2. Чем определяются уровни и перепад напряжения у ЭСЛ-ключа?

Для ЭСЛ-ключа можно записать: $U_{ог} \leq U_{э3}^*$ (для обеспечения активного режима нагрузочного транзистора). Отсюда следует, что логический перепад сигнала в ЭСЛ-схеме не может превышать $U_{бэ3} = 0,8 \text{ В}$. Нарушение условия * приводит к насыщению транзисторов. Малый логический перепад ЭСЛ-схемы обуславливает и ее малую помехоустойчивость. Однако в отличие от ТТЛ в ЭСЛ-схемах практически отсутствует генерация помех, поэтому малая помехоустойчивость практически не ограничивает применение этой схемы в радиоэлектронной аппаратуре. Недостатком ЭСЛ-схемы с заземленной минусовой шиной является зависимость логических уровней выходного сигнала от напряжения источника питания. Кроме того, при коротком замыкании выходной шины на "землю" транзистор эмиттерного повторителя выходит из строя. Как строится источник опорного напряжения в ЭСЛ-ключах?

Зачем в ЭСЛ-ключах используют эмиттерные повторители?

Благодаря малому выходному сопротивлению эмиттерный повторитель повышает нагрузочную способность схемы и ускоряет перезарядку нагрузочной емкости. Транзисторы ЭСЛ-схемы работают в активном режиме, что исключает время рассасывания носителей заряда в базе транзистора, т.е. существенно повышает быстродействие схемы. В отсутствие эмиттерных повторителей активный режим работы транзисторов обеспечить крайне сложно, так как коллектор транзистора основной схемы оказывается непосредственно связан с базой входного транзистора входного транзистора нагрузочной схемы, что неизбежно приводит к насыщению последнего. В случае применения эмиттерных повторителей напряжение на базе открытого нагрузочного транзистора равно: $U_{б1 \text{ нагр}} = U_{1 \text{ вых}} - U_{бэ3}$, т.е. сдвинуто по отношению к коллекторному напряжению основного транзистора VT1 на величину падения напряжения на эмиттерном переходе повторителя $U_{бэ3}$. Для обеспечения активного режима нагрузочного транзистора необходимо сместить коллекторный переход в обратном направлении, т.е. выполнить условие: $U_{к1 \text{ нагр}} \geq U_{б1 \text{ нагр}}$. Нарушение этого условия приводит к насыщению транзисторов.

5. Почему в ЭСЛ-ключе коллекторные резисторы переключателя тока имеют разные сопротивления?

Особенностью схемотехнического построения элементов ЭСЛ является использование для подключения общей шины питания собственно токового переключателя и выходных эмиттерных повторителей различных выводов

ИС. Потребляемый ток, протекающий в этих цепях, имеет качественно различный характер. Совместное питание этих цепей из-за малой величины логического перепада

может приводить к ложному срабатыванию соседних элементов. Из этого и следует различие в сопротивлениях коллекторных резисторов переключателя тока.

Почему ЭСЛ-ключи в ряде случаев питаются от двух источников напряжения (не считая U_{on})?

Особенностью схемотехнического построения элементов ЭСЛ является использование для подключения общей

шины питания собственно токового переключателя и выходных эмиттерных повторителей различных выводов

ИС. Потребляемый ток, протекающий в этих цепях, имеет качественно различный характер. Совместное

питание этих цепей из-за малой величины логического перепада может приводить к ложному срабатыванию

соседних элементов. Раздельное питание токовых ключей и эмиттерных повторителей позволяет решить эту

задачу, а также задачу снижения мощности, рассеиваемой в реальной аппаратуре.

Применяют ли в ЭСЛ-ключах ГСТ, и если да, то с какой целью и где?

Ядром ЭСЛ-ключа является дифференциальный усилитель, а для улучшения его свойств вместо эмиттерного резистора ставят ГСТ, имеющий очень большое сопротивление.

8. Почему уровень выходного сигнала у ЭСЛ-ключа мало зависит от числа нагрузок?

Так как на выходе ЭСЛ-схемы используются эмиттерные повторители, то выходное сопротивление элемента крайне мало и его выходные характеристики почти горизонтальны. Следовательно уровень выходного сигнала мало зависит от числа нагрузок.

9. Как назначаются параметры резисторов ЭСЛ-ключей?

Основой ЭСЛ-ключа является токовый ключ, выполненный на двух транзисторах. На базу одного из них подано некоторое постоянное опорное напряжение. Изменение напряжения, подаваемого на вход X_0 ниже или выше опорного приводит к перераспределению постоянного тока $I_э$, заданного токостабилизирующим резистором $L_э$. При этом необходимо, чтобы резистор R_3 имел как можно более высокое сопротивление. Но его сопротивление имеет ограничение связанные с максимально допустимым напряжением питания $-U_n$. Быстродействие ЭСЛ-ключа весьма велико, так как, во-первых, транзисторы не заходят в область насыщения, а во-вторых, мал логический перепад напряжений между значениями логического "0" и "1". Последнее реализовано выбором малых сопротивлений резисторов R_{k1} и R_{k2} схемы, что крайне полезно с точки зрения уменьшения постоянной времени перезарядки выходной емкости транзистора.

10. Генерирует ли ЭСЛ-ключ помехи в цепях питания при переключении?

Ядро ЭСЛ-ключа составляет дифференциальный усилитель, работающий в режиме большого сигнала. Следовательно потребляемый им ток не меняется при переключении, а значит ЭСЛ-ключ не создает помех в шине питания при переключении.

Чем определяется допустимое число нагрузок у ЭСЛ-ключа?

Каково входное сопротивление ЭСЛ-ключа?

Почему ЭСЛ-ключи называют токовыми переключателями?

ЭСЛ-ключи называются токовыми переключателями, так как их основой является токовый ключ, выполненный на двух транзисторах.

Почему в ЭСЛ-ключах при их изготовлении резистор $R_э$ эмиттерного повторителя не подсоединяется к

эмиттеру?

Какие из задержек распространения сигнала $t_{зад}$ или $t_{зад}$ в ЭСЛ- ключе больше и почему?

16. Если увеличить значительно число нагрузок на ЭСЛ-ключ, как изменится и какая из составляющих задержки распространения сигнала?

Каким образом можно изменить задержку распространения сигнала через переключатель тока ЭСЛ ключа?

Инерционность, обусловленная временем рассасывания биполярного транзистора, в ЭСЛ-ключе отсутствует,

поэтому повышение быстродействия может быть достигнуто только уменьшением входной емкости и

суммарной емкости коллекторного узла схемы. Данный способ реализован в так называемых элементах ЭСЛ.

Идея их построения состоит в отказе от применения эмиттерных повторителей в выходной цепи элемента и

перенесение их в его входную цепь. При этом емкость эмиттерного повторителя уменьшается в $h_{21Э}$ раз.

Другим способом повышения быстродействия является уменьшение уровня логического перепада и

напряжения питания. Это решение использовано при построении малосигнальной ЭСЛ.

Какие составляющие у задержки распространения сигнала через ЭСЛ-ключ?

У задержки распространения сигнала через ЭСЛ-ключ есть несколько составляющих: - задержка за счет

входной емкости ключа - задержка за счет суммарной емкости коллекторного узла схемы - задержка из-за

нагрузочной емкости эмиттерного повторителя.

Ключи на униполярных транзисторах

1. В каких областях и почему там находится рабочая точка переключательного и нагрузочного транзистора ключе К-МОП типа?

Схема комплементарного ключа показана на рисунке справа. У такого ключа транзистор Т2 называется

нагрузочным, а Т1 - переключательным. Пусть в исходном состоянии управляющее напряжение равно 0, значит

п-канальный транзистор Т1 заперт, а р-канальный транзистор Т2 открыт. Открытый транзистор Т2 работает в

квазилинейном участке характеристики, где и находится его рабочая точка. Если управляющее напряжение

принимает положительное значение, то теперь п-канальный транзистор Т1 открыт, а р-канальный транзистор

Т2 заперт. При этом ток в общей цепи по-прежнему остается на уровне $I_{уст}$, хотя транзисторы поменялись местами. Транзистор Т1 работает на пологом участке характеристики.

2. Почему в ключах на униполярных транзисторах как правило не используют линейные резисторы?

При создании интегральных схем в качестве сопротивления нагрузки R_c часто используют МДП-транзисторы, что позволяет существенно уменьшить площадь, занимаемую ключом и сделать элементы ТК идентичными и сократить количество технологических операций при изготовлении, а также снизить стоимость микросхем и улучшить энергетические параметры и передаточные характеристики. МДП-транзистор, включенный нагрузкой, в общем случае представляет собой нелинейное сопротивление.

3. Какие из ключей на МДП транзисторах потребляют наименьшую мощность в статике? А в динамике чем определяется рассеиваемая ими мощность?

Недостатком транзисторных ключей на МДП-транзисторах состоит в том, что во включенном состоянии транзистора через ключ протекает постоянный ток, который

пропорционален сопротивлению нагрузки в цепи стока транзистора. Но для переключения МДП-транзистора достаточно лишь перезарядить его входную емкость. Вследствие этого постоянная составляющая этого тока, протекающего через включенный транзистор, является бесполезной и лишь приводит к перегреву транзистора. От данного недостатка свободен ключ, выполненный на комплементарных МДП-транзисторах. У КМОП-ключа отсутствует интервал, на котором насыщены оба транзистора. И следовательно энергия, отбираемая от источника питания, расходуется только на заряд входной емкости. Следовательно эта мощность для используемых транзисторов сведена до минимально возможной. Таким образом КМОП-ключи отличаются от других ключей на полевых транзисторах достижением максимально высокого быстродействия при минимальной рассеиваемой мощности.

4. Что собой представляет ключ с квазилинейной нагрузкой на МДП транзисторах? Чем определяется его быстродействие?

Ключ с квазилинейной нагрузкой это ключ у которого нагрузочный резистор выполнен на основе МДП-транзистора, который работает как квазилинейная нагрузка. Формирование фронта у такого ключа происходит в период заряда емкости через нелинейную нагрузку. Заряд емкости будет проходить медленнее, чем при резисторной нагрузке, а время τ_f будет больше. В данном ключе в состав нагрузочной емкости следует дополнительно включить емкость $C_{зи2}$, а в интегральных схемах - еще и емкость $C_{ип2}$. Поскольку по сравнению с резисторной нагрузкой τ_f возросло, а τ_c осталось тем же, то можно сделать вывод, что в ключах с квазилинейной нагрузкой быстродействие определяется длительностью фронта.

5. Что нужно предпринять, чтобы на выходе униполярного ключа остаточное напряжение было бы как можно меньше?

Остаточное напряжение вычисляется по формуле $U_{ост} = b_2/2b_1 * (E_c - U_{02})/(E_{+3} - U_{01})$. Поскольку на практике всегда выполняется условие $E_{+3} \leq E_c$, то для того, чтобы остаточное напряжение было мало, в ключе с динамической нагрузкой должно выполняться соотношение $b_2 \ll b_1$, т.е. транзисторы должны быть существенно различимы. Удельная крутизна b определяется в первую очередь геометрией транзистора, а именно, отношением ширины к длине канала Z/L . Значит у активного транзистора это отношение должно быть как можно большим, а у нагрузочного - как можно меньшим. Чем определяется нагрузочная способность ключей на МДП транзисторах?

Одинаковы ли фронт и срез выходного сигнала у К-МОП ключа? Как они исчисляются?

В комплементарном ключе переходные процессы характерны тем, что заряд и разряд нагрузочной емкости C_n происходит примерно в одинаковых условиях. Это объясняется симметрией схемы по отношению к запирающему и отпирающему сигналу.

Соответственно длительности фронта и среза определяются одностипными напряжениями и следовательно их длительность оказываются одинаковыми. $\tau_f = 3 E_c C_c / [b_2 (E_c - |U_{01}|)]$ $\tau_c = 3 E_c C_c / [b_2 (E_c - |U_{02}|)]$ В формулах индексы 1 и 2 призваны подчеркнуть различие параметров n- и p- канального транзисторов.

8. У какого ключа КМДП-типа 2И-НЕ или 2ИЛИ-НЕ (логика положительная) больше длительность фронта и почему?

На рисунке показаны принципиальные электрические схемы БЛЭ на МДП- транзисторах, реализующие операцию 2И-НЕ (а) и 2ИЛИ-НЕ (б). Обе схемы содержат по три транзистора, из которых VT_1 выполняет роль активной нагрузки, а VT_2 и VT_3 являются собственно транзисторными ключами, реализующие логические операции. В схеме, реализующей логическую операцию 2И-НЕ, транзисторы VT_2 и VT_3 включены последовательно, а в схеме, реализующей логическую операцию 2ИЛИ-НЕ, транзисторы VT_2 и VT_3 включены параллельно. Отсюда следует, что большую длительность фронта будет иметь схема, реализующей логическую операцию 2И-НЕ, так как τ_f для двух последовательных транзисторов больше, чем для параллельных.

9. Как повысить быстродействие КМДП-ключа?

Для КМДП-ключа главным путем повышения быстродействия является уменьшение суммарной емкости C_c . При заданной емкости быстродействие повышается с увеличением токов, в частности, - с увеличением питающего напряжения.

10. Одинаковы ли фронт и срез у КМДП ключа?

В комплиментарном ключе переходные процессы характерны тем, что заряд и разряд нагрузочной емкости C_n происходит примерно в одинаковых условиях. Это объясняется симметрией схемы по отношению к запирающему и отпирающему сигналу. Соответственно длительности фронта и среза определяются однотипными напряжениями и следовательно их длительность оказываются одинаковыми.

Вопросы по ключам интегральной инжекционной логики (ИИЛ)

1. Где и для чего в ИИЛ ключах применяются многоколлекторные транзисторы? Что они собой представляют (свойства, параметры, физическая структура).

На рисунке показаны: (а) - срез топологии; (б) - принципиальная электрическая схема ИИЛ ключа. В приведенной схеме многоколлекторный транзистор VT2 выполняет функцию инвертирования входного сигнала. Транзистор VT2 образован вертикальной структурой, причем, так как площадь каждого коллектора транзистора VT2 меньше площади его эмиттера, то этот транзистор работает в инверсном режиме, что способствует уменьшению его напряжения насыщения.

2. Какую логическую функцию выполняет базовый элемент ИИЛ? Как организовать на его основе функционально-полную систему элементов?

С использованием ИИЛ ключа могут быть реализованы основные логические операции И-НЕ и ИЛИ-НЕ. На рисунке показана реализация логических операций 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ на БЛЭ ИИЛ. Особенностью элементов ИИЛ является возможность параллельного включения нескольких их выходов. Из приведенной схемы следует, что при параллельном включении нескольких выходов в общей точке относительно входных переменных реализуется логическая операция ИЛИ-НЕ. Относительно же выходных сигналов элементов реализуется логическая операция И. После инвертирования результата выполняется логическая операция ИЛИ-НЕ дополнительным элементом относительно исходных входных элементов реализуется логическая операция ИЛИ, а относительно выходных сигналов первых элементов - операция И-НЕ.

3. В каком режиме работает транзистор инжектора в ИИЛ ключе?

К особенностям работы ИИЛ ключа относится то, что ток инжектора всегда постоянен, вне зависимости от режима работы схемы. Также возможно варьировать ток инжектора в широких пределах, изменяя быстродействие ключа. Реально ток инжектора может изменяться от 1 нА до 1 мА. В таких же пределах может меняться и быстродействие схемы. Инжекционный ток равен $I_{э} = U_n/R$. Следовательно для выполнения этого условия транзистор инжектора должен находиться в активной области.

4. Почему транзисторные ключи с инжекционным питанием имеют источник питания с самой маленькой ЭДС среди всех ключей? Какой?

Для создания инжекционного тока достаточно сместить транзистор инжектора в прямом направлении, т.е. приложить к нему прямое напряжение $U_{э} > U_{пор}$. Поскольку база транзистора инжектора заземлена, то напряжение питания $E_k = U_{э}$ составляет всего 0,7 - 0,8 В, что является одним из главных преимуществ ИИЛ схемы.

Какие требования предъявляются по коэффициенту усиления к транзисторам ключей ИИЛ и почему такие?

Нагрузочная способность ИИЛ схемы при реализации функции И-НЕ определяется количеством коллекторов

многоколлекторного транзистора. При этом подключение каждой нагрузочной схемы увеличивает

коллекторный ток транзистора на $G_{ки}$, что может привести к его выходу из насыщения.

При подключении n нагрузочных схем к коллектору транзистора условие насыщения транзистора $I_{B1} V_1 \geq I_{K1}$ можно записать в виде $I_{K1} V_{lmin} > n I_{K1}$ или $V_{lmin} > n$. Если при работе схемы в наноамперном диапазоне токов $V_{lmin} = 1,5$, то $n = 1$, т.е. к коллектору этого транзистора можно подключить только одну нагрузку.

Повышение V_{lmin} в современных ИИЛ схемах осуществляется за счет усовершенствования технологий, так как при увеличении рабочего тока транзистора для обеспечения высоких значений V теряется одно из главных преимуществ ИИЛ схемы - малое потребление мощности.

В каких областях может находиться рабочая точка транзисторов ИИЛ- ключей?

Почему микросхемы на ИИЛ-ключах занимают очень маленькую площадь на подложке?

Из рисунка видно, что транзистор $VT1$ образован планарной структурой, а многоколлекторный транзистор $VT2$ - вертикальной структурой. Причем, так как площадь каждого коллектора транзистора $VT2$ меньше площади его эмиттера, этот транзистор, по сути, работает в инверсном режиме уменьшению его напряжения насыщения. Все это позволяет разместить весь элемент ИИЛ на площади, занимаемой в схеме ТТЛ одним многоэмиттерным транзистором.

8. Чем определяется быстродействие ИИЛ ключей?

Быстродействие ИИЛ схемы определяется в основном перезарядом паразитных емкостей, шунтирующих выходные цепи n - p - n транзисторов, и временем рассасывания неосновных носителей в базе насыщенного транзистора, которое для ИИЛ схемы составляет 10-50 нс. Время переходных процессов при переключении транзисторов ИИЛ схемы уменьшается при увеличении рабочего тока коллектора. Однако при этом возрастает потребляемая схемой мощность.