

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. А.Н.ТУПОЛЕВА

Кафедра радиоэлектроники и информационно-  
измерительной техники

ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРОВ ИС  
В РЕЖИМЕ КЛЮЧА

Методические указания к лабораторной работе N 211

Казань-2010

УДК 621.38.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРОВ ИС В РЕЖИМЕ КЛЮЧА.

Методические указания к лабораторной работе N 211 «Исследование работы транзисторов ИС в режиме ключа», И.К. Насыров, Л.И. Климова, Л.М. Урманчиев, Н.Б.Куншина. Казанский гос. техн. ун-т, Казань, 2010, 17с.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - экспериментальное изучение характеристик и параметров ключей ИМС.

Простейшие транзисторные ключи лежат в основе построения цифровых схем.

Ключи характерны двумя устойчивыми состояниями: разомкнутым и замкнутым.

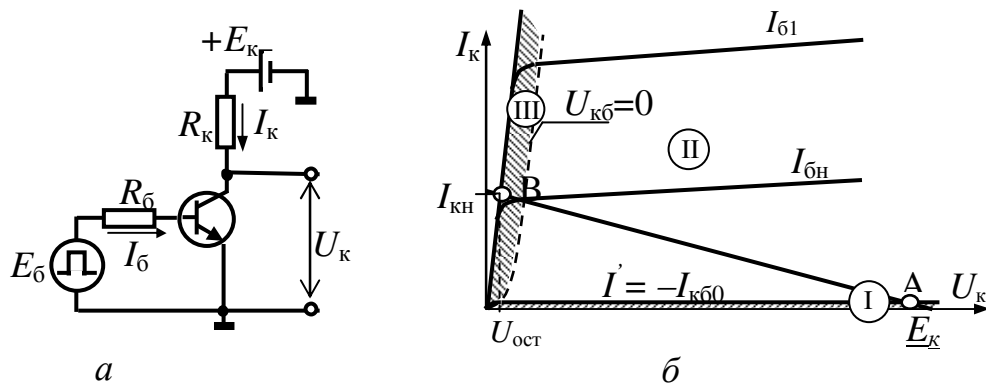


Рис. 1

На рис.1,а показана схема простейшего транзисторного ключа. Управляемой (прерываемой) является коллекторная цепь с источником питания  $E_k$  и нагрузкой в виде резистора.

На рис.1б показаны рабочие точки ключа А и В на выходных характеристиках транзистора. Точка А находится в области отсечки (выключения) I, когда эмиттерный и коллекторный переходы смещены в обратном направлении, токи малы и можно считать, что  $U_{бэ} = E_б$  и  $U_{кэ} = E_k$ . Точка В – в области насыщения (включения) III, когда оба перехода смещены в прямом направлении и транзистор работает в режиме двойной инжекции. В ключевых схемах транзистор находится в активном режиме (область II), когда эмиттерный переход смещен в прямом направлении, коллекторный в обратном, лишь в переходном состоянии. Граница между областями II и III определяется условием  $U_{кб} = 0$ . На рис. 1б показана выходная характеристика при токе базы  $I_{бн}$ , соответствующей этой границе.

Для перевода транзистора в режим насыщения необходимо выполнить условие  $I_б \geq I_{бн}$ , где  $I_{бн}$ , отпирающий ток базы, соответствующий границе режима насыщения:

$$I_{бн} = \frac{I_{кн}}{\beta} \approx \frac{E_k}{\beta R_k}, \left( I_{кн} \approx \frac{E_k}{R_k} \right),$$

где  $\beta$  (заглавная буква «бета») – коэффициент передачи тока базы в режиме большого сигнала.

Отдельные ключи используются главным образом в аналоговых схемах. Для цифровых схем характерна совместная работа нескольких ключей – *ключевые цепочки*.

Свойства ключей удобно пояснить с помощью передаточных характеристик, описывающих зависимость выходного напряжения от входного. На рис.2 показана типичная передаточная характеристика инвертирующего ключа, у которой низким входным напряжениям соответствуют высокие выходные. Характеристика неинвертирующей схемы, у которой низким входным напряжениям соответствуют низкие выходные, выглядит зеркально отраженной. Участок передаточной характеристики между точками «а» и «b» соответствует активному режиму транзистора, режиму усиления. В точке А ключ разомкнут и на нем падает большое напряжение, у одиночного ключа близкое к напряжению питания  $E_K$ , (уровень логической единицы  $U^1$ ), а в точке В ключ замкнут и падение напряжения  $U_{ост}$  на нем мало (уровень логического нуля  $U^0$ ).

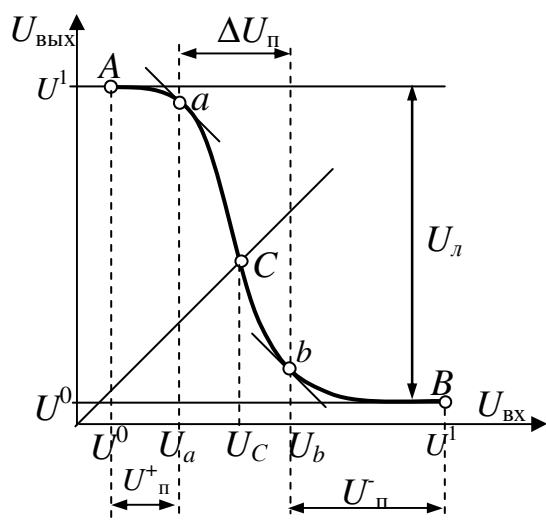


Рис. 2

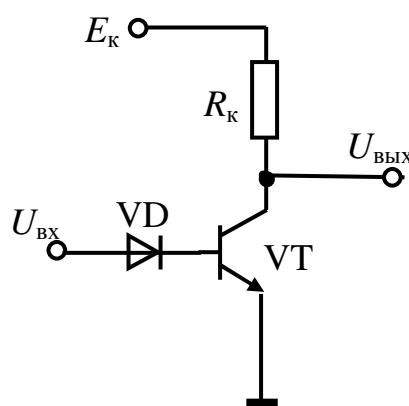


Рис. 3

Основные статические параметры ключа следующие:

$U_C$  – порог чувствительности (переключения) – напряжение в точке пересечения биссектрисы координатного угла с характеристикой передачи при одинаковых масштабах на осях координат. В этой точке  $U_{вых}=U_{вх}$ ;

$U^0, U^1$  – потенциалы, соответствующие логическому нулю и логической единице;

$U_{л} = U^1 - U^0$  – логический перепад напряжения при переключении;

$U_a, U_b$  – границы активного режима, определяемые по условию

$$K = \frac{\partial U_{вых}}{\partial U_{вх}} = 1$$

$\Delta U_{п}$  – ширина активной зоны переключения,  $\Delta U_{п} = U_b - U_a$ .

$P_{пот}^0, P_{пот}^1, P_{пер}$  – потребляемая мощность в состоянии логического нуля, логической единицы на выходе и при переключении;

$$P_{пот\ ср} = \frac{P_{пот}^1 + P_{пот}^0}{2} \text{ – средняя потребляемая мощность;}$$

$U_{п}^+, U_{п}^-$  – максимальная величина положительной и отрицательной помехи, не вызывающей ложного переключения:  $U_{п}^+ = U_a - U^0, |U_{п}^-| = U^1 - U_b$ ,

Нечувствительность ключа к паразитным сигналам, могущим вызвать ложное переключение, называют помехозащищенностью или помехоустойчивостью. Помехоустойчивость ключа принято измерять абсолютной величиной помехи (в вольтах), не вызывающей ложного переключения ключевой схемы. Помехоустойчивость по отношению к сигналам положительной и отрицательной полярности может быть существенно разной. При анализе помехоустойчивости предполагается, что ключ работает в последовательной ключевой цепочке.

Если сигнал положительной помехи будет меньше  $U_a$ , то коэффициент усиления  $K < 1$  и входной сигнал ослабляется, и нет опасности ложного переключения. Если же  $U_{вх} = U^0 + U_{п}^+ > U_a$ , то сигнал попадает в область, где  $K > 1$  и «верхушка» импульса  $U_{вх} - U_a$  усиливается, что при наличии обратных связей может привести к ложному переключению. Все вышесказанное справедливо и для отрицательной помехи. Отрицательная помеха действует на вход замкнутого ключа, на который подано  $U_{вх} = U^1$ , и «верхушка» импульса помехи не должна попадать в область активного режима, т.е. должно быть  $U^1 - U_{п}^- \geq U_b$ , отсюда  $|U_{п}^-| = U^1 - U_b$ .

Критерий помехоустойчивости: малая –  $U_{п} \approx 0,2 \div 0,3В$ ; средняя –  $U_{п} \approx 0,5 \div 1В$ ; большая –  $U_{п} \geq 1В$ .

Для увеличения помехозащищенности схемы могут быть использованы ключи с диодом в цепи базы (рис. 3). Включение диода увеличивает  $U_{п}^+$  на величину напряжения открытого кремниевого  $p-n$ -перехода  $U^* = (0,6 \div 0,7)В$

Типичным для ключевых схем ИМС является сочетание последовательного и параллельного соединения ключей (рис.4).

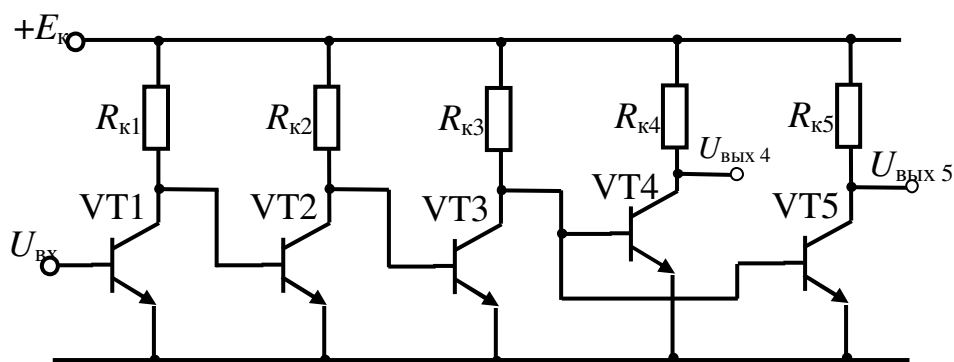


Рис. 4

При последовательном соединении каждым ключом управляет предыдущий и сам он, в свою очередь, управляет последующим. Для последовательной цепочки характерно чередование открытых и закрытых ключей. Например, если транзистор VT1 открыт и насыщен, то потенциал  $U_{к1}$  и равный ему потенциал  $U_{б2}$  близки к 0 и транзистор VT2 заперт. Тогда в базу транзистора VT3 протекает ток от источника  $E_k$  через резистор  $R_k$  и транзистор VT3 открыт. Ключевая цепочка должна работать как единое целое: изменение состояния первого ключа должно приводить к переключению всех остальных, для этого входной

сигнал должен превысить порог чувствительности  $U_C$ , иначе сигналы в цепочке “затухают” и ключи, удаленные от первого, не меняют своего состояния.

Напряжение на ключе, работающем в цепочке, меняется в более узких пределах, чем на отдельном ключе. Это обусловлено тем, что коллектор запертого транзистора соединен с базой следующего, открытого транзистора. Для интегральных транзисторов  $U^1 = U^* \approx 0,7 \text{ В}$ ,  $U^0 \approx 0,05-0,1 \text{ В}$ .

При параллельном включении ключей (рис.4) общий ток  $I_B$  делится между базами степень насыщения уменьшается. Количество параллельно включенных ключей, которыми способен управлять данный ключ, называется нагрузочной способностью ключа (это количество обозначается через  $n$ ).

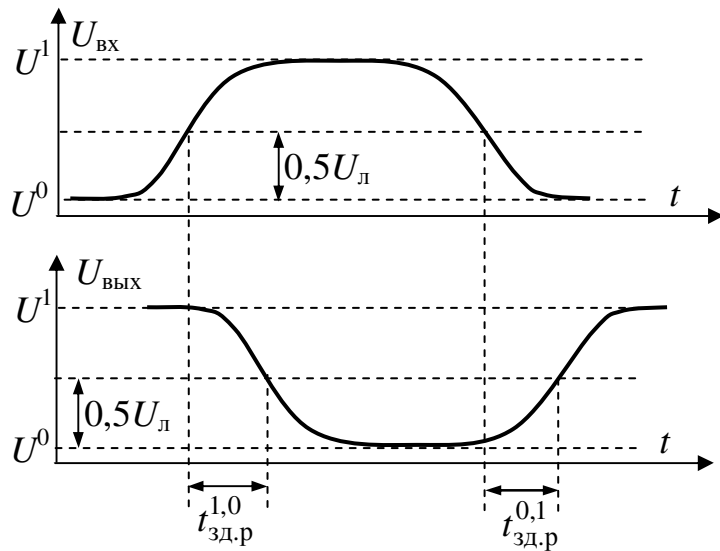


Рис. 5

Переходная характеристика ключа (рис. 5) показывает время перехода из состояния "1" в состояние "0" и наоборот и позволяет определить быстродействие схемы и задержку сигнала в ключевой схеме. Быстродействие оценивается средним временем задержки распространения, определяемого по формуле,  $t_{зд.р.ср.} \approx 0,5(t_{зд.р.}^{1,0} + t_{зд.р.}^{0,1})$ , где  $t_{зд.р.}^{1,0}$ ,  $t_{зд.р.}^{0,1}$  – время задержки распространения при переходе напряжения на выходе ключа от напряжения логической единицы "1" к напряжению логического нуля "0" и от напряжения логического нуля "0" к напряжению логической единицы "1", измеренное на уровне 0,5 логического перепада напряжения.

### КЛЮЧ С НЕЛИНЕЙНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Одной из главных проблем при повышении быстродействия ключей является уменьшение задержки выключения транзистора, т.е. времени-рассасывания накопленных неосновных носителей заряда в базе транзистора. Эта задача успешно решается в схеме ключа с нелинейной обратной связью (транзистор с барьером Шоттки) (рис.6). В этом транзисторе между областями базы и коллектора создан выпрямляющий контакт металл-полупроводник –

контакт Шоттки, который отпирается при меньшем напряжении (0,3-0,4 В), чем кремниевый *p-n*-переход:  $U^* = 0,7$  В.

Когда транзистор заперт или работает в активном режиме, потенциал коллектора положителен относительно базы. Следовательно, диод находится под обратным смещением и не влияет на работу ключа. Когда в процессе отпира-

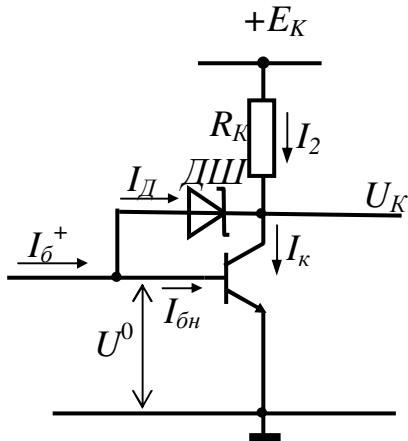


Рис. 6.

рания транзистора, потенциал коллектора относительно базы проходит через нуль и становится отрицательным, диод Шоттки открывается и избыточная часть входного тока  $I_{б+} - I_{бн}$  ответвляется через открытый диод в цепь коллектора, ток базы уменьшается до значения, соответствующего границе режима насыщения  $I_{бн}$ , поскольку при прямых напряжениях 0,3-0,4 В инжекция из коллектора ничтожна. Таким образом, в базе практически не накапливаются неравновесные носители, и при обратном переключении отсутствует время рассасывания.

Остаточное напряжение на ключе с барьером Шоттки несколько больше, чем на обычном ключе:  $U^0 = U_{ост} = U^* - U_{Д.} = 0,2 \div 0,3$  В.

Этот недостаток окупается более высоким быстродействием, поскольку транзистор все время работает в активном режиме.

## ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ ТОКА

Переключателем тока называют симметричную схему, в которой заданный ток  $I_0$  протекает через ту или иную ветвь в зависимости от потенциала  $U_B$  на одном из входов, потенциал  $E_0$  на втором входе поддерживается неизменным (рис.7).

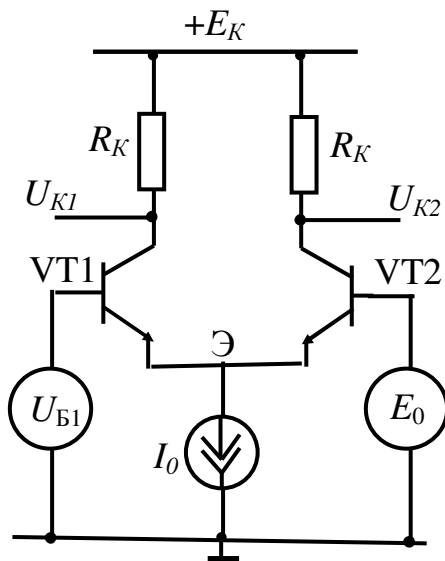


Рис. 7.

Первая особенность переключателя тока состоит в том, что управление осуществляется не током, а напряжением. Вторая особенность состоит в использовании ненасыщенного (активного) режима транзистора в открытом состоянии, что обесценивает повышенную скорость переключения в связи с отсутствием задержки на рассасывание.

Рассмотрим работу ключа. Положим сначала  $U_{B1} = +E_0$ . При этом открыты оба транзистора и в каждом протекает ток  $I_1 = I_2 = 0,5I_0$ . Потенциал эмиттера  $U_Э = E_0 - U^*$ . Если уменьшить потенциал базы  $U_{B1}$  на величину  $-\Delta E \geq 0,1$  В то, поскольку потенциал  $U_Э$  не меняется, так как генератор тока считаем идеальным, напряжение  $U_{BЭ1}$  уменьшится на величину  $-\Delta E$ , при

этом ток коллектора  $I_1$  уменьшится в десятки раз и транзистор VT1 запрется. Через транзистор VT2 будет протекать полный ток  $I_0$ .

Если увеличить потенциал базы  $U_{B1}$ , на величину  $+\Delta E$ , то это равносильно увеличению потенциала эмиттера на  $+\Delta E$ , поскольку ток  $I_0$  не меняется. Это вызовет уменьшение напряжения  $U_{BЭ2}$ , резко уменьшится ток коллектора  $I_2$ , транзистор VT2 запрется, и весь ток потечет через транзистор VT1. Величины  $E_b^- = E - \Delta E$  и  $E_b^+ = E + \Delta E$  называются запирающим и отпирающим потенциалами соответственно.

Таким образом, перепад потенциала  $\Delta E_{B1} = \pm \Delta E$  около средней величины  $E$  обеспечивает переключение тока  $I_0$  из одного транзистора в другой.

## МДП-ТРАНЗИСТОРНЫЕ КЛЮЧИ

Известны три разновидности МДП-транзисторных ключей: с резистивной нагрузкой, с динамической (транзисторной) нагрузкой и комплементарные (КМДП) ключи. В статическом режиме они характеризуются теми же параметрами, что и биполярные ключи: остаточным током в запертом состоянии и остаточным напряжением в открытом состоянии.

### *Ключ с резистивной нагрузкой.*

На рис.8а показана схема ключа на транзисторе с индуцированным n-каналом и на рис.8б расположение рабочих точек на выходной характеристике. На рис.8а показана также емкость  $C_H$ , на которую нагружена выходная цепь

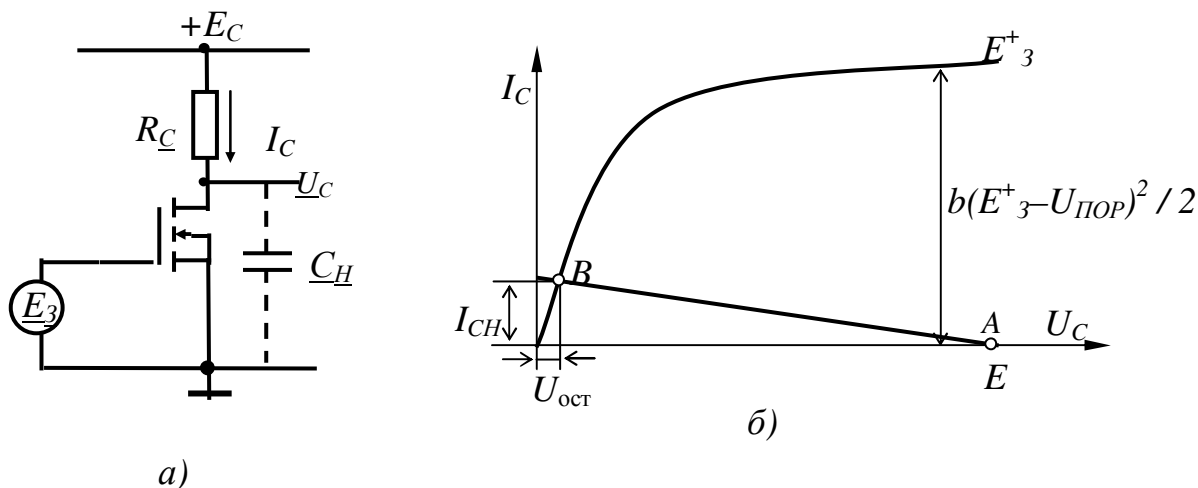


Рис.8

транзистора, которая определяет быстродействие ключа. В эту емкость кроме емкости нагрузки входит также емкость  $C_{СП}$  самого транзистора. Этот ключ был рассмотрен ранее при анализе ключевого режима работы полевых транзисторов.

Напомним статические параметры этого ключа:



Остаточный ток в запертом состоянии (в точке А)  $I_{ост}$  составляет не более  $10^{-9} - 10^{-10}$  А. При таких значениях остаточного тока падением напряжения  $I_C R_C$  можно пренебречь и считать, что максимальное напряжение на запертом ключе  $U_{max} = +E_C$ . Для отпирания ключа на затвор подается напряжение больше порогового:  $E_3^+ > U_{пор}$ . Это напряжение должно быть достаточно большим, чтобы рабочая точка В соответствовала как можно меньшему остаточному напряжению, тогда рабочий ток открытого ключа (ток насыщения) определяется только внешними элементами схемы:

$$I_{CH} = (E_C - U_{ост}) / R_C \approx E_C / R_C.$$

Остаточное напряжение открытого ключа  $U_{ост}$  равно

$$U_{ост} = \frac{E_C}{b(E_3^+ - U_{пор})R_C},$$

где  $b$  – удельная крутизна транзистора. Для уменьшения  $U_{ост}$  необходимо увеличивать  $b$ ,  $R_C$  и  $E_3^+$ . Принципиальных ограничений на величину  $U_{ост}$  нет, что является важным преимуществом МДП транзисторных ключей перед биполярными, у которых  $U_{ост}$  принципиально ограничено напряжением  $U_{КЭ}$ . Однако и увеличение  $b$ , и увеличение  $R_C$  приводят к увеличению площади, занимаемой схемой, что в полупроводниковых ИС нежелательно. Поэтому на практике принимают компромиссное решение.

### Ключ с динамической нагрузкой.

В этом ключе (рис.9а) в качестве динамической нагрузки используется

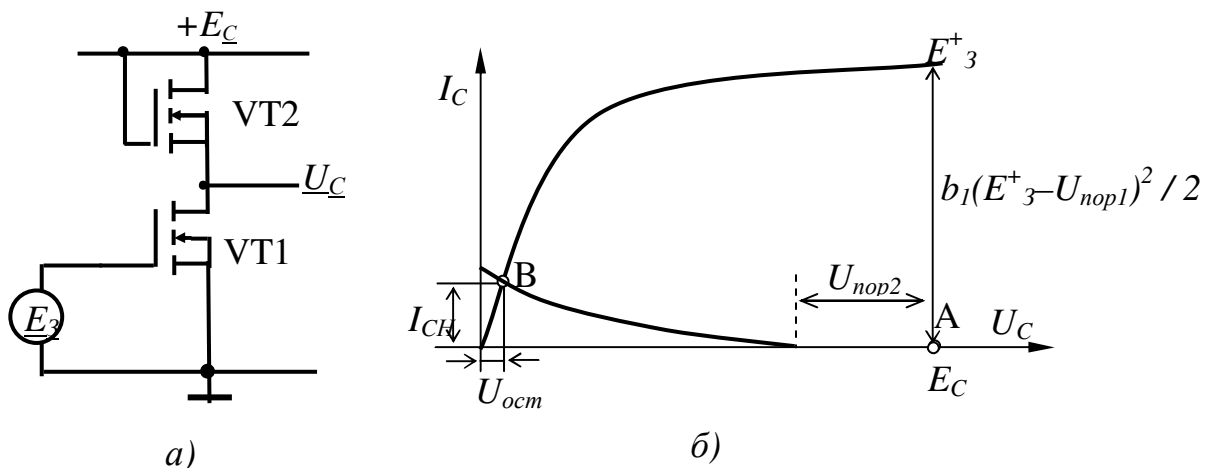


Рис.9

транзистор VT2, у которого затвор соединен со стоком и, таким образом, он является двухполюсником. Транзистор VT2 называется нагрузочным, VT1 – активным.

Транзистор VT2 работает на пологом участке выходной характеристики, в режиме насыщения, что видно из следующих соотношений:

$$U_{cu2} = U_{zu2} > U_{zu2} - U_{nop2} = U_{нас2}$$

Отсюда следует, что ВАХ нагрузочного транзистора является нелинейной:

$$I_{C2} = \frac{b_2}{2} (U_{CH2} - U_{nop2})^2$$

Положение рабочих точек на выходной характеристике транзистора VT1 показано на рис.9б. В точке A подано запирающее напряжение  $E_3^- < U_{nop1}$ , остаточный ток имеет примерно то же значение, что и в ключе с резистивной нагрузкой ( $10^{-9} - 10^{-10} A$ ), максимальное выходное напряжение близко к напряжению питания:  $U_{max} = E_C$ .

В открытом состоянии ключа на затвор подано напряжение  $E_3^+ > U_{nop1}$ . Транзистор VT2 начинает открываться, когда напряжение  $U_{CH2} = E_C - U_C$  достигает значения  $U_{nop2}$ , рабочая точка B определяется точкой пересечения ВАХ транзистора VT2 с квазилинейным участком характеристики активного транзистора VT1. Ток насыщения и остаточное напряжение определяются уравнениями:

$$I_{CH} = b_1 (E_3^+ - U_{nop1}) U_{ост},$$

$$I_{CH} = \frac{b_2}{2} (E_C - U_{ост} - U_{nop2})^2 \approx \frac{b_2}{2} (E_C - U_{nop2})^2$$

Отсюда

$$U_{ост} = \frac{b_2 (E_C - U_{nop2})^2}{2b_1 (E_3^+ - U_{nop1})}.$$

На практике всегда выполняется условие  $E_3^+ \leq E_C$ , поэтому для того, чтобы остаточное напряжение было мало, должно выполняться соотношение  $b_2 \ll b_1$ , то есть отношение ширины канала к длине  $W/L$  должно быть для активного транзистора как можно больше, а для нагрузочного как можно меньше. Здесь также нет принципиальных ограничений на величину  $U_{ост}$ . Однако увеличение  $W_1$  и  $L_2$  приводят к увеличению площади, занимаемой схемой, и здесь также принимается компромиссное решение. Если обеспечить  $b_1 b_2 = 50 \div 100$ , можно получить  $U_{ост} = 50 \div 100$  мВ.

### Комплементарный (КМДП) ключ.

Схема такого ключа приведена на рис.10. Здесь используются транзисторы с разным типом проводимости канала (комплементарные): VT1 – с  $n$ -каналом и VT2 – с  $p$ -каналом, у которых затворы соединены между собой и на них подается управляющее напряжение.

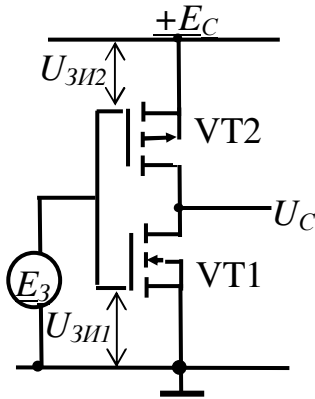


Рис.10

Если на затворы подано напряжение  $E_3^- = 0$ , то

$$U_{3И1} = 0, \quad U_{3И2} = -E_C$$

и  $n$ -канальный транзистор VT1 закрыт, а  $p$ -канальный транзистор VT2 открыт (считаем, что  $E_C > |U_{nop2}|$ ). Ток в общей цепи определяется остаточным током запертого транзистора. Открытый транзистор T2 работает на квазилинейном участке характеристики и на нем падает напряжение, равное произведению  $I_{ocm1}$  на сопротивление канала:

$$|U_{СИ2}| = \frac{I_{ocm1}}{b_2(E_C - |U_{3И2}|)}.$$

Поскольку  $I_{ocm1} \approx 10^{-9} \div 10^{-10}$  А это остаточное напряжение практически равно нулю (может составлять единицы мкВ) и выходное напряжение  $U_C = E_C$ .

При подаче напряжения  $E_3^+ = E_C$

$$U_{3И1} = E_C, \quad U_{3И2} = 0,$$

и  $n$ -канальный транзистор VT1 открыт, а  $p$ -канальный транзистор VT2 закрыт, падение напряжения на открытом транзисторе практически равно нулю и  $U_C = 0$ .

Важнейшей особенностью комплементарных ключей является то, что они практически не потребляют мощности в обоих состояниях. Другим важным преимуществом является практически нулевое остаточное напряжение.

Приборы, используемые в работе:

- лабораторный макет;
- генератор синусоидальных колебаний;
- двухканальный осциллограф GOS-7630FC.

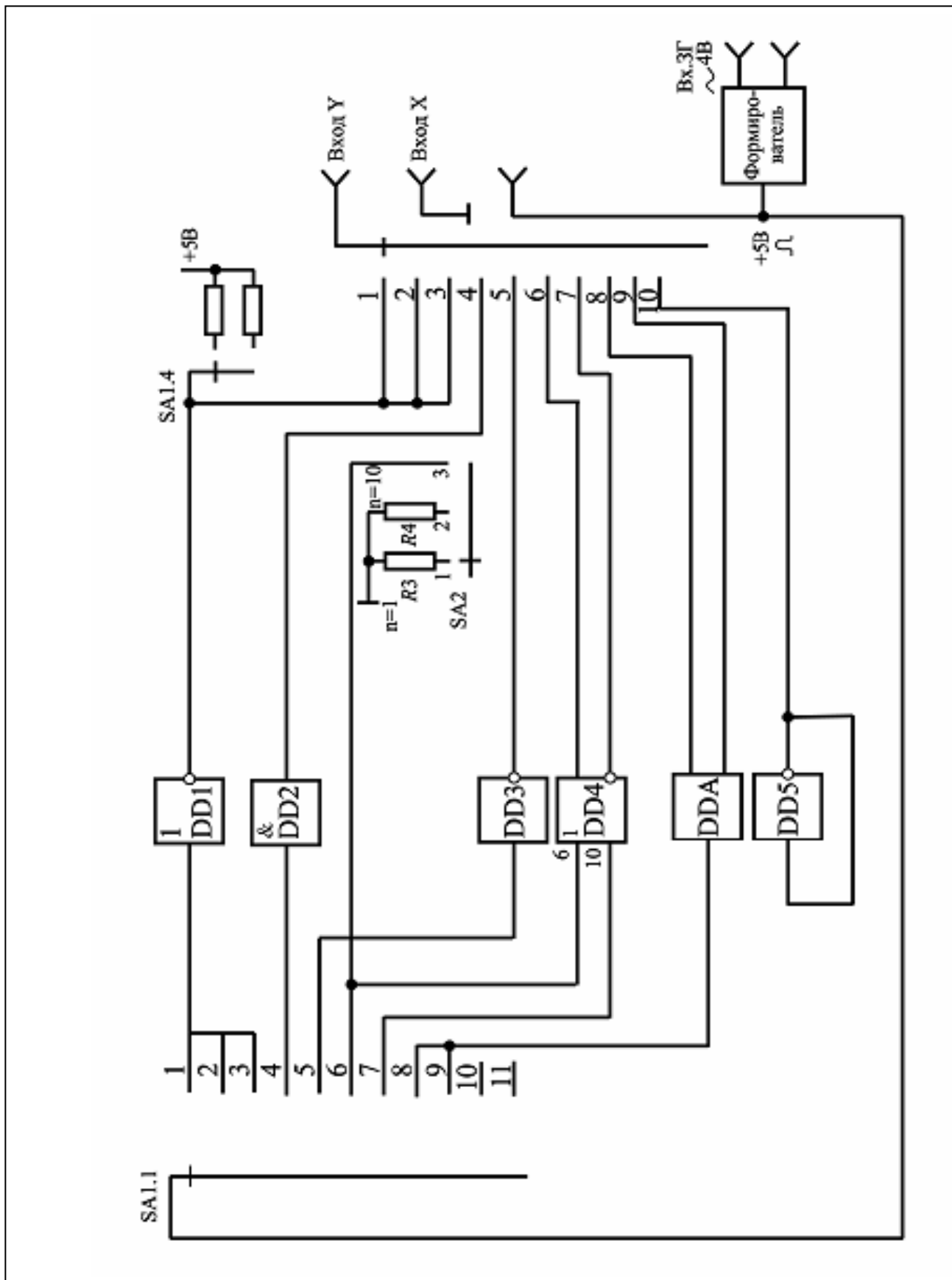


Рис. 11.

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Функциональная схема дана на рис.11. С помощью переключателя SA1 производится выбор исследуемой схемы.

На вход исследуемой схемы поступает сигнал с формирователя напряжения, который из сигналов генератора звуковых частот формирует сигнал положительной полярности ограниченной амплитуды + 5В.

К выходу исследуемой схемы подключается вход второго канала осциллографа *GOS-7630FC*. К выходу "X" макета, куда поступает входной сигнал, подключается вход первого канала и осциллограф переводится в режим работы "X-Y". На экране получается изображение передаточной характеристики ключевой схемы: входное напряжение – по оси «X», выходное – по оси «Y».

При исследовании переключателя тока на вход схемы подается сигнал непосредственно с выхода звукового генератора.

Переключатель SA2 служит для выбора режима работы ключевой цепочки. Питание макета осуществляется от источника напряжения  $\pm 5В$ .

При включении развертки на экране получают временные диаграммы выходного напряжения (канал 2).

### МЕТОДИКА СНЯТИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛЮЧЕВЫХ СХЕМ

Собрать блок-схему (рис.12)

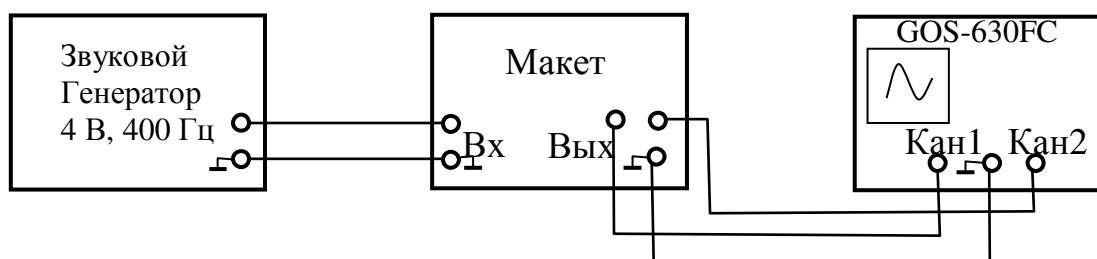


Рис. 12

Установить на звуковом генераторе частоту входного сигнала  $f = 400Гц$ , амплитуду  $\sim 4В$ . Тумблер "Нагрузка  $\Omega$ " поставить в положение "600".

Перевести осциллограф в режим работы "X-Y", повернув ручку регулировки скорости развертки в крайнее положение против часовой стрелки. Усиление по вертикали установить в положение 1 В/см.

С помощью переключателя SA1 можно получить на экране осциллографа передаточные характеристики следующих ключевых схем (см. табл. 1)

Таблица 1.

Пол. SA1	Передаточная характеристика	Примечание
1	Инвертирующая ключевая схема на биполярном транзисторе.	В цепи коллектора сопротивление $R_{K1}$
2	-“-	-“- $R_{K2}$
3	Инвертирующая ключевая схема с диодом в цепи базы.	В цепи коллектора сопротивление $R_{K1}$
4	Неинвертирующая ключевая схема.	
5	Ключевая цепочка на биполярных транзисторах в режимах: $n = 1$ (SA2 в положении 1); $n = 10$ (SA2 в положении 2);	в режиме генерации (SA2 в положении 3);
6	Ключевая схема на МДП-транзисторе с пассивной нагрузкой.	
7	Ключ на комплементарной паре (КМДП) и транзисторах.	
8	Переключатель тока (вых.1)	
9	Переключатель тока (вых.2).	
10	Ключевая схема на транзисторе с барьером Шоттки	в режиме генерации

*Примечание:* размер изображения на осциллографе по вертикали соответствует амплитуде напряжения на выходе исследуемой схемы. Размер изображения по горизонтали соответствует амплитуде напряжения на входе исследуемой схемы.

**Задание 1.** Исследовать передачную характеристику инвертирующего ключа. Снять две передачные характеристики при различных сопротивлениях в цепи коллектора ( $R_{K1}$  и  $R_{K2}$ ) SA1-1; 2.

Определить статические параметры

$$U^0, U^1, \Delta U_{\Pi}, U_{\Pi}, U_{\Pi}^-, U_{\Pi}^+, \text{ порог переключения } U_C.$$

Сравнить, сделать выводы.

**Задание 2.** Исследовать передачную характеристику инвертирующего ключа с диодом в цепи базы. SA1-3. Определить статические параметры.

$$U^0, U^1, \Delta U_{\Pi}, U_{\Pi}, U_{\Pi}^-, U_{\Pi}^+, \text{ порог переключения } U_C.$$

**Задание 3.** Исследовать передачную характеристику неинвертирующего ключа SA1-4. Определить статические параметры

$$U^0, U^1, \Delta U_{\Pi}, U_{\Pi}, U_{\Pi}^-, U_{\Pi}^+, \text{ порог переключения } U_C.$$

**Задание 4.** Исследовать передачную характеристику ключевой цепочки. SA1-5

а) снять две передачные характеристики ключа, соответствующие нагрузкам  $n = 1$ ,  $n = 10$ , подключая к выходу схемы нагрузочные эквиваленты.

Нагрузочные эквиваленты являются сопротивлениями, соответствующими сопротивлениям одной или десяти ключевых схем, подключенных к выходу данного ключа.

Подключение эквивалентов осуществляется в положении переключателя SA2→1 и 2:

- б) сравнить характеристики и сделать выводы;
- в) определить порог чувствительности;
- г) просмотреть выходные сигналы на коллекторах транзисторов VT1, VT2, VT3 ключевой цепочки (клеммы К1 ÷ К3). Ключевая цепочка состоит из 5 последовательно соединенных ключей (рис.13).

**Задание 5.** Определить среднее время задержки переключения ключевой схемы. Для инвертирующих схем  $t_{зд.п.ср.} \approx 0,5(t_{зд.п.}^{1,0} + t_{зд.п.}^{0,1})$  можно определить экспериментально с помощью цепочки из нечетного числа  $k$  последовательно соединенных ключей, замкнутой в кольцо (рис. 13). Наличие обратной связи приводит к возникновению генерации. Поэтому такое соединение называется кольцевым генератором. Так как период генерируемых импульсов равен времени циркулирования по кольцу двух логических сигналов "0" и "1", то его длительность равна  $T_{\Gamma} = 2kt_{зд.п.ср.}$ .



Рис. 13

Таким образом,  $t_{зд.п.ср.} = \frac{T_{\Gamma}}{2k} = \frac{1}{2kf_{\Gamma}}$ , где  $k = 5$ .

Такой косвенный метод измерения  $t_{зд.п.}$  обычно применяется, когда непосредственное измерение  $t_{зд.п.}$  по осциллографу затруднено, вследствие большого быстродействия микросхемы.

Перевести SA2→3. Включив развертку осциллографа получить на экране временную диаграмму импульсов и определить частоту  $f_{\Gamma}$  или период  $T_{\Gamma}$  генерации. Определить  $t_{зд.п.ср.}$

**Задание 6.** Исследовать передаточную характеристику МДП-транзистора с пассивной нагрузкой SA1→6. Определить статические параметры  $U^0, U^1, \Delta U_{\Pi}, U_{\Pi}, U_{\Pi}^-, U_{\Pi}^+$ .

**Задание 7.** Исследовать передаточную характеристику комплементарного (КМДП) ключа SA1→7.

Зарисовать передаточную характеристику КМДП – ключа, определить статические параметры  $U^0, U^1, \Delta U_{\Pi}, U_{\Pi}, U_{\Pi}^-, U_{\Pi}^+$ .

**Задание 8.** Исследовать передаточную характеристику переключателя тока SA1→8; 9. Переместить нуль входного напряжения в центр экрана (на вход подается разнополярное напряжение).

Зарисовать на одном графике передаточные характеристики с "вых.1" и "вых.2" ключа. Определить величину амплитуды входного сигнала  $U_{ВХ}$ , при которой схема переходит в режим ключа.

**Задание 9.** Определить среднее время задержки переключения ключа на транзисторе с барьером Шоттки. Результаты измерения  $t_{зд.р.ср.}$  (SA1→10) сравнить с аналогичными, полученными в задании 5. Сделать выводы.

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Блок-схема измерения.
2. Принципиальные схемы и передаточные характеристики исследуемых ключей.
3. Вычисленные статические и динамические параметры.
4. Выводы по каждому пункту задания.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличаются передаточные характеристики инвертирующих и неинвертирующих электронных схем?
2. Принцип работы простейшего транзисторного ключа.
3. Статические параметры ключа.
4. Передаточная характеристика ключа.
5. Покажите рабочие точки ключа на биполярном транзисторе на входных и выходных характеристиках транзистора.
6. Чем определяется остаточное напряжение простейшего ключа на биполярном транзисторе?
7. Дайте определение степени насыщения.
8. Каково влияние барьерной и диффузионной емкостей коллекторного перехода на переходные процессы в простейшем биполярном ключе?
9. Особенности работы ключей в ключевых цепочках.
10. Принцип работы ключа с барьером Шоттки.
11. Дайте сравнительную характеристику простейшего ключа на биполярном транзисторе и ключа с барьером Шоттки.
12. Чем обусловлено быстрое действие переключателя тока?
13. Как исключается насыщение транзисторов в переключателе тока?
14. Особенности ключевых схем на МДП-транзисторах.
15. Почему МДП-транзисторный ключ с динамической нагрузкой предпочтительнее ключа с резистивной нагрузкой?
16. Принцип работы и характеристики ключа на комплементарных МДП-транзисторах.
17. Какие параметры характеризуют помехоустойчивость ключей?
18. Проанализируйте простейший биполярный и МДП-транзисторный ключи с точки зрения помехоустойчивости.



## ЛИТЕРАТУРА

Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001, с.282-326; 3-е изд., 2004.