

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ**

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика С. П. КОРОЛЕВА**

# **КЛЮЧИ НА ТРАНЗИСТОРАХ С МДП-СТРУКТУРОЙ**

*Методические указания  
к лабораторной работе*

**САМАРА 1994**

Составитель А.С.Капустин

УДК 621.374(075.8)

Ключи на транзисторах с МДП-структурой: Метод. указания к лаб.работе /Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. А.С.Капустин. Самара, 1994. 18 с.

Приведены краткие теоретические сведения с работе ключей различного схемного исполнения, построенных на транзисторах с МДП-структурой.

Дано описание экспериментальной установки для исследования работы ключевых устройств, приведена методика проведения экспериментов, а также требования к отчету и контрольные вопросы для самоподготовки.

Методические указания предназначены для студентов специальности 19.05, изучавших курс "Импульсные и цифровые устройства", а также могут быть полезны студентам специальности 23.03, 23.01. Подготовлены на кафедре радиотехники.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П.Королева

Рецензент Б.А.Никольский

Ц е л ь   р а б о т ы - изучить работу электронных ключей на МДП-транзисторах, исследовать передаточные характеристики различных схем построения ключевых устройств на МДП-транзисторах.

#### ВНИМАНИЮ СТУДЕНТОВ!

1. До выполнения лабораторной работы каждый студент должен во внеаудиторное время изучить теоретические основы ключевых устройств на МДП-транзисторах.

2. Каждый студент перед выполнением работы должен сдать коллоквиум по теоретической части предстоящих экспериментов.

3. Приступать к выполнению работы студенты должны только с разрешения преподавателя.

4. По окончании экспериментов студенты должны представлять результаты для проверки преподавателю и только после их утверждения выключают установку и аппаратуру, а также приводят рабочее место в порядок.

#### 1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Полевые транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы) обладают рядом достоинств, благодаря которым они имеют перспективы широкого применения. Одно из них - лучшая технологичность по сравнению с биполярными транзисторами, возможность изготовления большого числа приборов (несколько сотен, тысячи) на одной подложке, что делает весьма перспективным использование их в интегральной технологии.

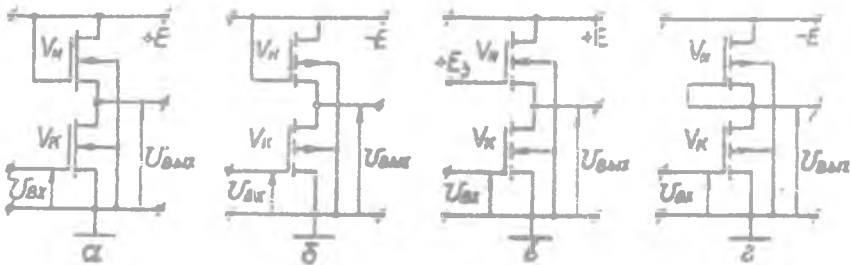
Управление выходным током у этих транзисторов производится изменением поперечного электрического поля в канале, т.е. изменением напряжения на затворе, изолированном от канала слоем диэлектрика,

что соответствует увеличению входного сопротивления прибора и уменьшению потребления энергии во входной цепи.

Ключи на МДП-транзисторах строятся по типовой схеме (рис. 1, а, б). Нагрузкой, как и в ключах на биполярных транзисторах, может быть резистор. Но в интегральном исполнении в качестве нагрузки обычно применяют также МДП-транзистор (рис. 2), и ключ в этом случае состоит из коммутирующего и нагрузочного транзисторов.

Нагрузочный транзис-

тор может быть со встроенным (рис. 2, а) и индуцированным (рис. 2, б) каналами, с каналами  $p$ -типа (рис. 2, б),  $n$ -типа (рис. 2, а), его затвор может быть соединен со стоком (рис. 2, а, б), с истоком (рис. 2, г), иметь отдельный источник питания (рис. 2, в) и т.д. В зависимости от этого нагрузка может иметь большое число видов вольт-амперных характеристик, причем каждая из них удобна для какого-либо конкретного применения ключа.

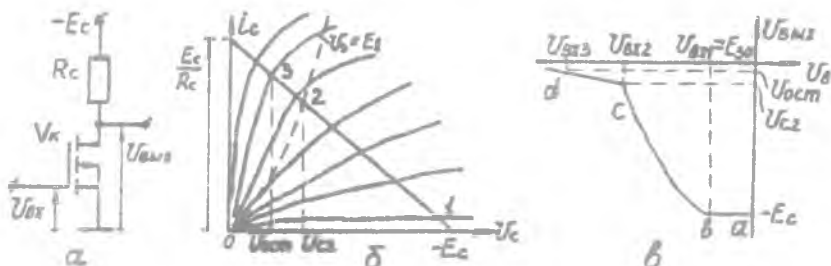


Р и с. 2. Ключи с различным включением нагрузочного транзистора: а - встроенный канал  $n$ -типа, затвор соединен с истоком; б - индуцированный канал  $p$ -типа, затвор соединен с истоком; в - индуцированный канал  $n$ -типа, затвор соединен с отдельным источником питания; г - индуцированный канал  $p$ -типа, затвор соединен со стоком

## 1.1. Ключ с линейной нагрузкой

В качестве нагрузки в этой схеме (рис. 3, а) используется резистор  $R_c$ . Если в качестве коммутирующего прибора используется транзистор с индуцированным каналом  $p$ -типа, то источник питания  $E_c$  должен быть отрицательной полярности.

Для выяснения особенностей работы такого ключа рассмотрим выходные характеристики транзистора  $V_{\kappa} i_c = f(U_c)$ , на которых проведена нагрузочная прямая, соответствующая сопротивлению резистора  $R_c$  (рис. 3, б).



Р и с. 3. Ключ с линейной нагрузкой: а - схема включения; б - выходные характеристики транзистора с нагрузочной прямой; в - статическая характеристика передачи

На характеристиках существуют две области: пологая ("пентодная") со слабой зависимостью  $i_c$  от  $U_c$  и крутая ("триодная"), где характеристики представляют пучок прямых линий, проходящих через начало координат. Линия раздела между этими областями (показана пунктиром) соответствует напряжению на стоке

$$U_c = U_g - E_{з0},$$

где  $E_{з0}$  - напряжение запирания транзистора.

Работа ключа поясняется статической характеристикой передачи  $U_{вых} = f(U_{вх})$  (рис. 3, в). При напряжении на выходе  $|U_{вых}| = |U_g| < |E_{з0}|$  транзистор  $V_{\kappa}$  закрыт (участок а-б на рис. 3, в). Так как ток стока в этом случае очень мал (тепловое значение тока утечки), то напряжение на выходе близко к  $-E_c$ . При напряжении на входе  $-U_{вх} = -E_{з0}$  транзистор открывается (точка I на рис. 3, б) и при дальнейшем увеличении  $-U_{вх}$  ток стока возрастает, а напряжение на выходе  $U_{вых}$  уменьшается (участок б-с на рис. 3, в). Это изменение нелинейно, так как

нелинейна зависимость  $i_c$  от  $U_z$  в пологой области характеристик. В точке 2 (рис. 3,б) напряжение на входе ключа связано с выходным напряжением зависимостью

$$U_{вх} = U_c - E_{з0}.$$

При дальнейшем увеличении  $U_{вх}$  (участок  $c-d$  рис. 3,в) напряжение на выходе  $U_{вых}$  тоже изменяется, но не так резко, как в пологой области характеристик, и при входном уровне напряжения  $U_{вх} = E$  на выходе будет соответствующее ему остаточное напряжение  $U_{ост}$  (точка 3 на рис. 3,б).

Если выбрать сопротивление резистора  $R_c$  сравнительно большим, то на выходе получим достаточно малое значение остаточного напряжения  $U_{ост}$ .

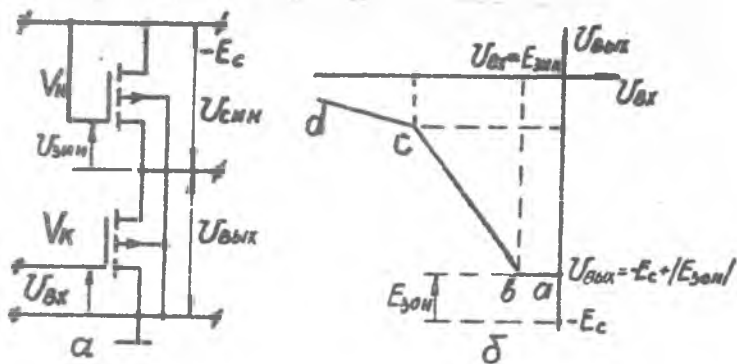
## 1.2. Ключ с нелинейной нагрузкой

Коммутирующий транзистор  $V_K$  ключа (рис. 4,а) управляется напряжением  $U_{вх}$ , подаваемым на затвор, а затвор нагрузочного транзистора  $V_N$  соединен со стоком. В процессе работы ключа напряжение  $U_{зш}$  между затвором и истоком этого транзистора изменяется в соответствии с изменением выходного напряжения  $U_{вых}$ , так как  $U_{зш} = -E_c + U_{вых}$ . Этот ключ отличается от предыдущего ключа только характером нагрузки.

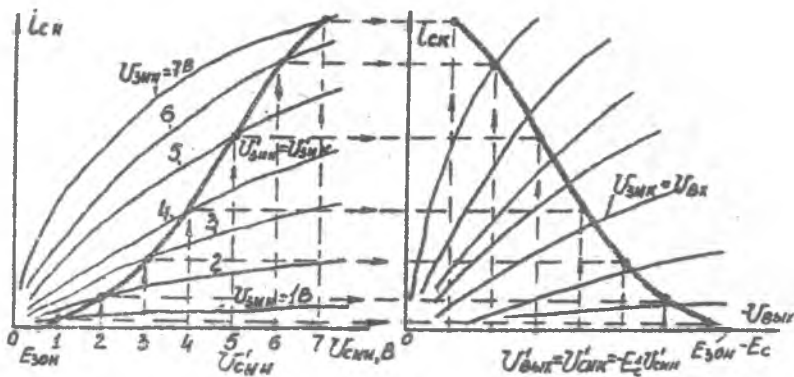
Построение нагрузочной характеристики коммутирующего транзистора  $V_K$  начинается с построения вольт-амперной характеристики транзистора  $V_N$  (рис. 5).

Исходя из условия  $U_{зш} = U_{зш}$  (так как затвор соединен со стоком), для каждого значения  $U_{зш}$  на характеристике находится соответствующая точка. Полученные точки соединяют кривой, которая является искомой характеристикой транзистора  $V_N$ . Так как ток стока  $i_c$  в пологой области характеристик почти не зависит от напряжения на стоке  $U_{си}$ , то полученная зависимость является проходной характеристикой транзистора  $V_N$ . Полученную кривую переносят на выходные характеристики транзистора  $V_K$ , исходя из равенства протекающего через оба транзистора тока стока и учитывая, что выходное напряжение или напряжение сток-исток транзистора  $V_K$  определяется из соотношения

$$U_{вых} = U_{си} = -E_c + U_{зш}.$$



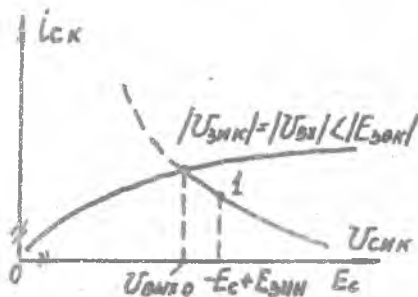
Р и с. 4. Ключ с нелинейной нагрузкой: а - схема включения; б - статическая характеристика передачи



Р и с. 5. Построение нагрузочной характеристики коммутирующего транзистора

Нагрузочный транзистор  $V_H$  работает только в пологой части характеристик, и его вольт-амперная характеристика существенно нелинейна. Для получения достаточно малых значений остаточного напряжения на выходе коммутирующего транзистора  $V_K$  необходимо, чтобы нагрузочная кривая проходила достаточно полого. С этой целью канал нагрузочного транзистора  $V_H$  делают более узким, чем у транзистора  $V_K$ .

Характеристика передачи ключа  $U_{Вых} = f(U_{Вх})$  (рис. 4,6) отличается от аналогичной характеристики для ключа с линейной нагрузкой тем, что уровень выходного напряжения при выключенном ключе не равен  $-E_C$  и меньше его на величину  $E_{ЗОН}$ . При  $|U_{Вх}| < |E_{ЗОН}|$  коммутирующий транзистор  $V_K$  закрыт, а транзистор  $V_H$  находится на грани запираения и пропускает ток закрытого транзистора  $V_K$  (тепловой ток и ток утечки) и ток нагрузки, если она подключена к выходу. Это поясняет рис. 6.



Р и с. 6. Выходная характеристика коммутирующего транзистора в закрытом состоянии

Из-за того, что транзистор  $V_H$  имеет более узкий канал, его тепловой ток и ток утечки меньше, чем у транзистора  $V_K$ . Поэтому точка I, соответствующая границе запираения, лежит ниже характеристики транзистора  $V_K$  (на рис. 6 масштаб по оси ординат сильно увеличен для того, чтобы были видны характеристики закрытых транзисто-

ров). Точка пересечения характеристик, которая определяет ток, протекающий через транзисторы, получается левее точки I, т.е. транзистор  $V_H$  открыт, но достаточно близко к ней. Напряжение между стоком и истоком транзистора  $V_H$  практически равно  $E_{ЗОН}$ , а уровень выходного напряжения на участке  $a-b$  (рис. 4,6) определяется выражением

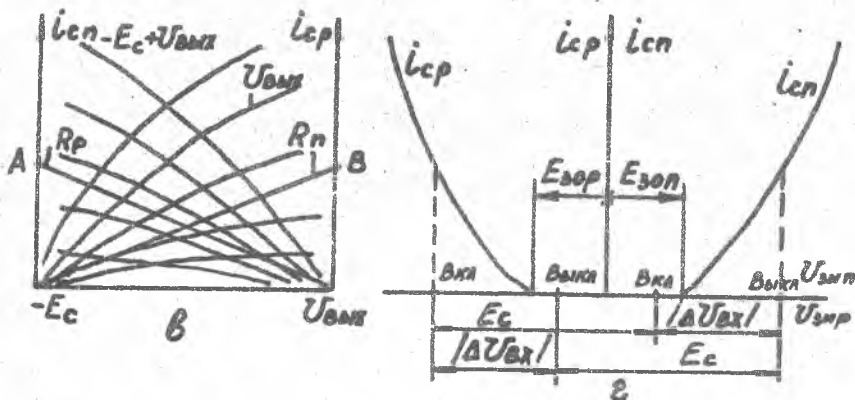
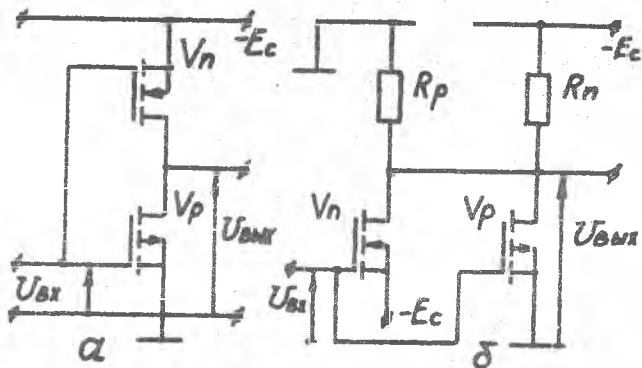
$$U_{Вых} = -E_C + |E_{ЗОН}|.$$

После отпирания транзистора  $V_H$  (точка  $b$ ) оба транзистора работают в пологой области характеристик, что обуславливает линейное изменение  $U_{Вых}$  на участке  $b-c$ . В точке  $c$  транзистор  $V_K$  переходит в крутую область характеристик, и при дальнейшем увеличении  $U_{Вх}$  выходное напряжение изменяется незначительно (участок  $c-d$ ).

Так как подложки транзисторов  $V_K$  и  $V_H$  "заземлены", то при изменении выходного напряжения  $U_{Вых}$  изменяется напряжение между ис-





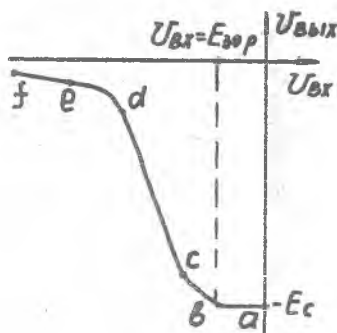


Р и с. 8. Ключ на комплементарных МОП-транзисторах: а - схема включения; б - модель ключа; в - стоконные характеристики комплементарных транзисторов в схеме ключа; г - стоконные затворные характеристики комплементарных транзисторов в схеме ключа

со стоконными характеристиками соответствующих транзисторов. При нулевом входном напряжении транзистор  $V_p$  закрыт, а  $V_n$  открыт, и состояние ключа характеризуется рабочей точкой  $A$  с абсциссой  $U_{\text{вых}} \approx -E_c$ . Когда входной потенциал повышается настолько, что отпирается транзистор  $V_p$  и запирается  $V_n$ , то режим ключа определяется точкой  $B$  с абсциссой  $U_{\text{вых}}^0 \approx 0$ .

Работу ключа рассмотрим по сток-затворным характеристикам транзисторов (рис. 8, г). При изменении входного напряжения от 0 до  $E_{зоп}$  транзистор  $V_p$  остается закрытым, а транзистор  $V_n$  открыт и работает в крутой области характеристик (участок  $a-b$  на статической характеристике передачи рис. 9). Для включения ключа необходимо выполнить условие

$$\begin{cases} |U_{зуп}| = |U_{вкл}| > |E_{зоп}|, \\ |U_{зун}| = U_{вкл} + E_c < E_{зоп}. \end{cases}$$



Р и с. 9. Статическая характеристика передачи ключа на комплементарной паре транзисторов

Если  $|E_c| > |E_{зоп}|$ ,  $|E_c| > |E_{зоп}|$  и  $|E_c| > |E_{зоп}| + |E_{зоп}|$ , то при  $|U_{вх}| > |E_{зоп}|$  транзистор  $V_p$  открывается, напряжение на  $V_p$  начинает уменьшаться, а напряжение на транзисторе  $V_n$  увеличивается. На участке  $a-b$  оба транзистора открыты, причем  $V_p$  работает в пологой области, а  $V_n$  все еще в крутой. Линейный участок  $c-d$  соответствует состоянию, когда оба транзистора работают в пологой области характеристик. При дальнейшем увеличении  $|U_{вх}|$  (участок  $d-e$ ) транзистор  $V_p$  переходит в крутую область, а  $V_n$  продолжает работать в пологой области. Когда  $U_{вх}$  станет равным  $U_{вх} = -E_c + E_{зоп}$  (точка  $e$ ) транзистор  $V_n$  закрывается и на участке  $e-f$  выходное напряжение практически не изменяется.

Для выключения ключа необходимо выполнить условие

$$\begin{cases} |U_{зуп}| = |U_{выкл}| < |E_{зоп}|, \\ |U_{зун}| = U_{выкл} + E_c > E_{зоп}. \end{cases}$$

Если напряжение источника питания  $E_c$  выбрано так, что  $|E_c| > |E_{зоп}|$ ,  $|E_c| > |E_{зоп}|$ , но  $|E_c| < |E_{зоп}| + |E_{зоп}|$ , то в процессе работы будет такое положение, когда оба транзистора закрыты. При этом обе рабочие точки разместятся между напряжениями запирающих транзисторов  $V_n$  и  $V_p$  (рис. 8, г), что соответствует закрытому состоянию транзисторов.

Так как в установившемся режиме один из транзисторов оказывается закрытым, то ключ практически не потребляет тока. При этом ток открытого транзистора очень мал, так как в цепи стока этого транзистора

имеются высокоомные сопротивления  $R_n$  и  $R_p$ . Поэтому потребляемая мощность оказывается минимальной, она практически определяется токами утечки. Суммарная мощность, потребляемая схемой, в основном определяется энергией, которая расходуется на перезаряд паразитных емкостей.

С точки зрения уменьшения потребляемой мощности напряжение источника питания необходимо выбирать из условия  $|E_c| < |E_{гор}| + |E_{гор}|$ . Одновременно это повышает быстродействие ключа, так как при перезаряде паразитных емкостей проводит только тот транзистор, ток стока которого приводит к изменению напряжения в требуемом направлении. Транзистор, замедляющий перезаряд паразитных емкостей, остается в закрытом состоянии.

Однако из-за существенного разброса пороговых напряжений выполнение последнего неравенства требует заметного снижения напряжения источника питания  $E_c$ , что приводит к уменьшению перепада напряжения на выходе ключевого элемента. Последнее затрудняет управление ключевых элементов друг другом. Поэтому для повышения выходного перепада напряжений в практических схемах приходится увеличивать напряжение источника питания  $E_c$ .

## 2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Лабораторный макет по исследованию ключевых устройств на МДП-транзисторах выполнен в общем блоке с лабораторным макетом по исследованию ключевых устройств на биполярных транзисторах.

На лицевой панели (рис. 10) расположены: ручка переключения исследуемых схем  $S1$ , тумблеры переключения режимов работы ключей на биполярных транзисторах  $S2$  и  $S3$ , выключатель питания  $S4$  с сигнальной лампой, а также гнезда  $X1$  и  $X2$  для подачи входного сигнала и гнезда  $X3$  и  $X4$  для снятия выходного сигнала.

Переключатель  $S1$  имеет пять положений и в соответствии с принципиальной схемой лабораторного макета (рис. 11) в первом положении к входным  $X1$ ,  $X2$  и выходным  $X3$ ,  $X4$  гнездам подключается схема ключа на биполярном низкочастотном транзисторе  $V71$  МП25, собранного по схеме с общим эмиттером.

Во втором положении ко входным и выходным гнездам подключается также схема ключа на биполярном среднечастотном транзисторе  $V72$  КТ104, собранного по схеме с общим эмиттером.

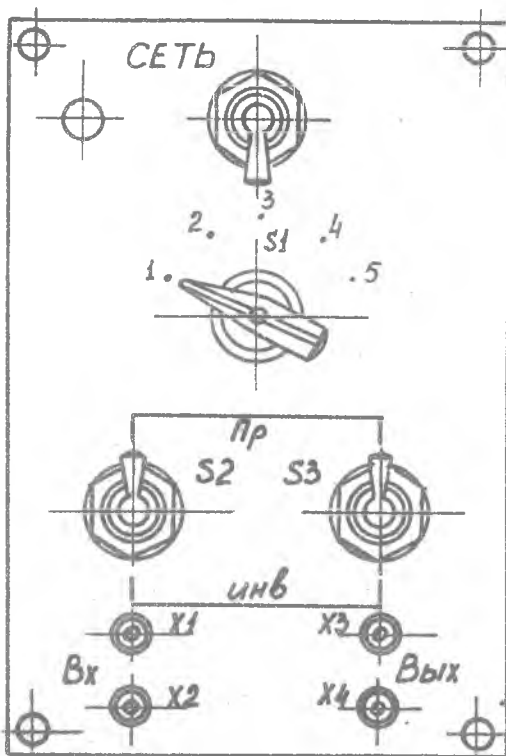
В третьем положении переключателя  $S1$  ко входным и выходным гнездам подключается ключ на МДП-транзисторе  $V73$  КП350 с линейной нагрузкой. В качестве нагрузки используется резистор  $R5$ .

В четвертом положении исследуется схема электронного ключа на МДП-транзисторе с нелинейной нагрузкой. Коммутирующим элементом является транзистор  $VT3$  КП350, а нагрузочным элементом является транзистор  $VT4$  КП305.

В пятом положении переключателя  $S1$  исследуется схема электронного ключа на комплементарных МДП-транзисторах  $VT3$  КП350 и  $VT5$  КП301.

Переключатели  $S2$  и  $S3$  изменяют схемы электронных ключей на биполярных транзисторах с прямого включения на инверсное соответственно для низкочастотного  $VT1$  и среднечастотного  $VT2$  транзисторов.

Питание схем электронных ключей осуществляется от автономных вторичных источников питания  $-12$  В,  $+5$  В. От источника питания  $-12$  В запитываются коллекторные цепи транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ , а от источника питания  $+5$  В питаются базовые цепи транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ , а также цепи стоков транзисторов  $VT3$ ,  $VT4$  и цепь истока транзистора  $VT5$ .

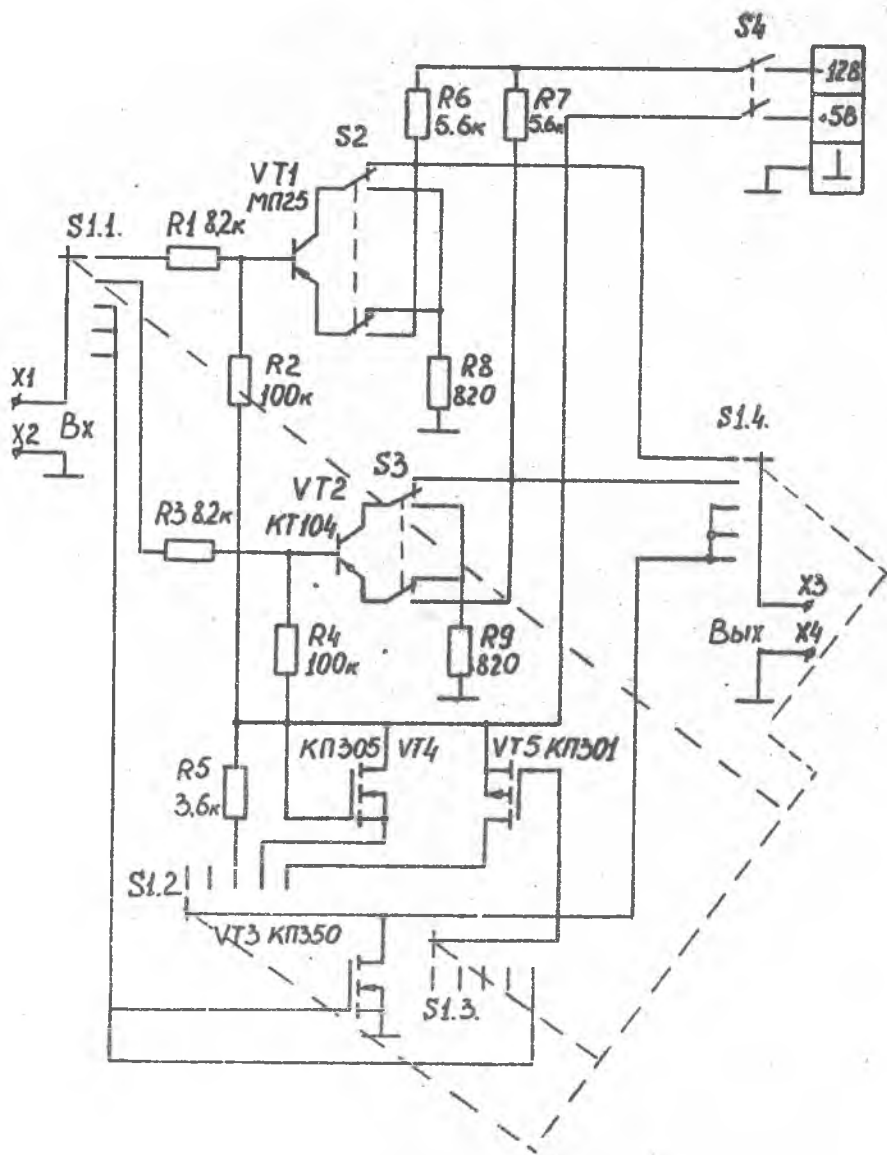


Р и с. 10. Лицевая панель лабораторного макета

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед началом работы необходимо изучить краткую теорию настоящего-го методического указания и сдать коллоквиум по теории и практике эксперимента.

При исследовании схем электронных ключей на МДП-транзисторах необходимо снять статические характеристики передачи для трех схем



Р и с. II. Принципиальная схема лабораторного макета

ключей. Измерить время переходных процессов во всех трех схемах.

Для выполнения этих исследований необходимо:

1. Ознакомиться с описанием лабораторного макета и самим стендом.  
2. Включить тумблер "СЕТЬ" на блоке питания лабораторного стенда и на лабораторном макете. При этом должны светиться контрольные лампы на блоке питания и на самом макете.

3. Включить генератор импульсов Г5-54 и универсальный осциллограф СИ-72.

4. Установить на генераторе импульсы положительной полярности длительностью 10-50 мкс с частотой следования 5-10 кГц.

ВНИМАНИЕ! Амплитуда импульсов не должна превышать значения +5 В, т.е. необходимо работать с выходным делителем напряжения генератора Г5-54 с коэффициентом деления не более 0,1.

5. Вход осциллографа подключить с выходным гнездом лабораторного макета X3 и X4.

6. Переключатель исследуемых схем S1 поставить в положение 3, что соответствует исследованию схемы ключа на ИДП-транзисторе с линейной нагрузкой.

7. Подать импульсы положительной полярности с генератора Г5-54 на входные гнезда лабораторного макета X1 и X2. При этом на экране осциллографа должны появиться импульсы отрицательной полярности с амплитудой не более 5 В.

8. Произвести исследование статической характеристики передачи для данного ключа, снять зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$ . Для этого входное напряжение изменять с минимального (выходной делитель напряжения на генераторе Г5-54 должен находиться в состоянии 0,03, а ручка "РЕГ. АМПЛИТУДЫ" в крайнем левом положении) до максимального напряжения, при котором амплитуда выходного импульса достигнет значения, примерно равного -5 В. При этом амплитуда импульса на входе схемы не должна превышать значения +5 В.

Для получения выходного напряжения необходимо от напряжения питания схемы (+5 В) вычесть амплитуду выходного импульса, измеренную по шкале осциллографа СИ-72.

9. Измерить длительность переходных процессов в электронном ключе, для чего измерить время формирования переднего фронта выходного импульса и время формирования среза выходного импульса. Измерения провести для трех значений амплитуды входного импульса: минимального, среднего и максимального. Зарисовать осциллограммы выходных импульсов.

10. Поставить переключатель исследуемых схем **31** поочередно в положения 4 и 5 и провести исследования электронного ключа с нелинейной нагрузкой и ключа на комплементарной паре МДП-транзисторов в соответствии с пунктами 8 и 9 настоящего методического указания.

Результаты исследования занести в соответствующие таблицы.

Рекомендуем следующий вид таблицы:

Ключ с линейной нагрузкой

$U_{вх}$	$U_1 (min)$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5 (ср)$	$U_6$	$U_7$	$U_8$	$U_9 (max)$
$U_{вых}$									
$t_{ф}$									
$t_{ср}$									

#### 4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет выполняется индивидуально каждым студентом на отдельном двойном листе из тетради. Он включает в себя:

1. Титульный лист, выполненный по ГОСТу, на котором указывается название работы, Ф.И.О., номер группы студента, выполнившего отчет, дата выполнения, Ф.И.О. преподавателя, принявшего отчет.

2. Цель работы.

3. Принципиальные схемы, выполненные по ГОСТу, исследуемых электронных ключей.

4. Таблицы с экспериментальными данными.

5. Графики экспериментально снятых статических характеристик передачи ключей, построенные в одних координатах.

6. Осциллограммы выходных импульсов.

7. Графические зависимости длительности фронтов и срезов импульсов от входного напряжения, построенные в одних координатах для трех исследуемых схем.

8. Выводы о проделанной работе и установленных закономерностях.



## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

1. Пояснить принцип построения ключевых устройств на МДП-транзисторах.
2. Рассказать о принципе работы различных схемных вариантов электронных ключей на МДП-транзисторах с индуцированным и встроенным каналом.
3. Устройство и принцип работы лабораторного макета по исследованию ключей.
4. Чем определяется вид статических характеристик передачи ключей.
5. Каким образом строятся нагрузочные характеристики ключей при использовании в схемах однотипных транзисторов и транзисторов с различными каналами проводимости?
6. Каким требованиям должны удовлетворять параметры транзисторов, работающих в различных схемах электронных ключей?
7. Дать сравнительный анализ различных схем ключей на МДП-транзисторах.
8. Чем определяются переходные процессы в схемах ключей на МДП-транзисторах?
9. Методы повышения быстродействия ключевых устройств на МДП-транзисторах.
10. В чем заключается отличие реальных статических характеристик передачи ключей от идеальных?

## РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Агаханян Т.М. Интегральные микросхемы: Учебн. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1983. 464 с.
- Интегральные микросхемы: Справочник /Под ред. Б.В.Тарабрина. М.: Энергоатомиздат, 1985. 528 с.
- Основы импульсной и цифровой техники: Учебн. пособие для вузов /В.В.Гусев и др. М.: Сов.радио, 1975. 440 с.

## КЛЮЧИ НА ТРАНЗИСТОРАХ С МДП-СТРУКТУРОЙ

Составитель Капустин Александр Степанович

Редактор Т.И.Кузнецова

Техн.редактор Н.М.Каленюк

Корректор Н.С.Куприянова

Подписано в печать 5.09.94. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл.п.л. 0,93. Усл.кр.-отт. I,05. Уч.-изд.л. I,0.  
Тираж 100 экз. Заказ 320. Арт. С-76мр/94.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет им. академика С.П.Королева.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ИПО Самарского государственного аэрокосмического  
университета им. академика С.П.Королева.  
443000I Самара, ул. Ульяновская, 18.