



**Таганрогский государственный  
радиотехнический университет**

**КАФЕДРА КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

**СБОРНИК ЛАБОРАТОРНЫХ  
РАБОТ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ  
ELECTRONICS WORKBENCH 5.0  
(Ч. 1)**

по курсу  
«Электроника»

Для студентов специальностей 2205, 2019



Таганрог 2003

Составители: Б.Г. Коноплев, Е.Б. Лукьяненко, А.В. Фомичев

«Сборник лабораторных работ, выполняемых с использованием программы Electronics Workbench 5.0» по курсу «Электроника». Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. 37 с.

Лабораторные работы подготовлены по разделам: биполярные транзисторы, полупроводниковые диоды и МДП – транзисторы. Изучение схем и измерение их параметров и характеристик производится с помощью программы Electronics Workbench 5.0. Разделы по биполярным транзисторам и диодам содержат измерительные схемы, с помощью которых снимаются характеристики и измеряются параметры полупроводниковых приборов. По этим характеристикам рассчитываются параметры математических моделей с помощью программы PSpice Model Editor, входящей в САПР OrCAD 9.1. Приводятся схемы для исследования усилителей и ключей на биполярных транзисторах. На диодах представлены схемы выпрямителя и параметрического стабилизатора напряжения. В разделе МОП – транзисторы приводятся схемы для снятия ВАХ полевых транзисторов и схемы для измерения параметров усилителя и ключей.

В приложениях описывается программа Electronics Workbench 5.0, основы работы с этой программой, а также программа расчета параметров математических моделей PSpice Model Editor.

Ил. 41. Библиогр.: 5 назв.

Рецензент О.Н. Негоденко, канд. техн. наук, профессор кафедры МЭТ БИС ТРТУ.

## 1. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Биполярные транзисторы представляют собой два встречноключенных взаимодействующих р-п-перехода. Взаимодействие переходов происходит через тонкую область базы, ширина которой в современных транзисторах составляет менее 1 мкм. На рис. 1 приведены условные графические обозначения биполярных транзисторов п-р-п-типа проводимости (рис. 1,а) и р-п-р-типа проводимости (рис. 1,б).

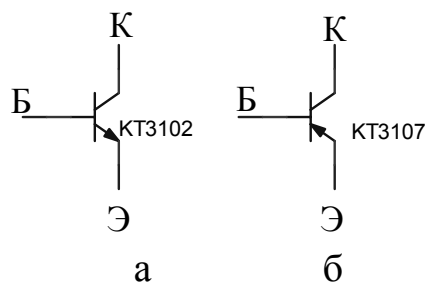


Рис. 1

Для расчета схем на биполярных транзисторах используются различные эквивалентные схемы транзисторов. Приближенные расчеты производятся с помощью Т-образной эквивалентной схемы. Малосигнальная эквивалентная схема транзистора при включении с общей базой (ОБ) приведена на рис. 2.

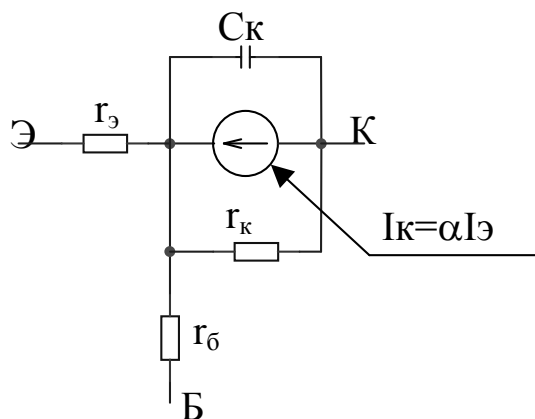


Рис. 2

На рис. 2 обозначено:  $r_э$  – дифференциальное сопротивление прямосмещенного эмиттерно-базового перехода;  $\alpha$  – коэффициент усиления по току в схеме с ОБ;  $r_к$  – выходное дифференциальное сопротивление транзистора в схеме с ОБ;  $C_к$  – емкость обратно-смещенного коллекторно-базового перехода;  $r_б$  – объемное сопротивление области базы.

В программах схемотехнического моделирования используются более сложные эквивалентные схемы, обеспечивающие высокую точность расчетов. К таким схемам относятся модель Гуммеля-Пуна (интегральная зарядовая модель) и более простая модель Эберса-Молла [1].

## 1.1. Измерение параметров биполярных транзисторов

Биполярные транзисторы характеризуются рядом физических параметров, на основе которых рассчитываются параметры математических моделей транзисторов, используемых в программах схемотехнического моделирования аналоговых и цифро-аналоговых схем. Расчет производится с помощью программ Parts, Model Editor, входящих в состав некоторых программ схемотехнического моделирования. Ниже рассматриваются методы измерения параметров транзисторов, вводимых в программы расчета параметров математических моделей транзисторов.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с приложением I, в котором описана программа Electronics Workbench, с помощью которой и производятся все измерения.

В схемах приняты следующие обозначения:

- PA – амперметр;
- PV – вольтметр;
- PA<sub>пост</sub>, PV<sub>пост</sub> – приборы для измерения постоянных токов и напряжений;
- PV<sub>пер</sub>, PA<sub>пер</sub> – приборы для измерения переменных токов и напряжений.

### 1.1.1. Измерение характеристик $U_{бэ\text{ нас}}=f(I_K)$ , $U_{кэ\text{ нас}}=f(I_K)$

Измерение характеристик производится в статическом режиме при постоянном отношении  $I_K/I_B=10$ . Измерительная схема приведена на рис. 3.

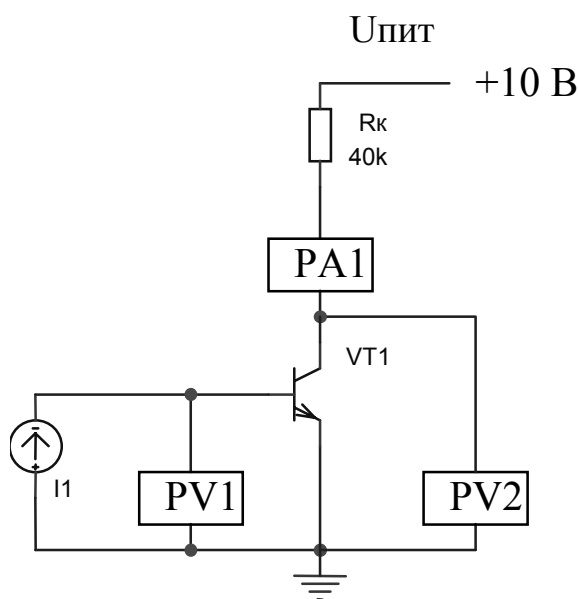


Рис. 3

Ток коллектора в режиме насыщения равен:

$$I_{к\text{нас}} = (U_{пит} - U_{кэ\text{нас}}) / R_{к} \approx U_{пит} / R_{к},$$

где  $U_{кэ\text{нас}}$  – напряжение насыщения транзистора VT1.

Генератор тока I1 задает ток в базу транзистора VT1. Величина тока базы выбирается равной  $0,1I_{к\text{нас}}$ . Вольтметры PV1 и PV2 измеряют напряжение эмиттер-база и коллектор-база транзистора VT1 в режиме насыщения. Ток коллектора измеряется амперметром PA1. Изменяя сопротивление резистора  $R_{к}$  от 1кОм до 40кОм и задавая ток базы  $0,1I_{к\text{нас}}$ , снимаем зависимости  $U_{бэ\text{нас}}$  и  $U_{кэ\text{нас}}$  как функцию от тока коллектора  $I_{к}$  при постоянном отношении  $I_{к}/I_{б}=10$ . Результаты измерений заносятся в табл. 1.

Таблица 1

$I_{к}$ , мА	$I_{б}$ , мкА	$U_{бэ\text{нас}}$ , В	$U_{кэ\text{нас}}$ , В

### 1.1.2. Измерение выходного сопротивления транзистора

Измерение выходного сопротивления  $R_{вых}$  в схеме с общим эмиттером (ОЭ) производится в статическом режиме с использованием выходной вольтамперной характеристики транзистора (рис. 4).

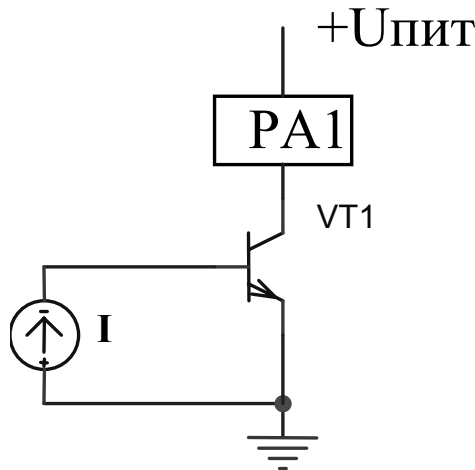


Рис. 4

Ток базы транзистора VT1 задается постоянной величины. Выбираются такие значения тока базы, чтобы ток коллектора лежал в пределах от 0,1 до 10 мА. Выходная характеристика транзистора приведена на рис. 5.

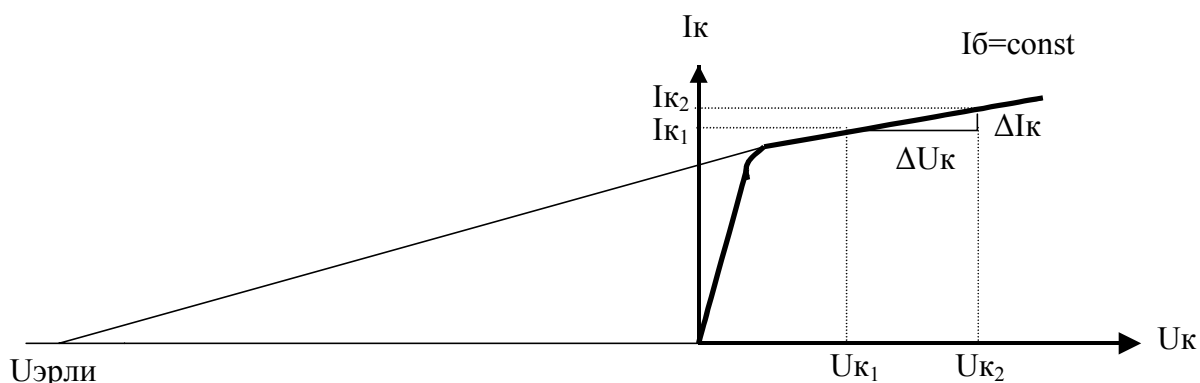


Рис. 5

Увеличивая напряжение питания, например, от 5 до 6 В ( $\Delta U_{\text{к}} = U_{\text{к}2} - U_{\text{к}1} = 1\text{В}$ ), измеряем приращение тока коллектора  $\Delta I_{\text{к}} = I_{\text{к}2} - I_{\text{к}1}$ . Выходное сопротивление транзистора рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{к}} / \Delta I_{\text{к}}$$

Выходные характеристики транзистора, продленные в левую полу- плоскость, сходятся на оси  $U_{\text{к}}$  в одну точку, которая определяет напряже- ние Эрли.

Напряжение Эрли можно рассчитать по формуле:

$$U_{\text{эрли}} \approx I_{\text{к}1} R_{\text{вых}}$$

Измерения проводятся при токах коллектора от 0,1 до 10 мА.

### 1.1.3. Измерение коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером в статическом режиме

Схема, с помощью которой измеряется интегральный коэффициент усиления по току биполярного транзистора **В**, приведена на рис. 6.

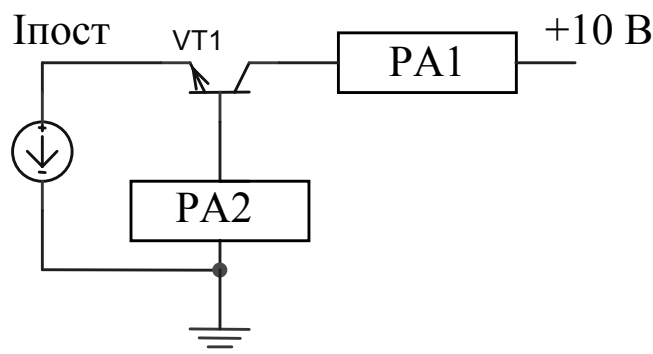


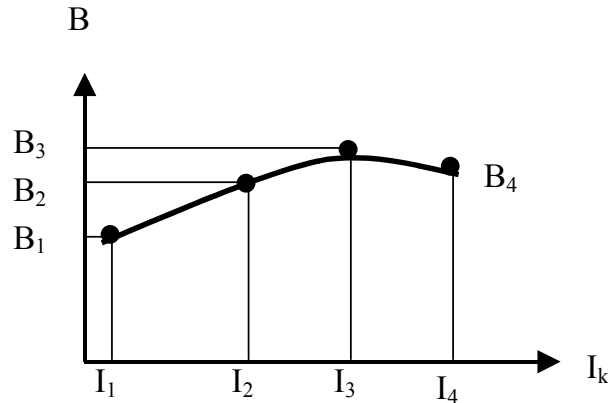
Рис. 6

В цепь эмиттера включен источник тока, задающий ток в статиче- ском режиме. Амперметрами измеряются постоянные токи в цепях базы и

коллектора  $I_{\text{б}}$  и  $I_{\text{к}}$ . Коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером в статическом режиме (интегральная характеристика) рассчитывается по формуле:

$$\mathbf{B} = I_{\text{к}} / I_{\text{б}}.$$

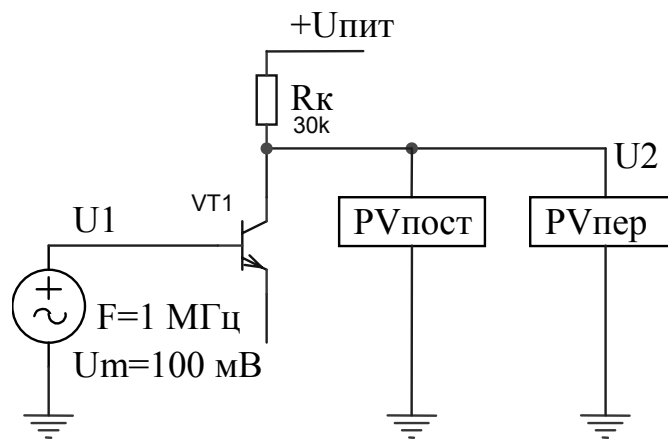
Величины  $\mathbf{B}$  измеряются при различных значениях постоянного тока эмиттера (от 0.1 до 50 мА). Строится зависимость  $\mathbf{B} = f(I_{\text{к}})$  (рис. 7), из которой определяется максимальное значение  $\mathbf{B}$  для статического режима.



**Рис. 7**

#### 1.1.4. Измерение емкости обратносмещенного коллекторно-базового перехода $S_{\text{к}}$

Измерительная схема приведена на рис. 8.



**Рис. 8**

Емкость обратно-смещенного коллекторно-базового перехода  $S_{\text{к}}$  образует с сопротивлением резистора  $R_{\text{к}}$  делитель напряжения. Измерив значения переменных напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , можно рассчитать емкость  $S_{\text{к}}$  по формуле:

$$C_k = \frac{U_2}{2\pi F R_k (U_1 - U_2)},$$

где  $F$  – частота источника синусоидального напряжения.

Для повышения точности определения емкости  $C_k$  сопротивление  $R_k$  подбирается таким, чтобы  $U_2 \approx 0,5U_1$ . Измерения производятся при различных значениях постоянного напряжения коллектор-база путем изменения напряжения питания от 1 до 10 В. Строится зависимость  $C_k=f(U_{кб})$ . Аналогично может быть измерена емкость обратно-смещенного эмиттерно-базового перехода.

### 1.1.5. Измерение времени рассасывания

Экспериментально время рассасывания накопленного в транзисторе заряда определяется по схеме рис. 9.

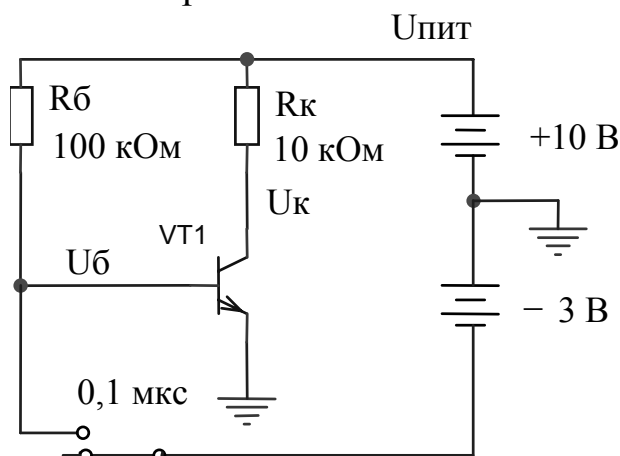


Рис. 9

Токи коллектора и базы в режиме насыщения рассчитываются по формулам:

$$I_{к_{нас}} \approx \frac{U_{пит}}{R_k}; \quad I_{б_{нас}} \approx \frac{U_{пит} - 0,7В}{R_b}.$$

Отношение токов  $I_{к_{нас}}/I_{б_{нас}}$  выбрано равным 10.

В исходном состоянии транзистор VT1 находится в режиме насыщения. Затем на вход схемы через реле времени подается запирающее напряжение  $-3$  В. При этом ток базы скачкообразно изменяется от  $I_{б_1}$  до  $-I_{б_2}$ . Далее выполняется команда Analysis/Transient, в диалоговом окне устанавливается конечное время моделирования (0,2 мкс), номера узлов  $U_b$  и  $U_k$  и нажимается кнопка Simulate. (Для определения номеров узлов необходимо сделать их видимыми по команде Circuit/Schematic Options/Show и простановкой галочки в строке Show nodes). В окне Analysis Graphs с помощью двух курсоров измеряется время рассасывания  $t_{рас}$  (рис. 10).



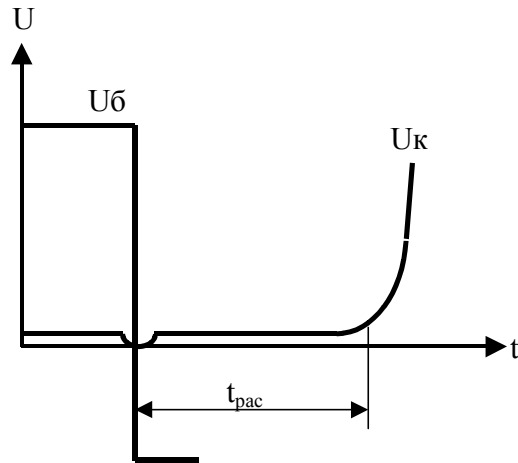


Рис. 10

### 1.1.6. Измерение граничной частоты транзистора

Измерение граничной частоты  $F_{гр}$  производится в динамическом режиме по схеме, приведенной на рис. 11.

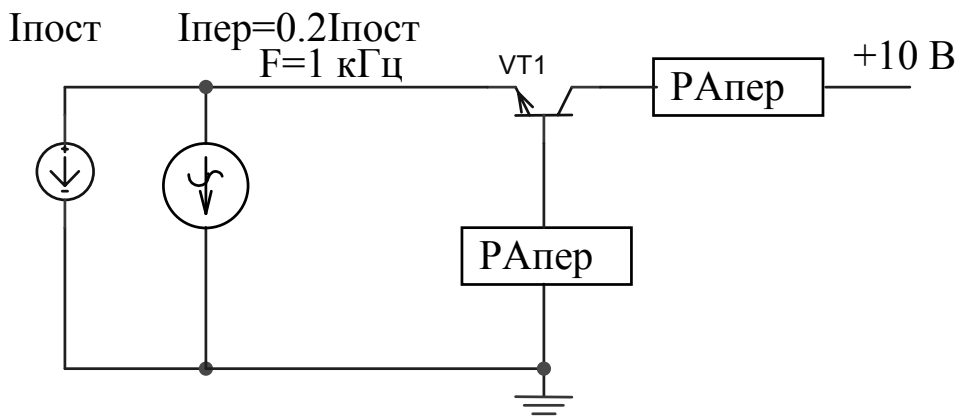


Рис. 11

В цепь эмиттера включены два источника тока: источник  $I_{пост}$ , задающий ток эмиттера в статическом режиме, и источник  $I_{пер} = 0,2I_{пост}$ , задающий синусоидальный ток с частотой 1 кГц и амплитудой, равной  $0,2I_{пост}$ . В цепях базы и коллектора измеряются переменные токи  $I_{б\ пер}$  и  $I_{к\ пер}$ . Коэффициент усиления по току в динамическом режиме для схемы с ОЭ (малосигнальная характеристика) равен:

$$\beta = I_{к\ пер} / I_{б\ пер}$$

При постоянном значении тока эмиттера  $I_{пост}$  измеряется коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером  $\beta$  при изменении частоты переменного сигнала. Строится график зависимости  $\beta$  от частоты (рис. 12).

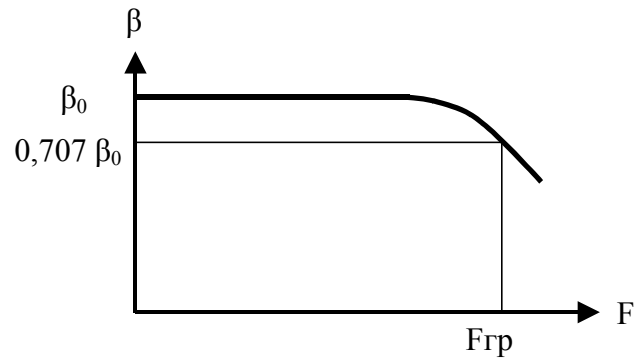


Рис. 12

Из графика находится граничная частота транзистора  $F_{гр}$ , при которой значение  $\beta$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз. Измерения граничной частоты производятся при токах эмиттера от 0,1 мА до 50 мА. Строится график зависимости  $F_{гр}=f(I_э)$ .

### 1.1.7. Измерение объемного сопротивления области базы

Схема измерения приведена на рис. 13.

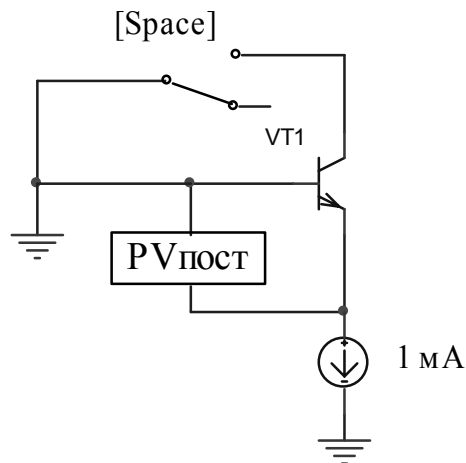


Рис. 13

При одном и том же токе эмиттера измеряется напряжение  $V_{эб}$  при замкнутом и разомкнутом ключе. Сопротивление базы рассчитывается по формуле:  $R_б=(V_{бэ2} - V_{бэ1})/I_э$ , где  $V_{бэ2}$  - напряжение база-эмиттер при разомкнутом ключе,  $V_{бэ1}$  - при замкнутом ключе.

### Лабораторное задание к подразделу 1.1.

1. Получить у преподавателя тип исследуемого транзистора. Транзистор выбирается из библиотеки National.lib, находящейся в каталоге ..\Workbench\ Models\Vjt\_npn.
2. Выполнить пункты 1.1.1-1.1.7.
3. Рассчитать параметры математической модели биполярного транзистора согласно приложения II.
4. Сравнить рассчитанные параметры с параметрами математической модели исходного транзистора.

### 1.2. Ключ на биполярном транзисторе

Транзисторный ключ (рис. 14) характеризуется двумя устойчивыми состояниями.

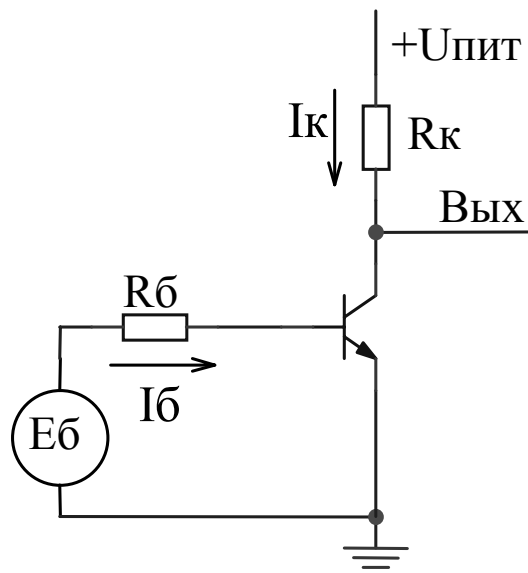


Рис. 14

Высокое выходное напряжение, близкое к напряжению питания, соответствует логической единице (“1”), низкое выходное напряжение, близкое к нулевому, соответствует логическому нулю (“0”).

*Статический режим.* В статическом режиме ключ может находиться в открытом или в закрытом состоянии. В закрытом состоянии на вход ключа подается логический “0”, при этом коллекторно-базовый переход смещен в обратном направлении, эмиттерно-базовый переход при низком напряжении логического “0” закрыт (режим отсечки). На выходе устанавливается логическая “1”. В открытом состоянии на вход ключа подается высокое напряжение (логическая “1”), оба перехода смещены в прямом направлении и транзистор находится в режиме насыщения. Выходное напря-

жение соответствует логическому “0”. Открытое состояние характеризуется током насыщения ключа:

$$I_{к_{нас}} = (U_{пит} - U_{кэ_{нас}}) / R_{к} \approx U_{пит} / R_{к}$$

и степенью насыщения ключа:

$$S = \beta I_{б} / I_{к_{нас}}$$

При его увеличении увеличивается нагрузочная способность ключа, снижается влияние дестабилизирующих факторов, но ухудшается быстродействие. Рекомендуемое значение степени насыщения – 2-3.

Для исследования статического режима ключа собирается схема по рис. 15.

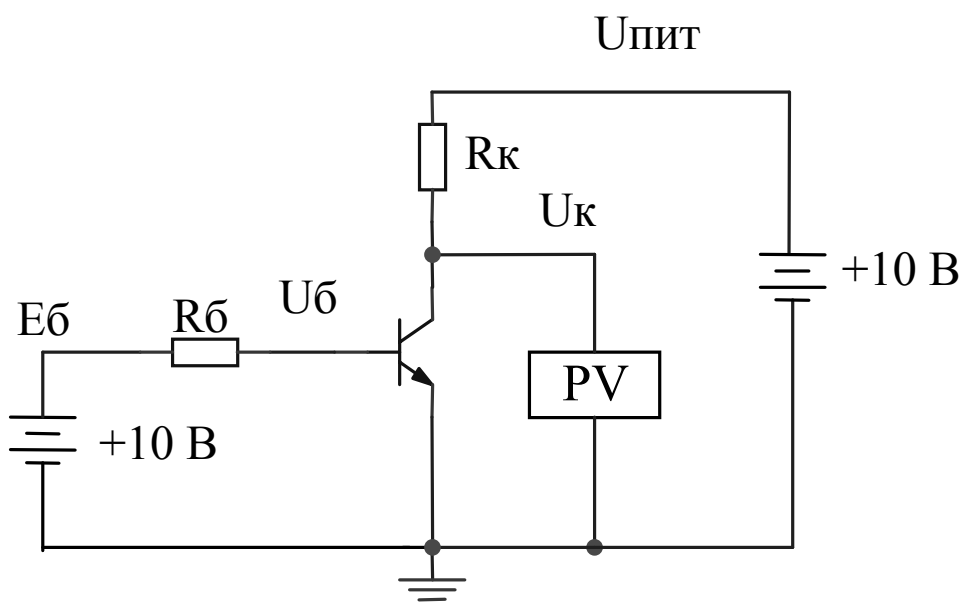


Рис. 15

По заданному току коллектора в режиме насыщения  $I_{к_{нас}}$  и коэффициенту насыщения рассчитываются сопротивления резисторов  $R_{к}$  и  $R_{б}$ :

$$R_{к} \approx U_{пит} / I_{к_{нас}} ;$$

$$R_{б} = \beta \frac{E_{б} - 0,7V}{I_{к_{нас}}}$$

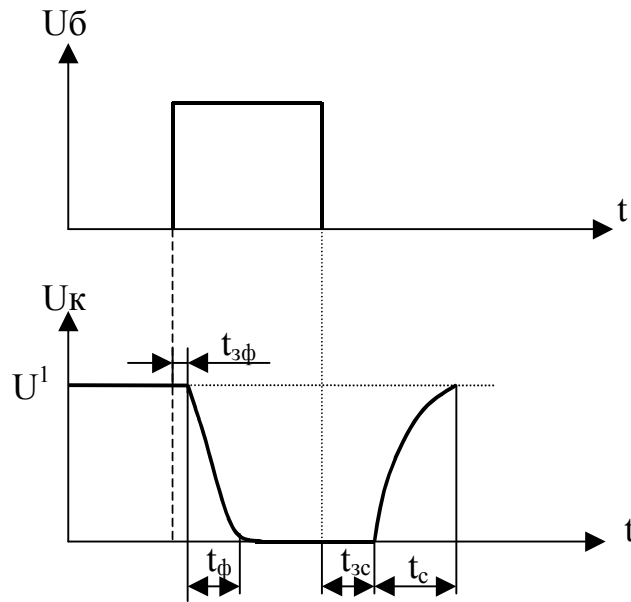
Вольтметром измеряются выходные уровни логического “0” ( $U^0$ ) и логической “1” ( $U^1$ ) при заданном коэффициенте насыщения транзистора.

Варианты заданий приведены в таблице 2.

Таблица 2

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{к}$ , мА	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
S	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2

*Динамический режим.* В динамическом режиме на транзистор подаются импульсы прямоугольной формы. При этом в ключе возникают переходные процессы. На рис. 16 приведены графики зависимости тока коллектора от времени при подаче на вход ключа прямоугольных импульсов.



**Рис. 16**

На рисунке обозначено:

- $t_{зф}$  — задержка фронта. Определяется постоянной времени заряда входной емкости транзистора:  $\tau_6 = R_b(C_{э} + C_k)$ , где  $C_{э}$ ,  $C_k$  — барьерные емкости эмиттерного и коллекторного переходов;
- $t_{ф}$  — время формирования фронта. Определяется постоянной времени коллекторно-базового перехода:  $\tau_k = \beta C_k R_k$ ;
- $t_{зс}$  — время рассасывания неосновных носителей в базе. Определяется временем жизни носителей в базе и коллекторе;
- $t_c$  — время формирования среза. Определяется постоянной времени коллекторной цепи.

Время  $t_{зф} + t_{ф}$  определяет время включения ключа, а  $t_{зс} + t_c$  — время выключения ключа.

Для определения времени переходных процессов в ключе собирается схема по рис. 17. Номиналы резисторов берутся из расчета статического режима ключа.

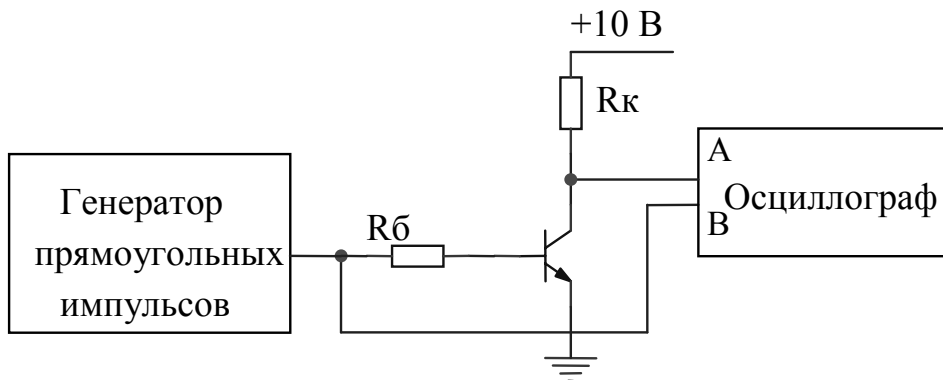


Рис. 17

С помощью двухлучевого осциллографа измеряются времена задержек выходного сигнала. Для удобства определения временных задержек выполняется команда Analysis/Analysis Options/Instrument. В диалоговом окне настройки параметров контрольно-измерительных приборов в поле Oscilloscope помечается галочкой строка Pause after each screen. В этом случае после заполнения экрана осциллографа выполняется временная остановка моделирования. Рекомендуется цепи, подводящие сигналы ко входам осциллографа, окрасить в разные цвета для лучшего восприятия характеристик на экране осциллографа. Частоту импульсов задать в пределах от 0,1 до 1 МГц. Длительность развертки подобрать такой, чтобы на экране осциллографа просматривался один выходной импульс (см. рис. 16). Нажать кнопку Expand и измерить время задержек  $t_{зф}+t_{ф}$ ,  $t_{зс}$ ,  $t_{с}$ .

*Лабораторное задание к подразделу 1.2.*

Исследовать статические и динамические режимы работы транзисторного ключа.

### 1.3. УСИЛИТЕЛЬ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Схема транзисторного усилителя с общим эмиттером приведена на рис. 18.

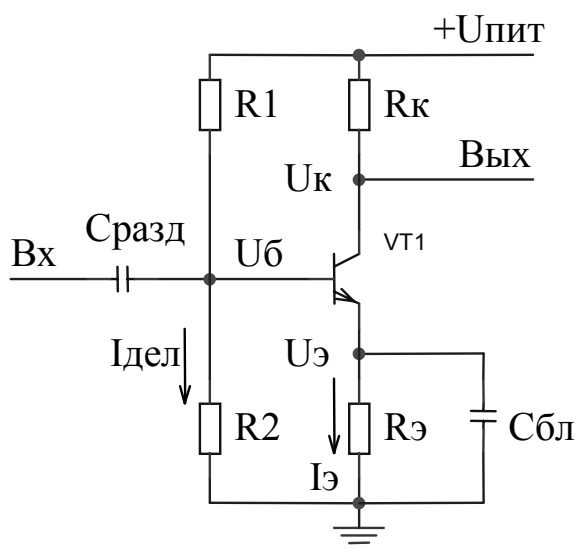


Рис. 18

Схема содержит усилительный элемент, выполненный на транзисторе VT1, сопротивление нагрузки Rк, сопротивление для стабилизации режима по постоянному току Rэ, делитель на резисторах R1, R2, задающий потенциал базы транзистора VT1, разделительный конденсатор Cсрзд, применяемый для разделения входной цепи транзистора и источника сигнала по постоянному току, блокировочный конденсатор Cбл, служащий для увеличения коэффициента усиления каскада в рабочей полосе частот. В схеме обычно выполняется условие, что в рабочей полосе частот емкостное сопротивление блокировочного конденсатора Cбл много меньше сопротивления резистора Rэ ( $1/\omega C_{бл} \ll R_{э}$ ).

Усилительный каскад сначала рассчитывают по постоянному току (статический режим). При этом виде расчета проектировщик задается обычно напряжениями и токами в узлах (цепях) схемы и сопротивлением Rэ, исходя из требований к усилителю. В результате расчета определяются сопротивления резисторов, обеспечивающих выбранные режимы:

$$R_k = (U_{пит} - U_k) / I_k$$

$$I_{дел} \approx 0,1 I_k$$

$$U_{э} = I_{э} R_{э}$$

$$R_1 = (U_{пит} - U_{б}) / I_{дел}$$

$$U_{б} \approx I_{э} R_{э} + 0,7 \text{ В}$$

$$R_2 = U_{б} / I_{дел}$$

При расчете каскада по переменному току определяются коэффициент усиления по напряжению, входное сопротивление, верхняя Fв и нижняя Fн граничные частоты. Коэффициент усиления по напряжению в рабочей полосе частот равен:

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{R_k}{r_3 + (R_{г} + r_6) / \beta},$$

где  $r_3 = m \varphi_T / I_{э}$  – дифференциальное сопротивление прямосмещенного эмиттерно-базового перехода,  $\varphi_T = 26 \text{ мВ}$  – температурный потенциал, m – ко-

ээффициент, характеризующий качество эмиттерного перехода ( $m=1.05 - 1.3$ ),  $R_{\Gamma}$  – сопротивление источника сигнала и параллельно включенных ему сопротивлений  $R_1, R_2$ .

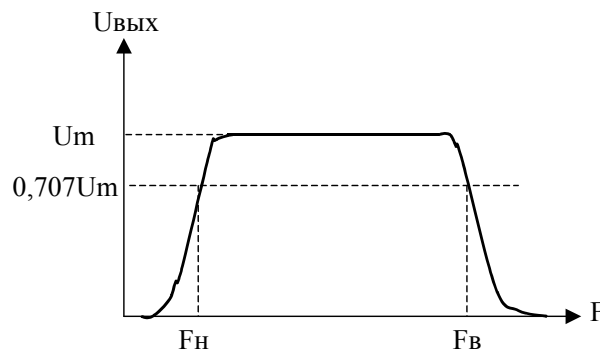
Входное сопротивление транзистора в рабочей полосе частот равно

$$R_{вх_{тр}} = \beta r_3 + r_6.$$

Для определения входного сопротивления  $R_{вх}$  каскада необходимо учесть параллельное включение сопротивлений  $R_{вх_{тр}}, R_1$  и  $R_2$ .

Верхняя и нижняя граничные частоты определяются из амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) усилителя.

АЧХ представляет зависимость выходного напряжения  $U_{вых}$  от частоты  $F$  (рис. 19).



**Рис. 19**

Нижняя и верхняя граничные частоты соответствуют частоте, на которой выходное напряжение  $U_m$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз.

Емкость конденсатора  $C_{бл}$  выбирается из условия обеспечения нижней граничной частоты:

$$C_{бл} = \frac{1}{0,82\pi F_{Н} [r_3 + (R_{\Gamma} + r_6) / \beta]}.$$

Слагаемое  $(R_{\Gamma} + r_6) / \beta$  можно принять равным нулю, так как источник сигнала в программе EWB имеет  $R_{\Gamma} = 0$ , а составляющая  $r_6 / \beta$  при высоких значениях коэффициента усиления по току современных транзисторов ( $\beta > 100$ ) будет много меньше  $r_3$ . Тогда

$$C_{бл} \approx \frac{1}{0,82\pi r_3 F_{Н}}.$$

Емкость разделительного конденсатора также выбирается из условия обеспечения нижней граничной частоты:

$$C_{разд} = \frac{1}{0,82\pi f_{н} R_{вх}}.$$

Верхняя граничная частота усилителя приближенно оценивается из следующего соотношения, учитывающего сопротивление нагрузки в цепи коллектора и емкость перехода коллектор-база:



$$F_B \approx \frac{1}{2\pi R_K C_K}$$

При предложенном методе расчета емкостей конденсаторов Сбл и Сразд выходное напряжение уменьшается на частоте  $F_H$  в два раза. То есть реальная нижняя граничная частота оказывается несколько выше заданной. Формулы для расчета Сбл и Сразд справедливы при невысоких уровнях коллекторного тока (до 5 мА).

*Лабораторное задание к подразделу 1.3.*

Рассчитать сопротивления резисторов и емкости конденсаторов усилителя по заданным исходным данным (таблица 3).

Таблица 3

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Uпит, В	6	9	12	15	21	21	15	12	9	6
Iк, мА	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0
Uк, В	4	5	6	8	10	10	8	6	5	4
Rэ, кОм	4	3	2	1	0,5	4	3	2	1	0,5
Fн, Гц	40	100	200	500	1000	1000	500	200	100	40

Рассчитать коэффициент усиления и входное сопротивление усилителя. Экспериментально измерить постоянное напряжение  $U_k$ . Изменяя сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , выставить заданное в задании напряжение  $U_k$ . Затем экспериментально снять характеристики транзисторного усилителя: коэффициент усиления, входное сопротивление, амплитудно-частотную характеристику. При измерениях на вход усилителя подать синусоидальное напряжение с действующим значением 1 мВ и частотой 10 кГц. Для измерения  $R_{вх}$  использовать схему, приведенную на рис. 20. Сопротивление генератора  $R_{ген}$  выбрать приблизительно равным входному сопротивлению каскада. Измерить напряжения  $U_1$  и  $U_2$ .

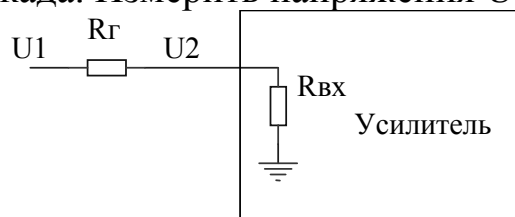


Рис. 20

Из рис. 20 можно получить следующую формулу для расчета входного сопротивления:

$$R_{вх} = \frac{U_2}{U_1 - U_2} R_g$$

Для определения АЧХ подключить к усилителю измеритель АЧХ (Bode Plotter) и измерить частоты  $F_H$  и  $F_B$ .

## 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

### 2.1. Измерение параметров диодов

Эквивалентная схема полупроводникового диода (рис. 21) состоит из идеального диода, изображенного в виде нелинейного источника тока  $I(V)$ , емкости р-п-перехода  $C$  и объемного сопротивления  $R_S$ .

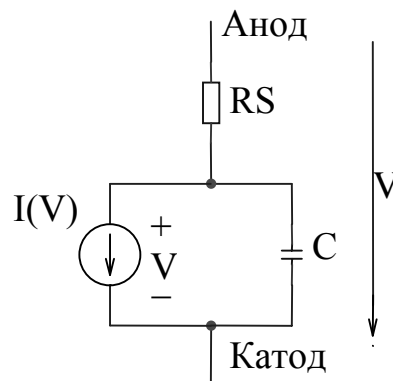


Рис. 21

Эквивалентная схема справедлива как для диодов, так и для стабилизаторов и отличается только конкретным значением напряжения пробоя. Для расчета параметров математической модели диода необходимо снять ряд характеристик.

#### 2.1.1. Прямая ветвь вольтамперной характеристики

Схема, с помощью которой снимается прямая ветвь ВАХ диода, приведена на рис. 22.

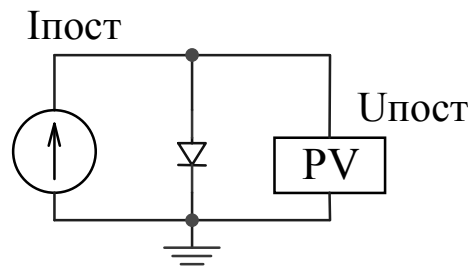


Рис. 22

Источник тока  $I_{\text{пост}}$  задает ток через диод в статическом режиме. Вольтметр  $PV$  измеряет напряжение на диоде. Измерения производятся при токах от 0,1 мА до 50 мА.

### 2.1.2. Измерение емкости p-n-перехода

Измерение производится так же, как и измерение емкости коллекторно-базового перехода  $S_k$  биполярного транзистора (см. пункт 1.1.4). В схеме рис. 8 вместо коллекторно-базового перехода включается диод. Катод диода подключается к резистору  $R_k$ , а анод – к источнику сигнала  $U_1$ . Снимается зависимость барьерной емкости диода от величины обратного смещения (от 1 до 50 В).

### 2.1.3. Измерение обратного тока

Измерительная схема приведена на рис. 23.

$$U_{\text{пост}} = (1-50) \text{ В}$$

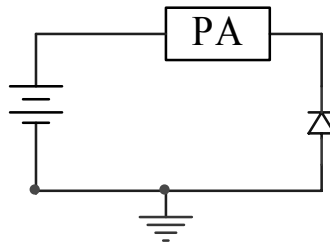


Рис. 23

Диод смещается в обратном направлении и амперметром измеряется обратный ток диода. Измерения обратного тока производятся в диапазоне напряжений от 1 В до предпробойного состояния.

### 2.1.4. Измерение напряжения пробоя

Напряжение пробоя (для стабилитронов – напряжение стабилизации) определяется для конкретного значения тока пробоя. Измерения производятся по схеме рис. 24.

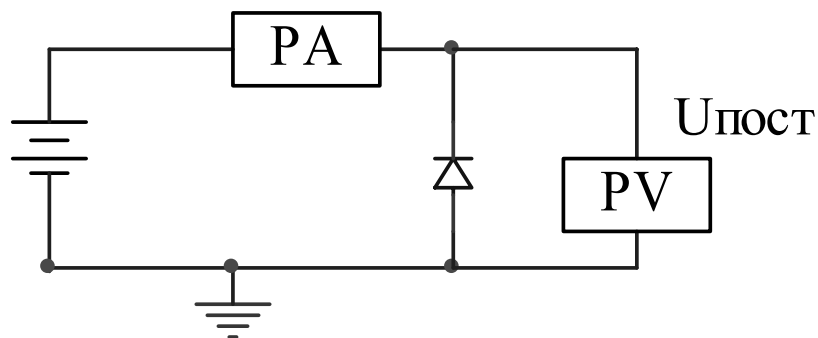


Рис. 24

Напряжение батареи постепенно увеличивается до тех пор, пока амперметр не покажет заданный ток пробоя  $I_{пр1}$ , после чего вольтметром измеряется напряжение пробоя  $U_{пр1}$ . Кроме того, определяется дифференциальное сопротивление в точке пробоя. Для этого напряжение батареи немного увеличивается (на 10-20%) и повторно измеряется ток пробоя  $I_{пр2}$  и напряжение пробоя  $U_{пр2}$ . Дифференциальное сопротивление в точке пробоя рассчитывается по формуле:

$$R_{диф} = \frac{U_{пр2} - U_{пр1}}{I_{пр2} - I_{пр1}}.$$

### 2.1.5. Измерение времени рассасывания

Время рассасывания заряда в диоде определяется по схеме, приведенной на рис. 25.

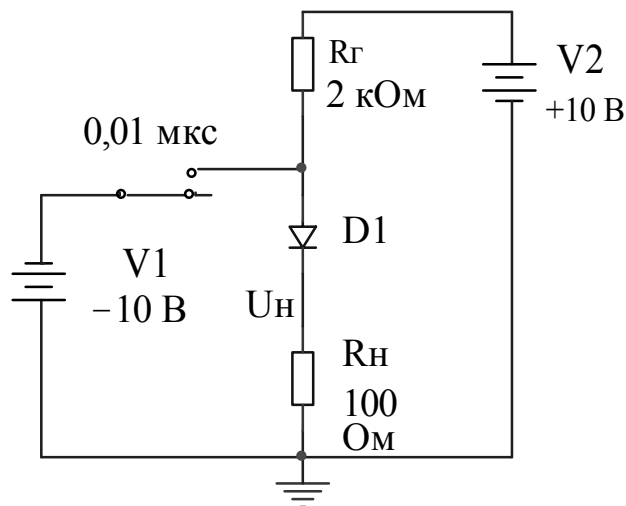


Рис. 25

Диод D1 смещается в прямом направлении источником V2. Через диод протекает ток, ограниченный резистором Rг (около 5 мА). Через время 0,01 мкс к диоду подключается источник отрицательного напряжения V1. При этом ток через диод скачкообразно изменяется. Переходной процесс просматривается в окне Analysis Graphs после выполнения команды Analysis/Transient (узел Uн).

#### Лабораторное задание к подразделу 2.1.

1. Получить у преподавателя тип исследуемого диода. Диод выбирается из библиотеки National.lib, находящейся в каталоге ..\Workbench\ Models\Diode.

2. Выполнить пункты 2.1.1-2.1.5.

3. Рассчитать параметры математической модели диода согласно приложения II.

4. Сравнить рассчитанные параметры с параметрами математической модели исходного диода.

## 2.2. Диодная схема выпрямителя

Схема выпрямителя приведена на рис. 26.

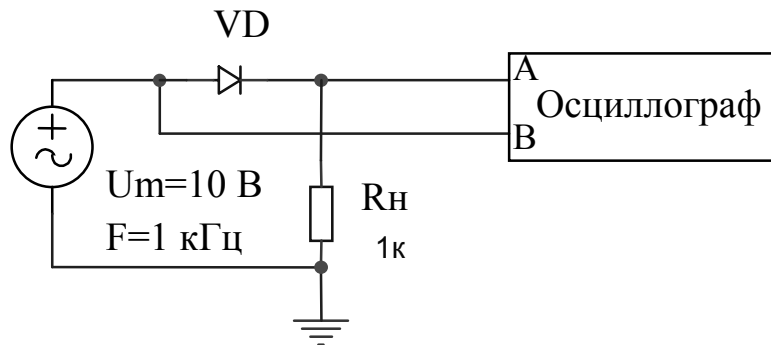


Рис. 26

На вход схемы подается синусоидальное напряжение. При положительной полуволне диод открыт и сигнал поступает на сопротивление нагрузки  $R_H$ . При отрицательной полуволне диод закрыт и напряжение на  $R_H$  равно нулю. Эффект выпрямления наблюдается с помощью двухлучевого осциллографа.

## 2.3. Схема стабилизации напряжения

Параметрическая стабилизация напряжения выполняется с использованием стабилитрона (рис. 27,а).

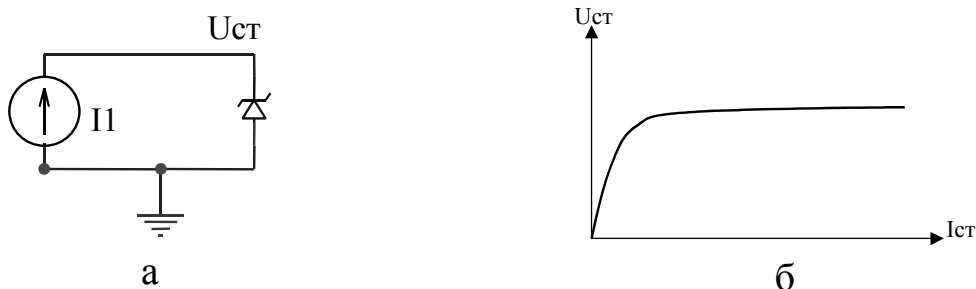


Рис. 27

На рис. 27,б приведена ВАХ стабилитрона. Перед измерением ВАХ выполняется команда Circuit/Schematic Options/Show и проставляются галочки в строках Show reference ID и Show nodes, чем обеспечивается видимость позиционных обозначений элементов и узлов схемы. Далее в диалоговом окне, открывающемся после выполнения команды Analysis/Parameter Sweep, указывается компонент (I1), в поле Analysis проставляется начальное и конечное значение тока (от 0 до 50 мА), выбирается тип представления выходного напряжения Linear (в поле Sweep Type), указывается в поле Increment step size шаг приращения тока (0,1 мА). В поле Output node выби-

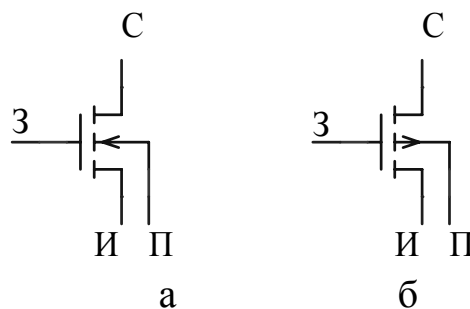
рается номер узла, с которого снимается стабилизированное напряжение. Нажимается кнопка Simulate. В окне Analysis Graphs с помощью двух курсоров измеряется величина стабилизированного напряжения при двух значениях тока стабилизации. Дифференциальное сопротивление стабилизатора рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}}$$

*Лабораторное задание к подразделам 2.2, 2.3.* Исследовать схемы выпрямителя и стабилизатора напряжения.

### 3. МДП – ТРАНЗИСТОРЫ

МДП – транзисторы имеют структуру металл-диэлектрик-полупроводник. В частном случае, если диэлектриком является окисел, используется название МОП – транзистор. В цифровых интегральных схемах наиболее часто применяются МОП – транзисторы с индуцированным каналом. Условные графические обозначения таких транзисторов показаны на рис. 28. На нем обозначено: З – затвор, И – исток, С – сток, П – подложка.



**Рис. 28**

На рис.28,а приведен транзистор с индуцированным каналом n-типа проводимости, на рис. 28,б – p-типа проводимости. В таких транзисторах канал до подачи напряжений на электроды транзистора отсутствует и появляется только после подачи на затвор напряжения, выше порогового.

Ниже рассматриваются схемы для измерения характеристик и параметров МОП – транзисторов. Тип исследуемого транзистора задается преподавателем и выбирается из библиотеки Philips .lib, находящейся в каталоге ..\Workbench\ Models\Jfet\_n.

### 3.1. Выходные вольтамперные характеристики и выходное сопротивление МОП – транзистора

Для снятия характеристик собирается схема, приведенная на рис. 29.

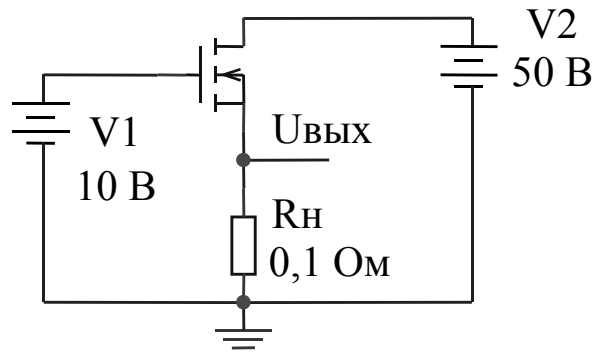


Рис. 29

Снимается зависимость тока стока от напряжения на стоке при постоянном напряжении на затворе. Ток стока пропорционален выходному напряжению:  $I_c = U_{\text{вых}} / R_n$ . Выполняется команда Analysis/Parameter Sweep. В диалоговом окне задается изменяемый параметр (источник напряжения V2), его начальное и конечное значение (0 и 50 В), шаг приращения напряжения источника V2 (0,1 В), нажимается кнопка Simulate. В окне Analysis Graphs прорисовывается выходная ВАХ МОП – транзистора при заданном значении напряжения на затворе. Изменяя напряжение на затворе, снимается ряд выходных характеристик.

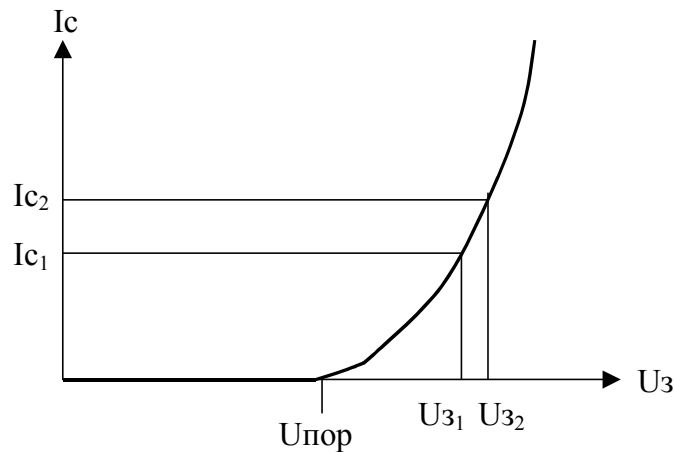
Выходное сопротивление транзистора определяется из выходной ВАХ и рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c},$$

где  $\Delta I_c$  – приращение тока стока при изменении напряжения на стоке на величину  $\Delta U_c$ .

### 3.2. Проходная характеристика, крутизна и пороговое напряжение МОП – транзистора

Проходной характеристикой называют зависимость тока сток-исток от напряжения на затворе (рис. 30).



**Рис. 30**

Из этой характеристики можно определить крутизну транзистора в заданной рабочей точке:

$$S = \frac{I_{c2} - I_{c1}}{U_{з2} - U_{з1}} = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_z},$$

а так же пороговое напряжение  $U_{пор}$ , при котором начинает появляться ток стока.

Проходная характеристика снимается по схеме предыдущего рисунка (см. рис. 29). Выполняется команда Analysis/Parameter Sweep. В качестве изменяемого параметра выбирается источник напряжения V1, для которого устанавливаются пределы изменения напряжения (от 0 до 3-10 В) и шаг приращения напряжения (0,1 В). Верхнее значение напряжения на затворе выбирается из расчета, чтобы ток стока при этом напряжении был равен 10-20 мА. Характеристика заносится в отчет.

По проходной характеристике рассчитывается крутизна МОП – транзистора по формуле:

$$S = \frac{\Delta U_{вых}}{R_n \Delta U_z},$$

где  $\Delta U_{вых}$  – приращение выходного напряжения при заданном приращении напряжения на затворе. Величины  $\Delta U_{вых}$  и  $\Delta U_z$  измеряются в окне Analysis Graphs с помощью двух курсоров.

Крутизна измеряется в различных точках проходной характеристики.

Кроме того, по проходной характеристике определяется пороговое напряжение  $U_{пор}$ .



Лабораторное задание к подразделам 3.1, 3.2. Исследовать основные характеристики МОП – транзистора.

### 3.3. Усилитель на МОП – транзисторе

Схема усилителя на n-канальном МОП – транзисторе приведена на рис. 31.

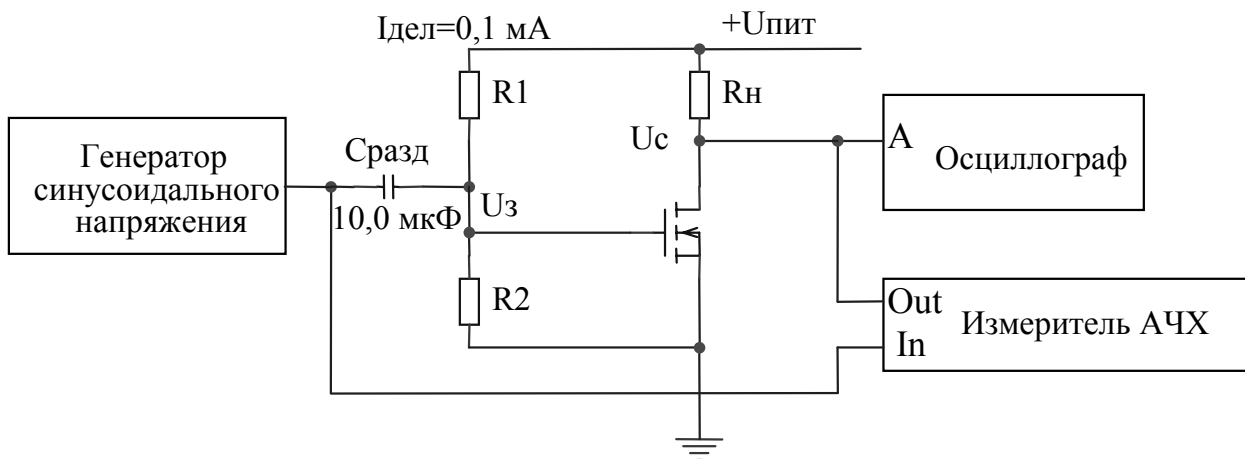


Рис. 31

Резисторами R1 и R2 задается смещение на затворе МОП – транзистора. Напряжение затвор – исток  $U_z$  выбирается из проходной характеристики (см. разд. 3.2) по заданному току стока  $I_c$  (таблица 4).

Таблица 4

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_c$ , мА	1	2	3	4	5	5	4	3	2	1
$U_{пит}$ , В	10	12	14	16	18	10	12	14	16	18
$U_c$ , В	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10

Сопротивления резисторов R1 и R2 находятся из соотношений:

$$R1 = (U_{пит} - U_z) / I_{дел}; \quad R2 = U_z / I_{дел}.$$

Задаваясь напряжением на стоке, находим сопротивление нагрузки:

$$R_n = (U_{пит} - U_c) / I_c.$$

Коэффициент усиления усилителя по напряжению определяется произведением крутизны на сопротивление нагрузки:

$$K_u = S R_n.$$

Произведя расчеты сопротивлений резисторов и коэффициент усиления каскада, собирается схема усилителя, ко входу которого подключается генератор синусоидального напряжения, амплитуда которого выбирается такой, чтобы усилитель не входил в режим ограничения. К выходу подключается осциллограф, а так же измеритель АЧХ. Экспериментально определяется коэффициент усиления на низкой частоте ( $F=1$  кГц) и сравнивается с расчетным. Снимается АЧХ усилителя.

### 3.4. Ключи на МОП – транзисторах

Ключи выполняются с резистивной нагрузкой (рис. 32,а), с нелинейной нагрузкой (рис.32,б) или в виде комплементарной пары МОП – транзисторов (рис. 32,в).

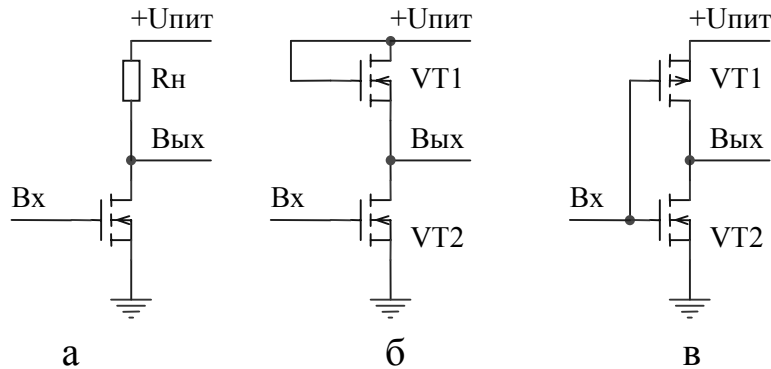


Рис. 32

При исследовании схемы с резистивной нагрузкой исходные данные (ток стока и напряжение питания) берутся из таблицы 4. Сопротивление резистивной нагрузки рассчитывается по формуле

$$R_n \approx U_{\text{пит}}/I_c.$$

В статическом режиме для схем рис. 1 измеряются уровни логического “0”  $U^0$  и логической “1”  $U^1$ , а так же потребляемая мощность. Потребляемая мощность измеряется при открытом и закрытом ключе и рассчитывается средняя потребляемая мощность.

В динамическом режиме измеряются переходные процессы: время фронта  $t_f$  и время среза  $t_{ср}$  (рис. 33). На вход ключа подаются прямоугольные импульсы с частотой 0,1 – 1 МГц и амплитудой 5 В.

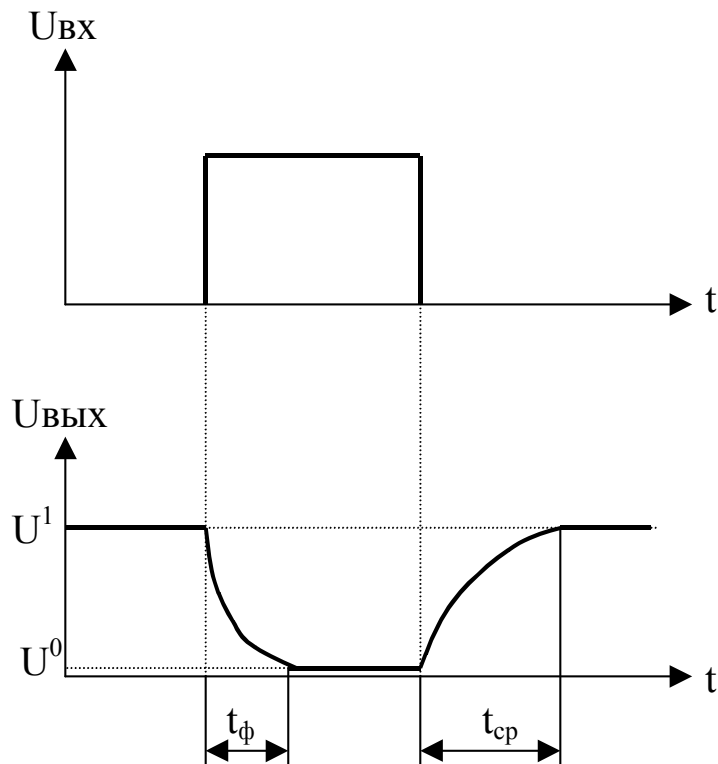


Рис. 33

В отличие от ключей на биполярных транзисторах в МОП – ключах отсутствует эффект накопления зарядов, так как МОП – транзисторы работают на основных носителях заряда.

Время фронта  $t_{\phi}$  и среза  $t_{ср}$  определяются постоянной времени разряда и заряда паразитных емкостей ключа  $C_c$  через сопротивление нагрузки:

$$\tau = C_c R_n.$$

Среднее время задержки распространения сигнала через ключ равно:

$$t_{з.распр.} = \frac{t_{\phi} + t_{ср}}{2}.$$

Для резистивной и нелинейной нагрузок сопротивление нагрузки велико, поэтому время заряда имеет большую величину (сотни наносекунд). Для комплементарного ключа заряд и разряд  $C_c$  происходит через открытый МОП – транзистор (n-канальный или p-канальный), поэтому время переключения составляет десятки наносекунд.

*Лабораторное задание к подразделам 3.3, 3.4. Исследовать усилитель и ключ на МОП – транзисторах.*

## ПРОГРАММА ELECTRONICS WORKBENCH (EWB 5.0)

Программа Electronics Workbench [2, 3] удобна для проведения лабораторных работ тем, что в ней имеются контрольно-измерительные приборы, которые по внешнему виду и управлению приближены к промышленным аналогам.

В программе EWB выполняются следующие стандартные операции:

- Параметры компонентов схем, измерительных приборов, источников сигналов, источников питания и др. – задаются в окне, появляющемся после двойного щелчка левой кнопкой мыши при наведении курсора на компонент, прибор и т.д.
- Выделение элемента схемы: курсор наводится на элемент и производится щелчок левой кнопкой мыши.
- Вызов контекстного меню: выделяется элемент и затем щелчком правой кнопки мыши вызывается контекстное меню со списком команд.

### I.1. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА EWB

#### I.1.1. Источники сигналов и источники питания

##### I.1.1.1. Источники постоянного напряжения и тока

На рис. I.1 представлены источники напряжения и тока, применяемые в программе EWB для питания электронных схем.

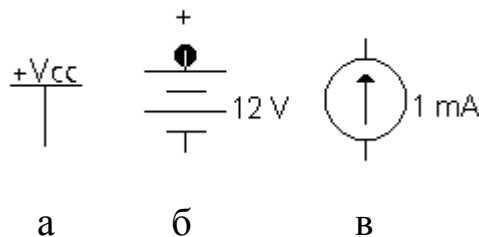


Рис. I.1

Источник постоянного напряжения VCC (I.1,a) применяется для питания цифровых схем. Батарея (рис. I.1,б) используется для питания аналоговых и цифровых схем. На рис. I.1,в показан источник постоянного тока.

### 1.1.1.2. Источники переменного напряжения и тока

Такие источники применяются в качестве входных сигналов в электронных схемах. На рис. 1.2 приведены различные источники сигналов.

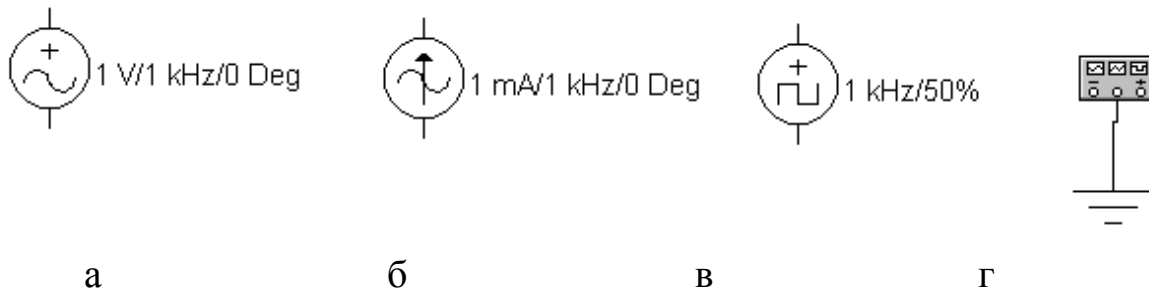


Рис. 1.2

В источнике переменного напряжения (рис. 1.2,а) задается эффективное значение напряжения, частота и фаза сигнала. В источнике переменного синусоидального тока (рис. 1.2,б) задается эффективное значение тока, частота и фаза сигнала. В источнике прямоугольных импульсов (рис. 1.2,в) задается амплитуда, частота и коэффициент заполнения импульсов. Коэффициент заполнения равен  $\frac{t_{и}}{T}100\%$ , где  $t_{и}$  – длительность входного импульса,  $T$  – период колебаний. Величина коэффициента заполнения обратна скважности. Коэффициент заполнения проставляется в строке Duty Cycle. Функциональный генератор (рис. 1.2,г) имеет два противофазных выхода и может генерировать сигналы синусоидальной, треугольной или прямоугольной формы.

### 1.1.2. Индикаторные приборы

Для индикации сигналов в программе EWB имеется ряд приборов:



Вольтметр. Измеряет в режиме DC постоянное напряжение и в режиме AC – переменное. Утолщенная линия вывода соответствует отрицательному потенциалу.



Амперметр. Имеет режимы AC и DC. (На схемах применены обозначения амперметра и вольтметра согласно отечественным ГОСТ)



Цифровой индикатор. Подключается к выводам двоично-десятичного счетчика. Левый вывод подсоединяется к старшему разряду.



Светодиод



Плавкий предохранитель



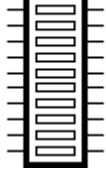
Логический пробник

200 Hz



Звуковая сигнализация

2 V



Десятисегментный светодиодный индикатор

### I.1.3. Коммутационные устройства

[Space]

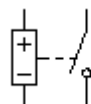


Однополюсный тумблер. Переключается клавишей «пробел» (Space).

0.5 s



Реле времени с программируемым временем переключения.



Выключатель, срабатывающий в заданном диапазоне входных напряжений.

1 V

### I.1.4. Пассивные и активные компоненты

Пассивные компоненты представлены резисторами, конденсаторами, индуктивностями, трансформаторами. Активные приборы представлены как дискретными компонентами (диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы с управляющим р-n-переходом, МДП-транзисторы), так и аналоговыми и цифровыми микросхемами.

### I.1.5. Контрольно-измерительные приборы

#### I.1.5.1. Мультиметр (Multimeter, рис. I.3)



Мультиметр измеряет действующие или постоянные значения напряжений и токов, сопротивления и ослабления (затухания). Кнопка Setting служит для установки параметров мультиметра.

Рис. I.3

### 1.1.5.2. Двухлучевой осциллограф (Oscilloscope)

Лицевая панель осциллографа приведена на рис. 1.4.

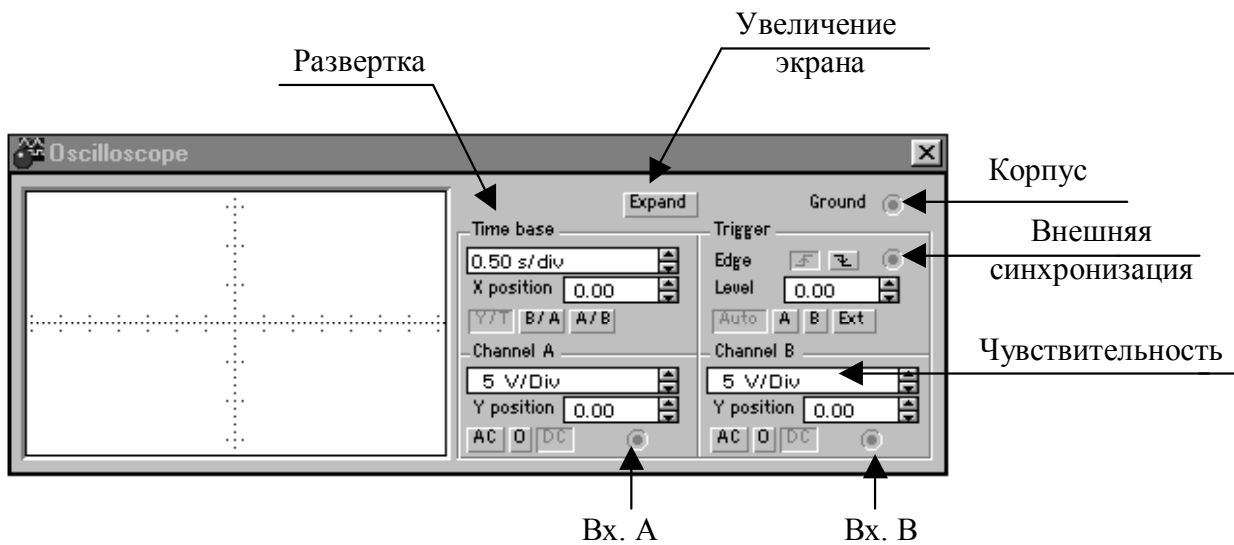


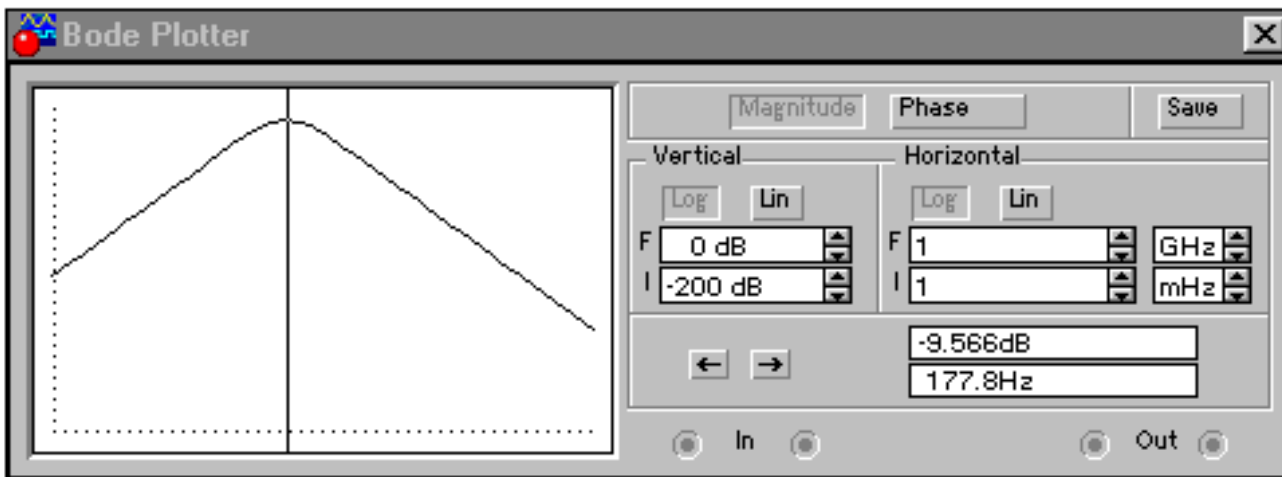
Рис. 1.4

Осциллограф имеет два канала (CHANNEL A и B) с отдельной регулировкой чувствительности от 10 мкВ/дел до 5 кВ/дел и регулировкой смещения по вертикали (YPOS). Режим по входу выбирается кнопками AC (наблюдается только переменный сигнал) и DC (наблюдается переменная и постоянная составляющие сигнала). Обычный режим развертки (по вертикали – напряжение сигнала, по горизонтали – время) выбирается кнопкой Y/T. В режиме B/A по вертикали откладывается напряжение канала B, по горизонтали – канала A. В режиме Y/T длительность развертки (Time Base) может быть задана в пределах от 0,1 нс/дел до 1с/дел. Развертка может иметь ждущий режим (Trigger) с запуском (Edge) по переднему или заднему фронту запускающего сигнала при регулируемом уровне (Level) запуска. Режимы запуска развертки выбираются либо Auto (от канала A или B), от канала A, от канала B или от внешнего источника (Ext).

При нажатии на кнопку Expand экран осциллографа увеличивается. Появляются две визирные линии, с помощью которых можно измерять напряжение, временные интервалы и их приращения. Возврат к исходному состоянию осциллографа осуществляется нажатием на кнопку Reduce.

### 1.1.5.2. Измеритель амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (Bode Plotter)

Лицевая панель измерителя АЧХ-ФЧХ приведена на рис. 1.5.



In      Gnd                      Out      Gnd  
**Рис. I.5**

Измеритель предназначен для анализа АЧХ (при нажатой кнопке Magnitude) и ФЧХ (при нажатой кнопке Phase) в логарифмическом или линейном масштабе (кнопки Log и Lin). Настройка измерителя заключается в выборе пределов измерения коэффициента передачи по вертикальной оси и вариации частоты по горизонтальной оси (F- максимальное значение, I- минимальное). Считывание показаний АЧХ-ФЧХ производится с помощью визирной линии, перемещаемой мышью или кнопками ← и →. Входы измерителя Вх и Вых подключаются ко входу и выходу исследуемого устройства, соответственно.

#### *I.1.5.4. Генератор слова (Word Generator)*

Генератор слова (кодový генератор) предназначен для генерации шестнадцати 8-разрядных двоичных слова.

#### *I.1.5.5. Логический анализатор (Logic Analyser)*

Логический анализатор предназначен для отображения на экране монитора шестнадцати 8-разрядных кодовых последовательностей одновременно в восьми точках схемы.

#### *I.1.5.6. Логический преобразователь (Logic Converter)*

Логический преобразователь имеет восемь входов (А, В, С, D ... Н) и один выход (OUT), экран для отображения таблицы истинности исследуемой схемы, экран-строку для отображения ее булева выражения.



Логический преобразователь имеет следующие варианты использования:

- логический анализ устройств с одним выходом;
- синтез логических устройств по таблице истинности;
- синтез логического устройства по булеву выражению.

## 1.2. СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Для удобства размещения компонентов можно сделать видимой сетку по команде *Circuit / Schematic Options / Show Grid*. Компоненты электрической схемы, измерительные приборы, источники сигналов и питания извлекаются из соответствующих меню при нажатии левой кнопки мыши (ЛКМ) и устанавливаются на экране. Соединение элементов производится в автоматическом режиме: курсор подводится к выводу элемента, появляется точка, затем, нажимая и удерживая в нажатом состоянии ЛКМ, перемещением мышки прокладывается прямолинейная цепь до другого вывода элемента, на котором также появляется точка. ЛКМ отпускается. Цепь прорисовывается в ортогональном режиме и состоит из горизонтальных и вертикальных отрезков, которые огибают установленные элементы схемы. Цепи можно редактировать следующим образом:

- Участки цепи можно переместить. Для этого курсор подводится к участку цепи. Нажимая и удерживая ЛКМ, перемещением мышки изменяем положение цепи. Аналогично перемещаются и узлы схемы.
- Цепи можно окрасить в любой цвет. Для этого цепь выделяется щелчком ЛКМ, и затем в контекстном меню выбирается команда *Wire Properties*. После чего в диалоговом окне в секции *Schematic Options* нажимаем кнопку *Setwire Color* и в следующем окне выбираем из палитры цвет проводника. Рекомендуется окрашивать в разные цвета цепи, подводимые ко входам осциллографа, так как графикам, отображаемым на экране осциллографа, присваивается цвет подсоединенных к его входам цепей.
- Удаление цепи. Удаляемая цепь выделяется и нажимается на клавиатуре клавиша *Del* или выбирается в контекстном меню команда *Delete*.

После создания схемы сетку можно отключить. Кроме того, можно просмотреть автоматически проставленные номера узлов схемы по команде *Circuit / Schematic Options / Show nodes*. Номера узлов могут использоваться в последующем для просмотра результатов моделирования в выбранных узлах.

### 1.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ

*1-й способ.* Если в схеме установлены измерительные приборы, то она запускается на моделирование включением напряжения питания тумблером, расположенным в правой верхней части экрана. Там же расположена кнопка Stop, с помощью которой можно зафиксировать процесс моделирования в определенном состоянии. На экране осциллографа просматриваются графики сигналов в выбранных узлах. Для лучшего визуального просмотра на осциллографе подбираются необходимые чувствительность по вертикальному каналу и длительность развертки.

*2-й способ.* При этом способе измерительные приборы (осциллограф и др.) на схеме не устанавливаются. Желательно сделать видимыми номера узлов. Затем назначается вид анализа из меню Analysis. Например, анализ АЧХ выполняется по команде Analysis/ AC Frequency, анализ переходных процессов – по команде Analysis/ Transient, анализ по постоянному току – по команде Analysis/ DC Operating Point и др. Далее в диалоговом окне устанавливаются параметры анализа и узлы, в которых просматриваются результаты моделирования (в поле Nodes for Analysis). Процесс моделирования запускается нажатием на кнопку Simulate. Графики моделирования представляются в окне Analysis Graphs. Окно можно распахнуть на весь экран. Параметры сигналов просматриваются с помощью двух визирных линий, появляющихся после щелчка ЛКМ на значке Toggle Cursors. (Эту команду можно выполнить и из контекстного меню). Визирные линии перемещаются мышкой и устанавливаются в необходимом месте. Параметры сигналов отражаются в динамическом окне.

## Приложение II

### ПРОГРАММА PSpice Model Editor

С помощью программы PSpice Model Editor [5], вызываемой командой Программы/ OrCAD Release 9.1/ PSpice Model Editor, рассчитываются параметры математических моделей различных компонентов: биполярных и полевых транзисторов, диодов и др. Открывшуюся библиотеку сохраняют по команде File/Save As... в необходимой папке под оригинальным именем, например, Student.lib. Затем по команде Model/New в открывшемся окне выбирается разновидность элемента (Bipolar Transistor, Diode и др.).

#### II.1. Расчет параметров математической модели биполярных транзисторов

Для биполярных транзисторов указывается тип проводимости транзистора (n-p-n или p-n-p) и имя модели (рис. II.1).

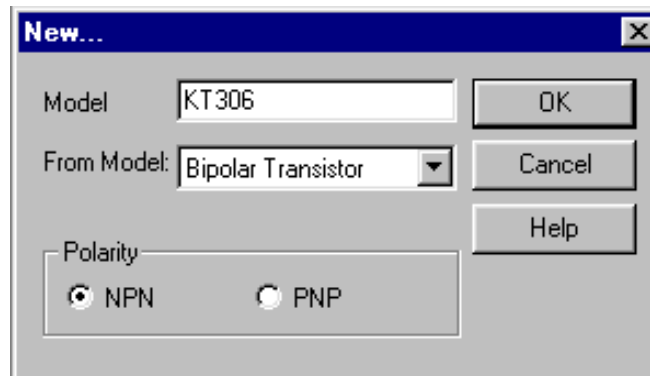


Рис. П.1

Затем вводятся порциями измеренные в подразд. 1.1 параметры биполярного транзистора в 8 экранов, вызываемых нажатием на соответствующую кнопку или из меню Window.

Вводимые параметры и рассчитываемые по ним параметры математической модели приведены в таблице П.1.

Таблица П.1

Экран	Символы данных	Данные, вводимые пользователем	Символы параметров модели
Vbe(Sat)	Vbe, Ic	Зависимость напряжения насыщения Vbe от тока коллектора Ic	Is
	Ic/Ib	Отношение тока коллектора к току базы в режиме насыщения (по умолчанию равно 10)	
Output...	Hoe, Ic	Зависимость выходной проводимости от тока коллектора Ic	VAF
	Vce	Напряжение коллектор-эмиттер при измерении Hое	
Forward	HFE	Зависимость статического коэффициента усиления тока в схеме с ОЭ BF от тока коллектора Ic	BF IKF
	Vce	Смещение коллектор-эмиттер при измерении HFE	
Vce(Sat)	Vce, Ic	Зависимость напряжения насыщения Vce от тока коллектора Ic	BR IKR
	Ic/Ib	Отношение тока коллектора к току базы в режиме насыщения (по умолчанию равно 10)	
C-B Cap...	Cobo, Vcb	Зависимость емкости коллектор-база от обратного смещения Vcb	CJC MJC, VJC
E-B Cap...	Cibo, Veb	Зависимость емкости эмиттер-база от обратного смещения Veb	CJE
Storage..	t <sub>s</sub> , Ic	Зависимость времени рассасывания от тока коллектора (Ic/Ib=10)	TR
Gain Band...	f <sub>t</sub> , Ic	Зависимость граничной частоты в схеме с ОЭ от тока коллектора Ic	TF ITF, XTF, VTF
	Vce	Смещение коллектор-эмиттер при измерении f <sub>t</sub>	

После внесения данных в каждый экран необходимо выполнять команду Tools /Extract Parameters, по которой извлекаются параметры математической модели транзистора и строятся графики, соответствующие введенным параметрам. После внесения данных в экраны результаты расчета сохраняются по команде File /Save.

Пределы измерений по осям X и Y, а также тип шкалы (линейная, логарифмическая) устанавливаются для каждого экрана по команде Plot/Axis Settings.

Полученные параметры математической модели считываются из файла библиотеки.

Программой рассчитываются следующие параметры математической модели биполярного транзистора (модель Эберса-Молла):

IS – ток насыщения;

BF, BR – максимальный коэффициент передачи тока в нормальном и инверсном режимах в схеме с ОЭ;

VAF, VAR – напряжение Эрли в нормальном и инверсном режимах;

IKF, IKR – ток начала спада зависимости BF и BR, соответственно, в нормальном и инверсном режимах;

CJC, CJE – емкость коллекторного и эмиттерного переходов при нулевом смещении;

VJC – контактная разность потенциалов перехода коллектор-база;

MJC – коэффициент, учитывающий плавность коллекторного перехода;

TF, TR – время переноса заряда через базу в нормальном и инверсном режимах;

XTF, VTF – безразмерный коэффициент и напряжение, характеризующие зависимость TF от смещения база-коллектор;

ITF – ток, характеризующий зависимость TF от тока коллектора при больших токах.

## **II.2. Расчет параметров математических моделей диодов и стабилитронов**

Для диода или стабилитрона вводятся порциями измеренные в **подразд. 2.1** параметры в 5 экранов. Вводимые параметры и рассчитываемые по ним параметры математической модели приведены в табл. II.2.

Таблица II.2

Символы данных	Символы, вводимые пользователем	Символы параметров модели
<b>Forward Current</b>		
$V_{fwd}, I_{fwd}$	Координаты точек прямой ветви ВАХ диода	IS, RS, N
<b>Junction Capacitance</b>		
$V_{rev}, C_j$	Зависимость барьерной емкости перехода от обратного смещения	CJO
<b>Reverse Leakage</b>		
$V_{rev}, I_{rev}$	Зависимость тока утечки от обратного смещения	ISR
<b>Reverse Breakdown</b>		
$V_z, I_z$ $Z_z$	Напряжение пробоя $V_z$ при токе пробоя $I_z$ Дифференциальное сопротивление на участке пробоя в точке ( $I_z, V_z$ )	BV, IBV
<b>Reverse Recovery</b>		
$T_{rr}$ $I_{fwd}$ $I_{rev}$ RI	Время рассасывания носителей заряда Ток диода в прямом направлении до переключения Обратный ток диода после переключения Сопротивление нагрузки	TT

Программой рассчитываются следующие параметры математической модели диода:

IS – ток насыщения;

RS – объемное сопротивление;

N – коэффициент инжекции;

CJO – барьерная емкость при нулевом смещении;

ISR – параметр тока рекомбинации;

BV – обратное напряжение пробоя;

IBV – начальный ток пробоя;

TT – время переноса заряда.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Лукьяненко Е.Б., Коноплев Б.Г., Рысухин Г.В. Руководство к лабораторной работе «Математическое моделирование биполярных транзисторов». Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. №2219.
2. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. М.: «Солон-Р», 2001.
3. Панфилова Д.И. и др. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Практикум по Electronics Workbench: в 2 т. М.: Изд. дом «Додэка», 1999.
4. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000.
5. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0. М.: «Солон-Р», 2000.

**Коноплев Борис Георгиевич  
Лукьяненко Евгений Борисович  
Фомичев Алексей Васильевич**

**Сборник лабораторных работ, выполняемых  
с использованием программы  
Electronics Workbench 5.0**

по курсу  
**Электроника**

Ответственный за выпуск Лукьяненко Е.Б.  
Редактор  
Корректор