

УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ  
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА

ЭЛЕКТРОНИКИ  
И СХЕМОТЕХНИКИ

**ЭЛЕКТРОНИКА  
И  
СХЕМОТЕХНИКА**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

**ТАШКЕНТ 2006**

УДК 621.385.1

Арипов Х.К., Танов В.М.

Электроника и схемотехника. Методические указания к лабораторным работам. ТУИТ, 2006

Электроника и схемотехника

© Ташкентский университет информационных технологий

## Лабораторная работа №1

### Исследование характеристик и параметров полупроводниковых диодов

Цель работы: Исследовать основные характеристики и параметры полупроводниковых диодов (ПД), влияние на них температуры окружающей среды.

#### 1. Подготовка к лабораторной работе:

1.1. ПД - это электронный прибор, представляющий собой контакт двух полупроводников с разным типом проводимости  $p$  и  $n$  и обладающий односторонней проводимостью. ВАХ ПД представлены на рис. 1.1. Здесь 1 - теоретическая характеристика, 2 - характеристика реального прибора (она учитывает сопротивления объемов полупроводниковой структуры ПД и сопротивления внешних контактов, влияние дополнительного разогрева ПД мощностью, выделяемой в ПД при протекании через него тока, и т.п.).

#### 1.2.

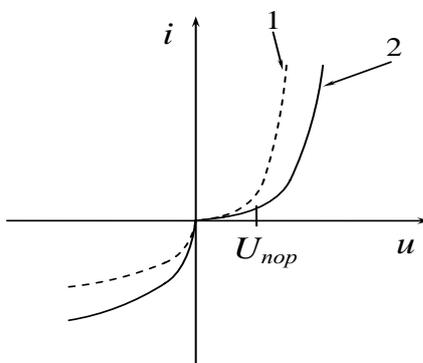


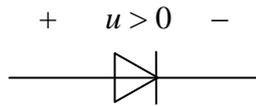
Рис. 1.1.

Примерный вид ВАХ реального ПД показан на рис. 1.1. Пунктиром дана идеализированная ВАХ, соответствующая уравнению:

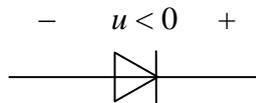
$$i = I_0 \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (1.1)$$

при  $T = 300\text{K}$ ,  $u_T = 26\text{ мВ}$ .

Характеристики отражают основное свойство ПД. В открытом состоянии через ПД протекает значительный прямой ток ( $i_{np} > 0$ ); это состояние обеспечивается подачей на ПД прямого напряжения  $u_{np}$ :



В закрытом состоянии через ПД протекает весьма незначительный обратный ток  $i_{обр}$  ( $i < 0$ ), величина которого у германиевых ПД имеет порядок  $10^{-5} - 10^{-6}\text{А}$ , а у кремниевых  $10^{-9} - 10^{-12}\text{А}$ . Закрытое состояние ПД обеспечивается подачей на него обратного напряжения  $u_{обр}$ :



Из рисунка 1.1 видно, что прямая ветвь ВАХ реального ПД сдвинута относительно теоретической характеристики в область более высоких прямых напряжений с резко выраженной величиной порогового напряжения  $U_{nop}$ , т.е. напряжения, при котором возникает заметный прямой ток. У германиевых ПД величина  $U_{nop} \approx 0,25 - 0,4\text{ В}$ , у кремниевых ПД -  $U_{nop} \approx 0,65 - 0,8\text{ В}$ . Наклон прямой ветви ВАХ при  $U \geq U_{nop}$  определяется в основном сопротивлением базовой области диода  $r'_B$ .

Влияние температуры окружающей среды на ВАХ ПД иллюстрирует рисунок 1.2. При возрастании температуры увеличиваются прямой и обратный токи.

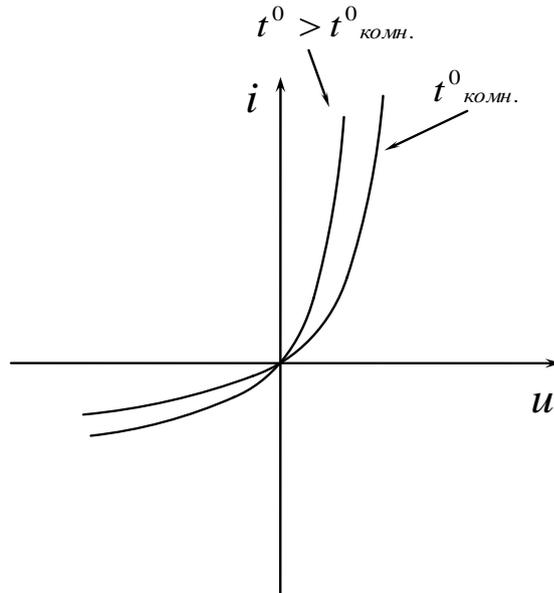


Рис. 4.2

Основными параметрами ПД, учитывающими влияние температуры являются:

Температурный коэффициент напряжения  $\alpha_t$

$$\alpha_t = \left. \frac{\Delta U_{np}}{\Delta t^0} \right| i = const, \quad (1.2)$$

и температура  $t^*$ , соответствующая изменению обратного тока в  $e$  раз:

$$i_{обп}(t) = i_{обп}(t'_0) e^{\frac{t-t_0}{t^*}} \quad (1.3)$$

## 2. Задание на выполнение лабораторной работы:

2.1. Перед выполнением лабораторной работы нужно ознакомиться со схемой (рис. 1.3), методами измерений, используемыми измерительными приборами.

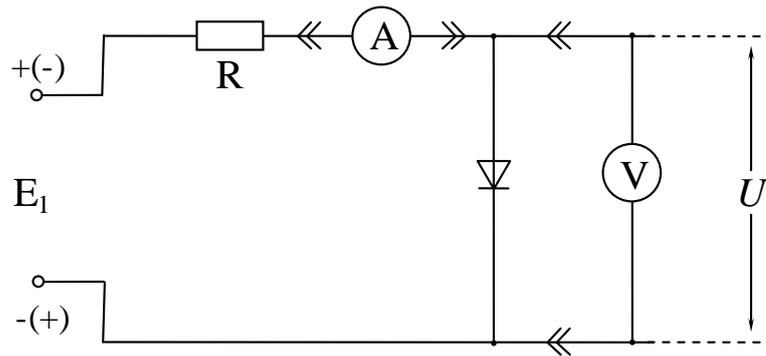


Рис. 1.3

2.2 Снять прямую ветвь ВАХ  $i = f(U)$  ПД (рис. 1.1). Эксперимент выполнить для двух ПД - германиевого и кремниевого.

Рекомендации для выполнения эксперимента:

Прямой ток  $i$  ПД очень сильно зависит от напряжения (рис. 1.1), поэтому для ограничения тока  $i \leq i_{дон}$  последовательно с ПД необходимо включить ограничительный резистор  $R=560$  Ом. (рис. 1.3). Практически ВАХ ПД удобно снимать, устанавливая необходимую величину тока  $i$  ПД и фиксируя соответствующее этому току напряжение  $u$ .

При эксперименте зафиксировать величину порогового напряжения  $U_{пор}$  (при  $i = 500 \text{ мкА}$ ).

Результаты измерений занести в таблицу протокола и построить график полученной зависимости  $i = f(u)$ .

2.3 Снять обратную ветвь ВАХ ПД  $I = f(u)$  для германиевого ПД (рис.1.1).

Рекомендации для выполнения эксперимента:

Обратный ток ПД слабо зависит от  $U_{обр}$  (рис. 1.1), поэтому целесообразно снимать обратную ветвь ВАХ, устанавливая

напряжения  $U_{обр}$  в интервале от 0 до  $U_{обр,дон}$  и измеряя соответствующие этим напряжениям значения тока, следует иметь в виду, что наиболее сильно ток изменяется в интервале от  $U=0$  до  $U_{обр} = -1В$ .

Результаты измерений занести в таблицу протокола и построить график полученной зависимости  $i_{обр} = f(U_{обр})$ .

### 3. Обработка результатов измерений:

#### 3.1. Обработка результатов измерений, выполненных в п. 2.2.

На графиках экспериментальных ВАХ германиевого и кремниевого ПД построить соответствующие теоретические характеристики, рассчитанные по формуле 1.1.

Величины теплового тока  $I_0$  определите с помощью формулы 1.1 в точке  $U_{np} = U_{нор}$ ,  $i_{np} = 500мкА$ , считая, что в данной точке теоретические и экспериментальные зависимости совпадают.

Определить по экспериментальным ВАХ при  $i_{np} = 10$  мА значения дифференциального сопротивления  $r_{диф} = \frac{\Delta u}{\Delta i}$  и сопротивления постоянному току  $r_0 = \frac{u}{i}$  для германиевого и кремниевого ПД.

#### 3.2. Обработка результатов измерений выполненных в п.2.3 и 2.4:

Пользуясь экспериментальной ВАХ германиевого ПД (п.2.3), определить при  $u_{np} = 10$  В дифференциальное

сопротивление  $r_{диф} = \frac{\Delta u}{\Delta i}$  и сопротивление постоянному току

$$r_0 = \frac{u_{обр}}{i_{обр}}.$$

#### 4. Содержание отчета:

1. схемы измерений;
2. таблицы и графики снятых зависимостей;
3. результаты расчетов и построения;
4. анализ результатов измерений и расчетов.

### Лабораторная работа №2

#### Исследование статических характеристик и параметров биполярных транзисторов

Цель работы: Исследовать основные статические характеристики и параметры биполярных транзисторов, познакомиться с методикой измерения характеристик и обработкой экспериментальных данных.

##### 1. Подготовка к лабораторной работе:

Изучить литературу [ 1, с 105-171]

Статическими характеристиками транзистора называются связи между токами и напряжениями, представленные в графической форме. В схеме с общим эмиттером в качестве независимых переменных выбирают ток базы  $i_B$  и напряжение коллектор-эмиттер  $u_{КЭ}$ , тогда:

$$\begin{cases} u_{ЭБ} = f(i_B, u_{КЭ}) \\ i_K = f(i_B, u_{КЭ}) \end{cases} \quad (2.1)$$

В графической форме функции двух переменных изображают в виде семейств характеристик.

Семейство входных характеристик БТ показано на рис. 2.1. Каждая из характеристик представляет зависимость

$$u_{ЭБ} = f(i_B), \text{ при } u_{КЭ} = const \quad (2.2)$$

(принято по оси абсцисс откладывать  $u_{ЭБ}$ , а по оси

ординат  $i_B$  ). Каждая из характеристик семейства снимается при постоянном напряжении коллектор-эмиттер (на рис. 2.1  $u_{кэ1} < u_{кэ2} < u_{кэ3}$  ).

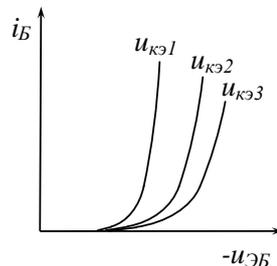


Рис. 2.1.

Семейство выходных характеристик

$$i_K = f(u_{кэ}), \text{ при } i_B = const \quad (2.3)$$

представлено на рис. 2.2 ( $i_{Б3} > i_{Б2} > i_{Б1}$ ).

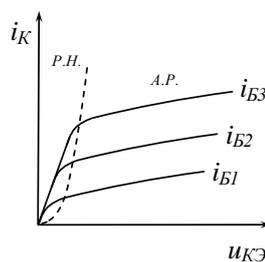


Рис. 2.2.

Область левее пунктирной линии соответствует режиму насыщения БТ, а правее - активному режиму.

При работе с сигналами малой амплитуды  $I_{Бм}, U_{БЭм}, I_{Км}, U_{КЭм}$  нелинейные зависимости (2.1–2.3) в окрестности произвольной рабочей точки, задаваемой значениями  $i_B(0)$  и  $U_{кэ}(0)$ , могут быть линеаризованы, например с использованием h- параметров транзистора:

$$\begin{cases} U_{БЭм} = h_{11}I_{Бм} + h_{12}U_{КЭм} \\ I_{Км} = h_{21}I_{Бм} + h_{22}U_{КЭм} \end{cases} \quad (2.4)$$

где  $h_{11} = \frac{\Delta u_{БЭ}}{\Delta i_{Б}}$ , при  $u_{КЭ} = const$

$h_{21} = \frac{\Delta i_{К}}{\Delta i_{Б}}$ , при  $u_{КЭ} = const$

$h_{12} = \frac{\Delta u_{БЭ}}{\Delta u_{КЭ}}$ , при  $i_{Б} = const$  (2.5)

$h_{22} = \frac{\Delta i_{К}}{\Delta u_{КЭ}}$ , при  $i_{Б} = const$

h- параметры в соответствии с формулами (2.5) можно определить с помощью семейств характеристик ( $h_{11}$  и  $h_{12}$  - по семейству входных, а  $h_{21}$  и  $h_{22}$  - по семейству выходных характеристик).

В практических расчетах часто используется и кусочно-линейная аппроксимация статических характеристик БТ см. рис.2.3.

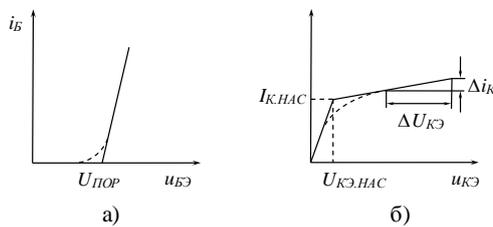


Рис. 2.3.

Для аппроксимированных входных характеристик имеем

$$i_{Б} = \begin{cases} 0, & \text{при } u_{БЭ} < U_{ПОР} \\ \frac{u_{БЭ} - U_{ПОР}}{r_{ВХ}}, & \text{при } u_{БЭ} > U_{ПОР} \end{cases} \quad (2.6)$$

а для выходных

$$i_K = \begin{cases} \frac{u_{KЭ}}{r_{K.НАС}}, & \text{при } U_{KЭ} < U_{KЭ.НАС}, \quad (\text{режим\_насыщения}) \\ \beta i_B + \frac{u_{KЭ}}{r_K^*}, & (\text{активный\_режим}) \end{cases} \quad (2.7)$$

В формулах 2.6 и 2.7

$U_{ПОР}$  - пороговое напряжение эмиттерного перехода,  
 $\bar{r}_{ВХ}$  - усредненное входное сопротивление транзистора ( $\bar{r}_{ВХ} \approx r'_B$ ),  
 $r_{K.НАС}$  - выходное сопротивление транзистора в режиме насыщения (в начальной области).

$$r_{K.НАС} = \frac{\Delta u_{KЭ}}{\Delta i_K}, \text{ при } i_B = const \text{ и } u_{KЭ} < U_{KЭ.НАС} \quad (2.8)$$

$r_K^*$  - усредненное выходное сопротивление транзистора  $r_K^*$  в активном режиме.

$$r_K^* = \left. \frac{\Delta u_{KЭ}}{\Delta i_K} \right| \text{ при } i_B = const \text{ и } u_{KЭ} > U_{KЭ.НАС} \quad (2.9)$$

2. Задание на выполнение лабораторной работы:

2.1. Провести подготовку к эксперименту:

ознакомиться со структурой и предельными параметрами транзистора, данные транзистора занести в протокол; заготовить таблицы для измерений.

Таблица 2.1

Входные и управляющие характеристики

$E_B$	$B$	
$U_{БЭ}$	$B$	
$i_B$	$мкА$	
$i_K$	$мА$	

Таблица 2.2  
Выходные характеристики транзистора

$i_B,$ мкА			
	$u_{КЭ}$	В	
	$i_K$	мА	
	$u_{КЭ}$	В	
	$i_K$	мА	
	$u_{КЭ}$	В	
	$i_K$	мА	
и т.д.			

Собрать схему для измерений (рис. 2.4), схема цоколевки транзистора представлена на рис. 2.5. Сопротивление резистора  $R_1 = (5-10) \text{ кОм}$ .

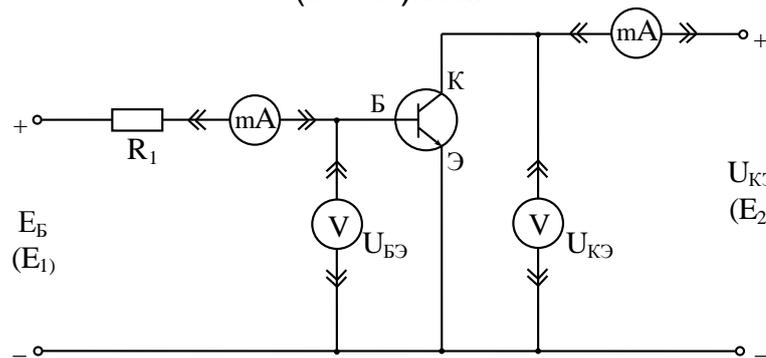


Рис. 2.4

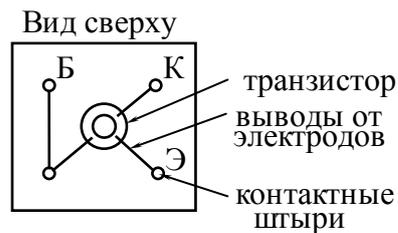


Рис. 2.5

2.2. Снять входную и управляющие характеристики транзистора при постоянном напряжении  $u_{кэ} = 5В$ . Результаты измерений и расчетов занести в табл. 2.1.

2.3. Снять семейство выходных характеристик:  
семейство выходных характеристик снимать начиная от тока базы  $i_B = 50\text{мкА}$  и далее с шагом  $50\text{ мкА}$ . Ток коллектора при этом не должен превышать допустимого значения;  
шаг изменения напряжения  $u_{кэ}$  должен быть выбран так, чтобы в активном режиме снять 3-5 точек и режимы насыщения - 2-3 точки.

3. Обработка результатов эксперимента:

3.1. Построить на графиках входную и управляющую характеристики, а также семейство выходных характеристик.

В точке  $u_{кэ} = 5\text{ В}$ ,  $i_B = 100\text{мкА}$  определить параметры транзистора

$$h_{11Э} = \frac{\Delta u_{БЭ}}{\Delta i_B}, \quad h_{21Э} = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B}, \quad h_{22Э} = \frac{\Delta i_K}{\Delta u_{кэ}}$$

3.2. Построить выходную характеристику при токе базы, равном  $100\text{ мкА}$ . Провести ее линейно-кусочную аппроксимацию и определить  $U_{кэ.нас}$ ,  $I_{к.нас}$ ,  $r_{к.нас}$ ,  $r_K$ .

4. Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. схемы измерений;
2. таблицы и графики снятых зависимостей;
3. результаты расчетов.

## Лабораторная работа №3

### Исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе

Цель работы: Измерение параметров простейшего усилительного каскада на биполярном транзисторе при включении с общим эмиттером.

#### 1. Подготовка к выполнению работы:

Изучить литературу [ 1, с 176-178]

В работе исследуется простейший усилительный каскад на биполярном транзисторе при включении с общим эмиттером рис. 3.1.

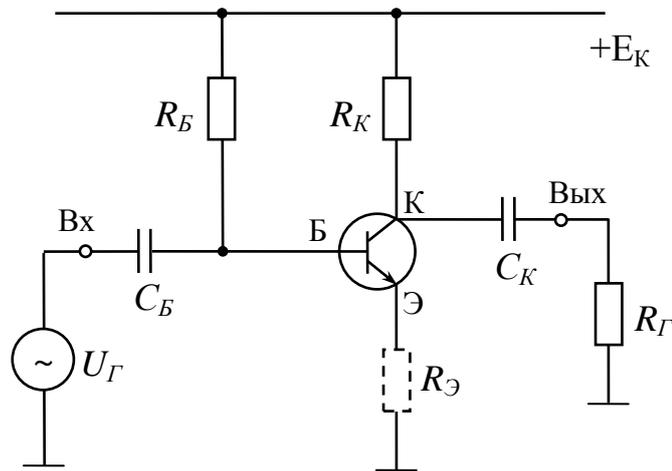


Рис. 3.1

Транзистор работает в активном режиме. Резисторы  $R_B$  и  $R_K$  задают режим работы по постоянному току. При этом с помощью  $R_B$  регулируется величина постоянной составляющей тока базы

$$I_B(0) = \frac{E_K - U_{БЭ}(0)}{R_B} \approx \frac{E_K}{R_B}, \quad (3.1)$$

а следовательно и тока коллектора

$$I_K(0) = \beta \cdot I_B(0) + I_{КЭ0} \approx \beta \cdot I_B(0), \quad (3.2)$$

Резистор  $R_K$  предотвращает замыкание переменной составляющей тока коллектора через источник питания. Желательно иметь  $R_K \gg R_H$ . Одновременно величина  $R_K$  влияет на постоянную составляющую напряжения на коллекторе, т.к.

$$U_{КЭ}(0) = E_K - I_K(0)R_K. \quad (3.3)$$

При известных  $E_K$  и  $R_K$  рабочая точка транзистора по постоянному току может быть задана не двумя, а одним параметром,  $I_B(0)$  или  $I_K(0)$  или  $U_{КЭ}(0)$ . Для измерений удобнее использовать  $U_{КЭ}(0)$ .

Для того, чтобы источник сигнала  $u_T$  и нагрузка не влияли на режим работы транзистора по постоянному току, включены разделительные  $U_{БЭ}(0)$  конденсаторы  $C_B$  и  $C_K$  имеющие в рабочем диапазоне частот малые сопротивления.

Для расчета основных параметров усилительного каскада могут быть использованы формулы:

$$\begin{cases} R_{BX} = r'_B + h_{21Э} r_Э \\ K_U = -h_{21Э} \frac{R_{HЭ}}{R_{BX}} ; \\ K_1 \approx h_{21Э} \\ R_{ВЫХ} \approx R_K \end{cases} \quad (3.4)$$

где  $R_{HЭ} \approx \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}$ ;  $r_Э = \frac{u_T}{I_Э(0)} \approx \frac{26 мВ}{I_K(0)}$ .

При наличии резистора  $R_Э$  в цепи эмиттера, создающего отрицательную обратную связь,

$$\begin{cases} R_{BX.OC} \cong h_{21Э} R_Э \\ K_{U.OC} \approx \frac{R_{HЭ}}{R_Э} ; \end{cases} \quad (3.4)$$

2. Задание на выполнение лабораторной работы:

2.1. Задание режима работы транзистора по постоянному току.

2.1.1. Собрать схему рис.3.2 (это часть схемы усилительного каскада рис.3.1, определяющего рабочую точку транзистора).

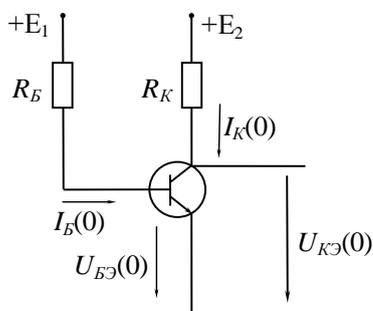


Рис. 3.2

Установить:

$$E_2 = 10\text{В}$$

$$R_K = 3,3\text{к}$$

$$R_B = 10\text{-}56\text{к}$$

Подключить вольтметры для измерения постоянных напряжений

$$U_{BЭ}(0), U_{KЭ}(0).$$

2.1.2. Изменяя величину  $E_1$ , выбрать рабочую точку транзистора так, чтобы  $U_{KЭ}(0) = \frac{E_2}{2} = 5\text{В}$  (\*).

---

(\*) В реальных схемах выбирают  $E_1 = E_2$  и подбирают величину  $R_B$ .

Измерить напряжение  $U_{БЭ}(0)$  рассчитать постоянные составляющие токов

базы 
$$I_B(0) = \frac{E_1 - U_{БЭ}(0)}{R_B} \quad (3.6)$$

и коллектора 
$$I_K(0) = \frac{E_2 - U_{КЭ}(0)}{R_K} \quad (3.7)$$

и статический коэффициент передачи тока базы

$$\beta = \frac{I_K(0)}{I_B(0)} \quad (3.8)$$

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 3.1.

2.1.3. Повторить измерения и расчеты по п.2.1.2 для двух других рабочих точек  $U_{КЭ}(0) = 0,25E_2$  и  $U_{КЭ}(0) = 0,75E_2$ .

Таблица 3.1.

$U_{КЭ}(0),$ В	2,5	5	7,5	Формула
$E_1$				
$U_{БЭ}(0),$ В				
$I_B(0),$ мА				3.6
$I_K(0),$ мА				3.7
$\beta$				3.8

2.2. Измерение основных параметров усилительного каскада.

2.2.1. Собрать схему рис. 3.3 (дополнить схему собранную в предыдущем пункте).

2.2.2. Установить рабочую точку  $U_{КЭ}(0) = 0,5E_2$  (см. п. 2.1.2).

2.2.3. Перевести вольтметры в режим измерения переменных напряжений. Подключить ко входу и выходу Схемы осциллограф. Подать от генератора сигналов синусоидальное напряжение с частотой  $f=1000\text{Гц}$  и амплитудой  $U_{гм}$ , такой величины чтобы получить на выходе переменное напряжение с амплитудой  $U_{Вых.гм} = U_{кэгм} = 1-2В$ .

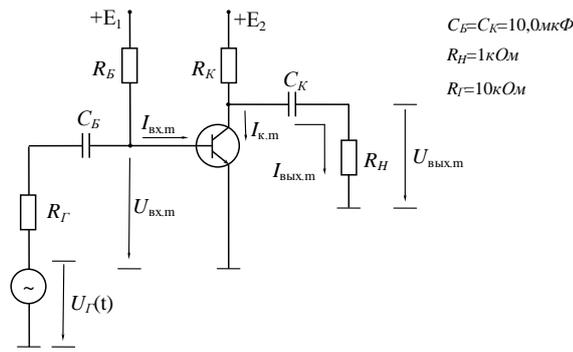


Рис. 3.3

С помощью осциллографа убедиться в отсутствии искажений сигнала. Убедиться, что усилительный каскад инвертирует фазу выходного напряжения относительно входного. Измерить амплитуды переменных напряжений на входе  $U_{вх.м} = U_{бэ.м}$ , на выходе  $U_{вых.м} = U_{кэ.м}$  и (переключив вольтметр) на выходе генератора  $U_{гм}$ .

Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

2.2.4. Рассчитать амплитуды переменных составляющих входного

$$I_{бм} = I_{кэ.м} = \frac{U_{гм} - U_{бэ.м}}{R_I} \approx \frac{U_{гм}}{R_I}, \quad (3.9)$$

и выходного токов

$$I_{вых.м} = \frac{U_{кэ.м}}{R_H}, \quad (3.10)$$

а также переменной составляющей тока коллектора

$$I_{к.м} = \frac{U_{кэ.м}}{R_{HЭ}}. \quad (3.11)$$

Рассчитать измеренные значения коэффициентов

усиления по напряжению

$$K_U = \frac{U_{кЭм}}{U_{БЭм}}, \quad (3.12)$$

по току

$$K_I = \frac{I_{вых.м}}{I_{вх.м}}, \quad (3.13)$$

входного сопротивления

$$R_{вх} = \frac{U_{вх.м}}{I_{вх.м}}, \quad (3.14)$$

и дифференциального коэффициента передачи тока базы

$$h_{21Э} = \frac{I_{км}}{I_{Бм}}. \quad (3.15)$$

Результаты занести в таблицу 3.2.

2.2.5. Используя измеренное значение для дифференциального коэффициента передачи тока базы  $h_{21Э}$ , рассчитать и занести в таблицу 3.2. теоретические значения коэффициента усиления по напряжению (3.2) и входного сопротивления (3.1). (Принять  $r'_Б = 100$  Ом).

Таблица 3.2.

$U_{кЭ}(0)$ , В	0,25 $E_2$	0,5 $E_2$	0,75 $E_2$	Формула
$U_{Гм}$				
$U_{вх.м}$				
$U_{вых.м}$				
$I_{вх.м}$				3.9
$I_{вых.м}$				3.10
$I_{к.м}$				3.11
$K_I$				3.13
$h_{21Э}$				3.15
$R_{вх}$ , кОм				измер. 3.14
				расч 3.4
$K_U$				измер 3.12
				расч 3.2

2.2.6. Повторить измерения и расчеты по пунктам

2.2.2-2.2.5 для двух других рабочих точек  $U_{кЭ}(0) = 0,25E_2$  и

$$U_{кЭ}(0) = 0,75 E_2.$$

2.2.7. Построить график зависимостей (по трем точкам)

$$\beta \text{ и } h_{21Э} = f(I_K(0))$$

Построить теоретические и экспериментально измеренные зависимости

$$R_{ex} = f(I_K(0))$$

$$K_U = f(I_K(0))$$

$$K_I = f(I_K(0))$$

Значения  $I_K(0)$ , соответствующие напряжениям  $U_{кЭ}(0)$ , взять из таблицы 3.1

2.3. Анализ влияния внешней нагрузки на работу усилительного каскада.

Пользуясь результатами измерений по п.2.2.2-2.2.4 и формулами 3.2 и 3.4 рассчитать значения коэффициентов усиления по напряжению  $K_U$  при  $R_H = 0,1; 1; 3,3; 4,7; 10$  кОм. Построить график зависимости  $K_U = f(R_H)$ .

3. Содержание отчета:

1. схемы измерений;
2. таблицы и графики полученных результатов;
3. результаты расчетов.

## Лабораторная работа №4

### Исследование полевого транзистора с управляющим переходом

Цель работы: Изучить статические характеристики и дифференциальные параметры полевого транзистора, исследовать влияние температуры на работу транзистора.

#### 1. Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к работе необходимо изучить литературу: [1, с. 183-192].

В лабораторной работе исследуется полевой транзистор с каналом p-типа, устройство которого и условное обозначение показаны на рис. 4.1.

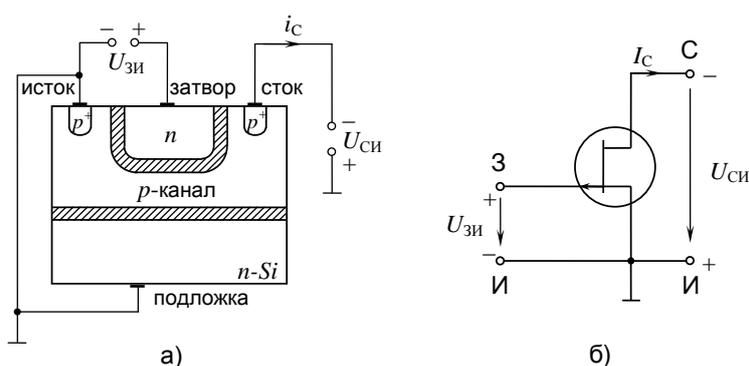


Рис. 4.1

Управление током стока осуществляется путем подачи на затвор, т.е. на управляющий p-n-переход, обратного напряжения  $U_{зи} > 0$ . При увеличении запирающего напряжения  $U_{зи}$  увеличивается ширина области объемного заряда. Соответственно уменьшается ширина канала, увеличивается его сопротивление  $R_k$ , а следовательно, уменьшается ток стока  $I_c$  при заданном напряжении между

стоком и истоком  $U_{СИ}$ . В качестве иллюстрации управляющая характеристика  $I_C(U_{ЗИ})$  приведена на рис 4.2.

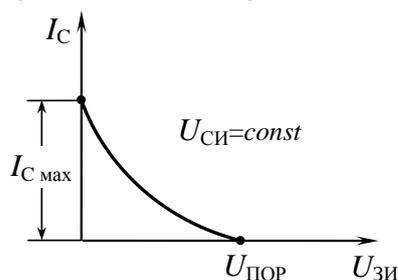


Рис. 4.2

Напряжение на затворе, при котором области объемного заряда управляющего р-п-перехода и р-п-перехода подложка-канал смыкаются, и ток стока  $I_C$  становится равным нулю, называется пороговым напряжением  $U_{ПОР}$ .

Управляющую характеристику полевого транзистора в режиме насыщения удобно аппроксимировать зависимостью

$$I_C = I_{C \max} \left( \frac{1 - U_{ЗИ}}{U_{ПОР}} \right)^2, \quad (4.1)$$

где  $I_{C \max}$  - начальный ток стока, соответствующий  $U_{ЗИ} = 0$ .

По управляющей характеристике (рис. 4.2) может быть рассчитана крутизна транзистора

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = \text{const}}.$$

При использовании аппроксимации (4.1) выражение для крутизны имеет вид

$$S = \frac{2I_{C \max}}{U_{ПОР}} \left( 1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ПОР}} \right), \quad (4.2)$$

Семейство выходных характеристик полевого транзистора показано на рис. 4.3. Начальный участок характеристик ( $U_{СИ} < U_{СИ \text{ нас}}$ ) соответствует линейному режиму. В этом режиме канал существует на всем промежутке исток-исток, поэтому ток стока  $I_C = \frac{U_{СИ}}{R_K}$  возрастает с ростом  $U_{СИ}$  по закону, близкому к линейному.

При  $U_{СИ} < U_{СИ\text{ НАС}}$  транзистор переходит в режим насыщения, в котором ток стока  $I_C$  слабо зависит от напряжения на стоке  $U_{СИ}$ . Напряжение насыщения  $U_{СИ\text{ НАС}}$ , являющееся границей двух режимов, зависит от напряжения на затворе  $U_{ЗИ}$  и рассчитывается по формуле:  $U_{СИ\text{ НАС}} = U_{ЗИ} - U_{ПОР}$ . По выходным характеристикам (рис.4.3) может быть рассчитано выходное сопротивление

$$r_{\text{вых}} = \left. \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta I_C} \right|_{U_{ЗИ} = \text{const}}$$

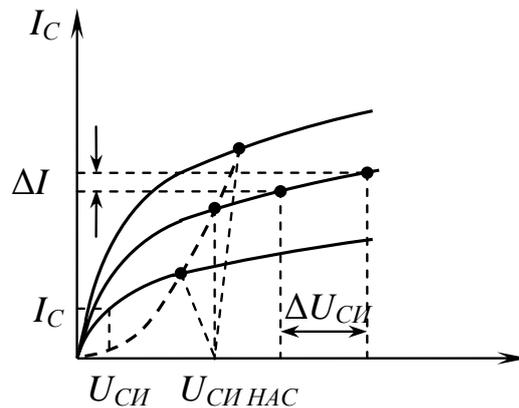


Рис. 4.3.

Оно велико в режиме насыщения, поэтому при использовании транзистора для целей усиления точка покоя схемы выбирается в этом режиме. Выходное сопротивление транзистора в линейном режиме зависит от напряжения на затворе  $U_{ЗИ}$  и приближенно может быть рассчитано как отношение напряжения  $U_{СИ}$  к току  $I_C$  в выбранной рабочей точке, или по формуле 4.3.

$$R_K = \frac{R_{K0}}{1 - \sqrt{\frac{U_{ЗИ}}{U_{ПОР}}}}, \quad (4.3)$$

где  $R_{K0} = \frac{U_{ПОР}}{3I_{C\text{ max}}}$ .

## 2. Задание на выполнение работы

2.1. Ознакомиться со схемой исследования (рис.4.4), измерительными приборами и паспортными данными полевого транзистора КП103, исследуемого в работе (см.прил. П5).

Зарисовать цоколевку и записать в протокол предельно допустимые параметры  $U_{СИ\ доп}$ ,  $I_{С\ доп}$ ,  $P_{доп}$  исследуемого транзистора. Собрать схему для рис.4.4.

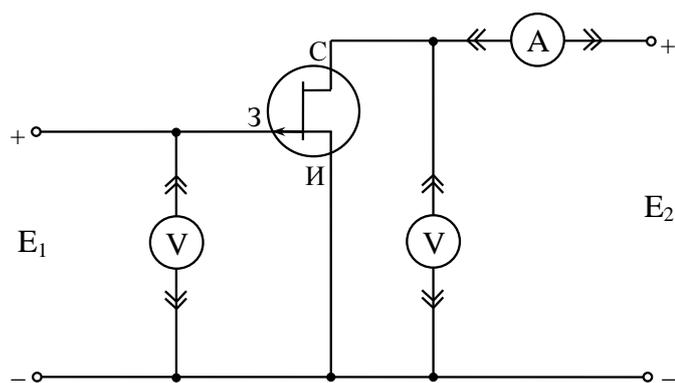


Рис. 4.4

2.2. Снять две управляющие характеристики транзистора при напряжениях на стоке  $U_{СИ}=1/3U_{СИ\ доп}$  и  $2/3U_{СИ\ доп}$  ( $U_{СИ\ доп}$  - допустимое напряжение на стоке берется из паспортных данных). Результаты измерений занести в табл.4.1 и по ним построить семейство управляющих характеристик. В ходе эксперимента напряжение  $U_{ЗИ}$  следует изменять от 0 до порогового напряжения  $U_{ПОР}$ .

Таблица 13.1

$U_{ЗИ}, В$	$I_C, мА$	
	$U_{СИ}=1/3U_{СИ\ доп}$	$U_{СИ}=2/3U_{СИ\ доп}$

2.3. Снять семейство выходных характеристик  $I_C=f(U_{СИ})$  при трех значениях напряжения на затворе  $U_{ЗИ}=0; 0,25U_{ПОР}; 0,5U_{ПОР}$ . До проведения эксперимента следует построить в системе

координат  $I_C - U_{СИ}$  область дозволённых режимов работы транзистора (рис.4.5).

Пояснение:

Для построения линии  $P_{С доп}$  произвольно выбирается несколько значений  $U_{СИ}$  в пределах от 0 до  $U_{СИ доп}$  и в этих точках рассчитывается ток стока  $I_C = P_{С доп} / U_{СИ}$ .

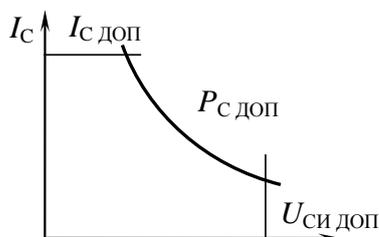


Рис. 4.5

Экспериментальные точки заносить в табл.4.2 и сразу же отмечать на заготовленном графике (рис.4.5). При этом необходимо следить, чтобы не выйти за область дозволённых режимов работы транзистора.

Таблица 13.2

$U_{СИ},$ В	$I_C, \text{ мА}$		
	$U_{ЗИ}=0$	$U_{ЗИ}=0,25U_{ПО}$	$U_{ЗИ}=0,5U_{П}$
		Р	ОР

2.4. Исследовать влияние температуры на статические характерно токи транзистора. Поместив исследуемый транзистор в термостат и установив нужное значение температуры, снять две управляющие характеристики  $I_C = f(U_{ЗИ})$  при напряжении на стоке  $U_{СИ} = 1/3 U_{СИ доп}$  и температуре  $T = 40^\circ$  и  $80^\circ \text{С}$ .

Результаты измерений занести в табл.4.3 и по ним построить две управляющие характеристики  $I_C = f(U_{ЗИ})$  при  $T = 40^\circ$  и  $80 \text{ С}$ .

Таблица 13.3

$U_{зи}, В$	$I_c, мА$	
	$T=40^\circ$	$T=80^\circ$

### 3. Обработка результатов эксперимента.

3.1. Управляющие характеристики, снятые в п.2.2, аппроксимировать выражением (4.1). Результаты аппроксимации отразить на том же графике  $I_c=f(U_{зи})$ .

3.2. Пользуясь управляющими характеристиками, определить крутизну транзистора

$$S = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \right|_{U_{си} = const} \text{ в следующей рабочей точке: } U_{си} = 1/3 U_{си доп},$$

$U_{зи} = 0,5 U_{пор}$ . Рассчитать  $S$  в этой же точке по формуле (4.2).

3.3. На семействе выходных характеристик, снятых в п.2.3, укажите границу между режимами линейным и насыщения, которая соответствует уравнению  $U_{си нас} = U_{зи} - U_{пор}$ .

3.4. Пользуясь выходными характеристиками, определить выходное сопротивление транзистора в следующих рабочих точках:

- в режиме насыщения ( $U_{си} = 1/3 U_{си доп}$ ,  $U_{зи} = 0,25 U_{пор}$ );
- в линейном режиме при  $U_{си} = 0$  и трех значениях  $U_{зи} = 0$ ;  $0,25 U_{пор}$ ;  $0,5 U_{пор}$ .

Результаты расчета занести в табл.4.4 и построить по ним для линейного режима зависимость  $r_{вых}$  от  $U_{зи}$ .

Таблица 13.4

$U_{зи}, В$	$r_{вых}, КОМ$	
	$U_{си} = 1/3 U_{си доп}$	$U_{си} = 0$
$U_{зи} = 0$		
$U_{зи} = 0,25 U_{пор}$		
$U_{зи} = 0,5 U_{пор}$		

3.5. На управляющих характеристиках, снятых в п.2.4, найти координаты  $I_{СТ}$  и  $U_{ЗИТ}$  термостабильной точки, в которой пересекаются управляющие характеристики, снятые при разных температурах.

#### 4. Содержание отчета.

Отчет должен содержать:

- справочные данные исследуемых транзисторов;
- схему исследования;
- таблицы и графики снятых зависимостей;
- результаты аппроксимации управляющих характеристик, расчетов крутизны  $S$  и выходного сопротивления транзистора  $r_{ВЫХ}$ .

#### Контрольные вопросы.

1. Нарисуйте устройство и объясните принцип действия полевого транзистора с n-р затвором.
2. Назовите режимы работы полевого транзистора. При каких соотношениях напряжений на затворе и стоке транзистор работает в каждом режиме?
3. Какая система дифференциальных параметров используется в полевых транзисторах и почему?
4. Нарисуйте и объясните управляющую характеристику полевого транзистора с n-р затвором.
5. Нарисуйте и объясните семейство выходных характеристик полевого транзистора с n-р затвором. Почему в режиме насыщения ток стока слабо зависит от напряжения на стоке?
6. Нарисуйте управляющие характеристики полевого транзистора с n-р затвором, снятые при разных температурах. Чем объясняется наличие термостабильной точки на этих характеристиках?

## Лабораторная работа №5

### Исследование ключевых схем на полевых транзисторах

Цель работы: Изучить особенности работы полевых транзисторов (ПТ) в ключевых схемах. Изучить варианты использования ПТ в качестве нагрузочного резистора.

#### 1. Подготовка к лабораторной работе

Изучить литературу [2,с.156-166] и конспект лекции по данной теме. Обратит внимание на влияние величины сопротивления в цепи стока на вид передаточной характеристики. Рассмотрите различные варианты замены нагрузочного линейного резистора на квазилинейную нагрузку, в качестве которой выступает полевой транзистор. Разобраться в причинах отличий передаточных характеристик при подключении в качестве квазилинейной нагрузки различных полевых транзисторов.

Обратите внимание, что для определений уровней логических сигналов используется передаточная характеристика ключа  $U_{\text{ВЫХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$  рис.5.1.

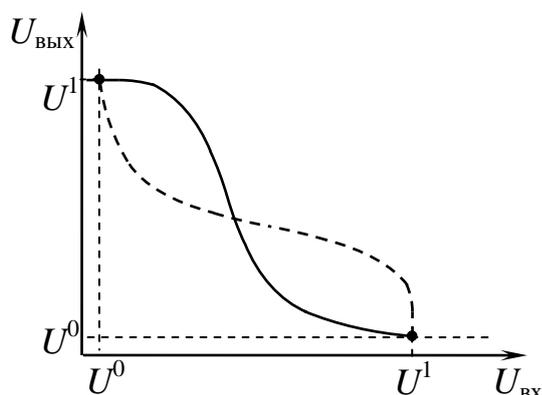


Рис. 5.1

Уровни логического нуля  $U^0$  и логической единицы  $U^1$  определяются пересечением передаточной характеристики и ее зеркального отражения (пунктир). Разность уровней

$U_{\Delta} = U^1 - U^0$  называется размахом логических сигналов.

## 2. Задание на выполнение лабораторной работы.

2.1. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на передаточную  $U_{\text{ВЫХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$  характеристику ключа на ПТ.

Схема исследования ключа на МДП транзисторе со встроенным каналом n-типа приведена на рис.5.2. Питание схемы осуществляется от источника  $E_2$  и равно 9 В. Входное напряжение  $U_{\text{ВХ}}$  подается от регулируемого источника питания  $E_1$ . Для измерения выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  и потребляемого тока используйте цифровые вольтметры. В качестве VT1 возьмите один из транзисторов с каналом n-типа микросхемы K176ЛП1. Для удобства работы перенесите в протокол принципиальную схему микросхемы приведенную в приложении и отметьте номера выводов.

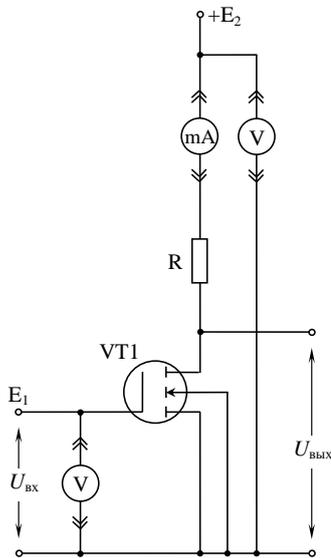


Рис. 5.2

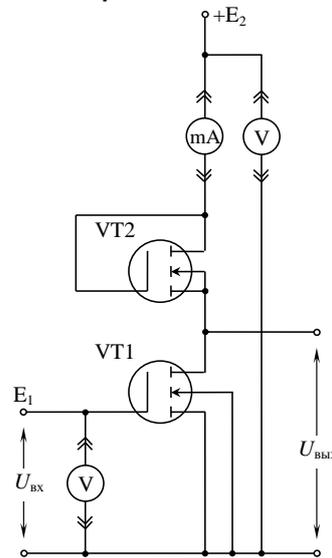


Рис. 5.3

Рекомендуется следующий порядок эксперимента:  
 подключить в цепь стока МДП транзистора линейный резистор  $R_1=51 \text{ кОм}$ ;  
 установить напряжение источника питания  $E_2=9 \text{ В}$ ;  
 изменяя входное напряжение от 0 до 9 В, снять зависимости  $U_{\text{ВЫХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$  и  $I_{\text{ПОТР}}=f(U_{\text{ВХ}})$ ;  
 повторить измерения при двух значениях сопротивления резистора  $R=10 \text{ кОм}$  и  $3,5 \text{ кОм}$ ;

по результатам эксперимента построить графики зависимостей  $U_{\text{ВЫХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$

2.2. Исследовать передаточную характеристику ключа на КМДП - транзисторах.

Схема исследования ключа на КМДП-транзисторах приведена на рис.5.3. В качестве транзисторов VT1 и VT2 взять любую пару комплементарных транзисторов микросхемы К176ЛП1 или отдельную схему ключа.

Эксперимент провести аналогично п.2.1.

3. Обработка результатов эксперимента.

3.1. Построить передаточные характеристики полученные в п.2.

3.2. Для каждого ключа определить уровни логических сигналов  $U^0$  и  $U^1$  и размах  $U_{\Lambda}$ . Полученные результаты свести в табл.5.1.

Таблица 5.1

Параметр Тип нагрузки	$U^0$ , В	$U^1$ , В	$U_{\Lambda}$ , В	$P_{\text{ср}}$ , мВ
С резистивной нагрузкой $R_n=51 \text{ кОм}$ $R_n=10 \text{ кОм}$ $R_n=3,5 \text{ кОм}$				
КМОП-ключ (р-МОП транзистор)				

3.3. Рассчитать среднюю потребляемую от источника питания в состояниях логического нуля и логической единицы мощность

$$P_{cp} = \frac{1}{2}(P^0 + P^1); \quad P^{0,1} = I_{ПOTP}^{0,1} E_{П}.$$

4. Содержание отчета.

Отчет должен содержать:  
схемы исследований;  
таблицы и графики снятых зависимостей.

Контрольные вопросы.

1. Объясните зависимости параметров ключа с резистивной нагрузкой от величины сопротивления нагрузки.
2. Почему ключ на КМОП-транзисторах практически не потребляет мощность от источника питания в статических состояниях?

## Лабораторная работа №6

### Исследование параметров операционных усилителей

Цель работы: Изучить методики измерения основных параметров операционных усилителей.

1. Подготовка к лабораторной работе.

Изучить литературу [3, с.247-252]. При изучении литературы иметь в виду, что операционный усилитель (ОУ) в интегральном исполнении - это универсальная аналоговая микросхема, представляющая собой двухходовый дифференциальный широкополосный усилитель постоянного

тока, на выходе которого формируется сигнал, равный по величине усиленной разности входных сигналов.

Операционным он назван потому, что предназначен для выполнения математических операций над входными сигналами при использовании его в электрической схеме с цепью внешней обратной связи. При соответствующем выборе элементов этой цепи ОУ может использоваться для сложения, вычитания, перемножения, усреднения, интегрирования, дифференцирования, логарифмирования и т.п. При этом точность выполнения указанных операций тем выше, чем больше коэффициент усиления и входное сопротивление ОУ и чем меньше выходное сопротивление.

Количество параметров, характеризующих ОУ, достигает нескольких десятков.

К основным относятся:

*коэффициент усиления ОУ без обратной связи*  $K_{yv}$ , Обычное значение  $K_{yv}$  - несколько десятков-сотен тысяч;

*коэффициент ослабления синфазных входных сигналов* -  $K_{ос\ сф}$  характеризует способность ОУ ослаблять (т.е. не усиливать) сигналы, приложенные одновременно к обоим входам. Как правило,  $K_{ос\ сф}$  выражают в децибелах:

$$K_{ос.сф} = 20 \lg \frac{\text{коэффициент усиления ОУ без обр. связи}}{\text{коэфф. усиления синфазного сигнала}}$$

*входное напряжение сдвига (смещения)* -  $U_{см}$ . Это величина напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ для того, чтобы напряжение на его выходе стало бы равно нулю. Этот параметр характеризует неидеальность ОУ и обусловлен неидентичностью транзисторов входного каскада. Типичное значение  $U_{см}$  составляет доли милливольт-десятки милливольт;

*входные токи* -  $I_{вх}$ . Это токи, протекающие через входные выводы ОУ при нулевых входных напряжениях, обусловленные базовыми токами входных биполярных транзисторов, либо токами утечки затворов в случае использования полевых транзисторов во входном каскаде ОУ. Типичные значения  $I_{вх}$  - доли наноампер-десятки микроампер ( $10^{-10} \dots 10^{-15} \text{ А}$ );

*разность входных токов* -  $I_{вх}$  может достигать 10...20%. Она характеризует степень неидентичности транзисторов

входного каскада ОУ;

*скорость нарастания выходного напряжения*  $V_{u.вых}$  - отношение изменения  $U_{вых}$  от 10% до 90% от своего номинального значения ко времени, за которое произошло это изменение. Параметр характеризует скорость отклика ОУ на ступенчатое изменение входного сигнала;

*частота единичного усиления* -  $f_1$  - значение частоты входного сигнала, при котором значение коэффициента усиления ОУ по напряжению падает до единицы. Данный параметр определяет максимально реализуемую полосу усиления ОУ.

Условные графические обозначения ОУ и назначения выводов приведены на рис.6.1, а, б.

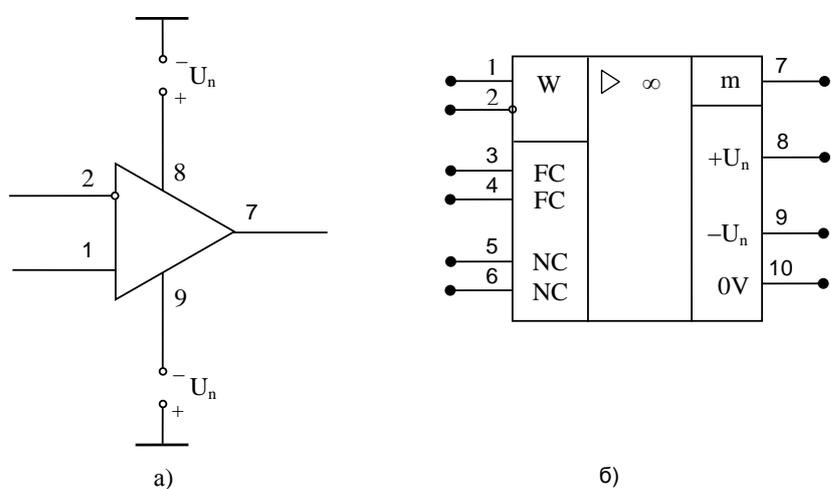


Рис. 6.1

1 - неинвертирующий вход ОУ;

2 - инвертирующий вход ОУ;

3,4 - выводы для подключения внешних элементов коррекции амплитудно-частотной характеристики

5,6 - выводы для подключения внешних элементов балансировки;

7 - выход ОУ;

8 - вывод для подключения источника питания

положительной полярности;

9 - вывод для подключения источника питания отрицательной полярности;

10 - вывод для соединения с общей шиной (нулевой потенциал) схемы

Обратите внимание, что для питания ОУ используются два источника -Uп и +Uп. Кроме того, следует иметь в виду, что ОУ, не имеющие внутренней коррекции частотной характеристики, без элементов внешней коррекции возбуждаются.

Расположение выводов, параметры и типовые схемы коррекции ОУ, исследуемых в лабораторной работе, приведены в приложении. Следует помнить, что на принципиальных схемах устройств на основе ОУ допускается не указывать имеющиеся цепи питания и стандартные схемы коррекции.

## 2. Задание на выполнение лабораторной работы

Пользуясь приложением, зарисовать условное обозначение исследуемого ОУ (с указанием номеров выводов и элементов коррекции) выписать значения предельных параметров.

2.1. Определить предельное значение коэффициента усиления ОУ ( $K_{yv}$ ).

Вследствие значительной величины  $K_{yv}$  10...10 его непосредственное измерение затруднительно. Поэтому это значение  $K_{yv}$  получают в результате расчета.

2.1.1. Собрать схему согласно рис.6.2 (цоколевка ОУ приведена в приложении). (Напомним, что схема частотной коррекции не показана, хотя и должна быть собрана. В дальнейшем будут опущены и элементы питания ЕЗ).

2.1.2. Установить на выходе генератора 1 - синусоидальный сигнал с амплитудой  $U_r=1$  В и частотой  $f_r=10..20$  Гц. При этом на экране осциллографа 2 должен наблюдаться неискаженный сигнал (если наблюдаются искажения, то необходимо уменьшить  $U_r$ ).

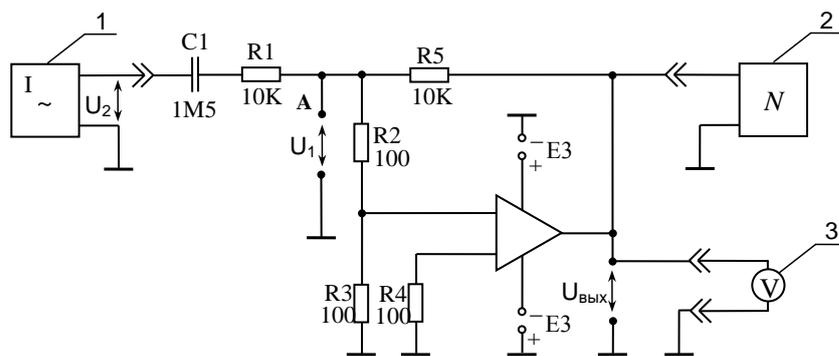


Рис. 6.2

2.1.3. С помощью вольтметра 3 измерить переменные напряжения  $U_1$  (между точкой "А" и общим проводом) и  $U_{\text{вых}}$ , затем рассчитать  $K_{\text{ув}}$  по формуле:

$$K_{\text{ув}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_1} \cdot \frac{R_2}{R_3}$$

2.2. Определить напряжение смещения ( $U_{\text{см}}$ ) и входной ток ( $I_{\text{вх}}$ ) операционного усилителя.

По причине малости этих величин непосредственное измерение  $U_{\text{см}}$  и  $I_{\text{вх}}$  затруднительно и поэтому их значения определяют расчетным путем.

2.2.1. Собрать схему согласно рис. 6.3 (на схеме источники питания и цепи коррекции не показаны)

2.2.2. Установить переключку П1 (вместо резистора R1), соединяющую неинвертирующий вход ОУ (на схеме со знаком "+") с общим проводом. Записать величину постоянного напряжения  $U_{\text{вых1}}$ , которое показывает вольтметр.

положительной полярности;

9 - вывод для подключения источника питания отрицательной полярности;

10 - вывод для соединения с общей шиной (нулевой потенциал) схемы

Обратите внимание, что для питания ОУ используются два источника -Uп и +Uп. Кроме того, следует иметь в виду, что ОУ, не имеющие внутренней коррекции частотной характеристики, без элементов внешней коррекции возбуждаются.

Расположение выводов, параметры и типовые схемы коррекции ОУ, исследуемых в лабораторной работе, приведены в приложении. Следует помнить, что на принципиальных схемах устройств на основе ОУ допускается не указывать имеющиеся цепи питания и стандартные схемы коррекции.

## 2. Задание на выполнение лабораторной работы

Пользуясь приложением, зарисовать условное обозначение исследуемого ОУ (с указанием номеров выводов и элементов коррекции) выписать значения предельных параметров.

2.1. Определить предельное значение коэффициента усиления ОУ ( $K_{yv}$ ).

Вследствие значительной величины  $K_{yv}$  10...10 его непосредственное измерение затруднительно. Поэтому это значение  $K_{yv}$  получают в результате расчета.

2.1.1. Собрать схему согласно рис.6.2 (цоколевка ОУ приведена в приложении). (Напомним, что схема частотной коррекции не показана, хотя и должна быть собрана. В дальнейшем будут опущены и элементы питания ЕЗ).

2.1.2. Установить на выходе генератора 1 - синусоидальный сигнал с амплитудой  $U_r=1$  В и частотой  $f_r=10..20$  Гц. При этом на экране осциллографа 2 должен наблюдаться неискаженный сигнал (если наблюдаются искажения, то необходимо уменьшить  $U_r$ ).

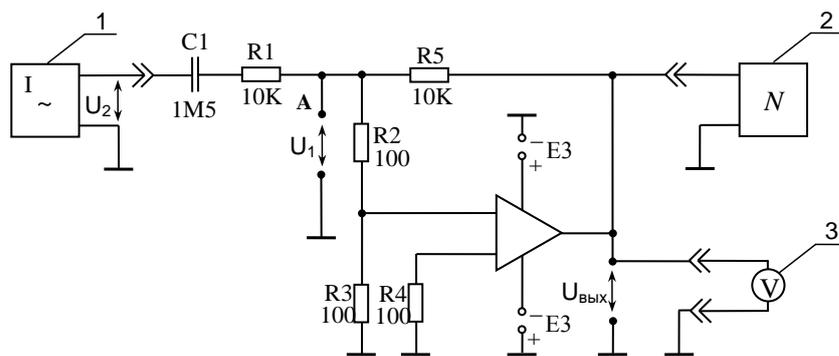


Рис. 6.2

2.1.3. С помощью вольтметра 3 измерить переменные напряжения  $U_1$  (между точкой "А" и общим проводом) и  $U_{\text{вых}}$ , затем рассчитать  $K_{\text{ув}}$  по формуле:

$$K_{\text{ув}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_1} \cdot \frac{R2}{R3}$$

2.2. Определить напряжение смещения ( $U_{\text{см}}$ ) и входной ток ( $I_{\text{вх}}$ ) операционного усилителя.

По причине малости этих величин непосредственное измерение  $U_{\text{см}}$  и  $I_{\text{вх}}$  затруднительно и поэтому их значения определяют расчетным путем.

2.2.1. Собрать схему согласно рис. 6.3 (на схеме источники питания и цепи коррекции не показаны)

2.2.2. Установить переключку П1 (вместо резистора R1), соединяющую неинвертирующий вход ОУ (на схеме со знаком "+") с общим проводом. Записать величину постоянного напряжения  $U_{\text{вых1}}$ , которое показывает вольтметр.

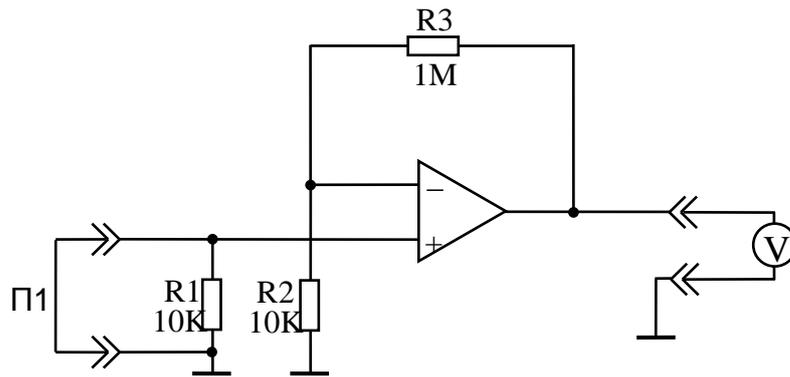


Рис. 6.3

2.2.3. Удалить перемычку П1 и установить между неинвертирующим входом ОУ и общим проводом резистор R1. При этом показания вольтметра изменяются. Записать их, обозначив  $U_{\text{ВЫХ2}}$ .

2.2.4. Рассчитать (с учетом знаков  $U_{\text{ВЫХ1}}$  и  $U_{\text{ВЫХ2}}$ ) величины напряжения смещения

$$U_{\text{см}} = |U_{\text{ВЫХ2}} - U_{\text{ВЫХ1}}| \cdot \frac{R1}{R3}$$

и входного тока  $I_{\text{ВХ}}$  ОУ

$$I_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{см}}}{R2}$$

2.3. Измерить скорость нарастания выходного напряжения ОУ ( $U_{\text{ВЫХ}}$ ).

2.3.1. Собрать схему в соответствии с рис.6.4 (источники питания ОУ на схеме не показаны).

Выходное напряжение генератора ( $U_{\text{Г}}$ ) установить таким, чтобы  $U_{\text{ВЫХ}}$  каскада на ОУ было близко к максимально возможному, т.е. выходной синусоидальный сигнал был близок к ограничению, но еще не ограничивался. Частоту генератора при этом возьмите достаточно низкой (0,1...1кГц).

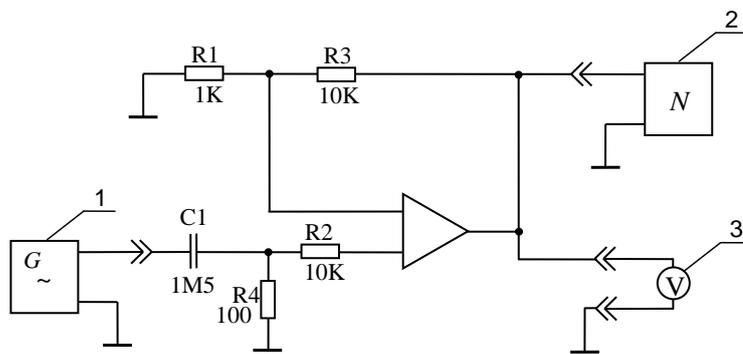


Рис. 6.4

2.3.2. Увеличивая частоту генератора, наблюдайте за осциллограммой выходного сигнала. Наряду с уменьшением размаха, он все более приближается к треугольному (рис. 6.5).

2.3.3. Установив частоту генератора порядка нескольких десятков кГц, а также откалибровав усиление в канале "Y" и скорость развертки (мкс/дел) осциллографа, измерить крутизну полученной осциллограммы (рис.6.5).

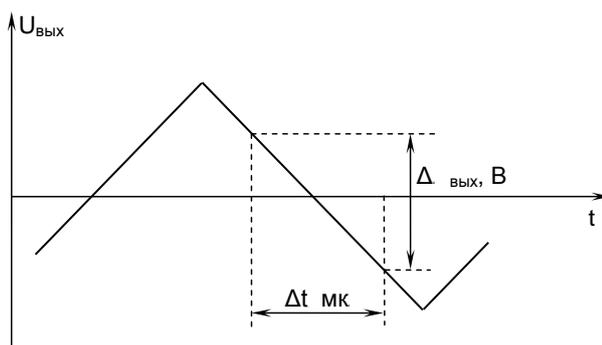


Рис. 6.5

максимальную скорость нарастания выходного сигнала.

### 3. Содержание отчета.

Отчет должен содержать:  
паспортные данные и схемы коррекции исследуемого ОУ;  
схемы измерений и значения измеренных параметров ОУ.

Контрольные вопросы.

1. Какие требования предъявляются к параметрам "идеального" операционного усилителя?
2. Почему операционные усилители не могут работать без коррекции частотной характеристики?
3. Поясните смысл параметра напряжение сдвига (смещения) операционного усилителя.
4. Поясните физический смысл параметров средний входной ток и разность входных токов операционного усилителя. При каких входных сигналах они измеряются?
5. Поясните физический смысл параметра скорость нарастания выходного напряжения. Можно ли его определить, зная амплитудно-частотную характеристику операционного усилителя? Если нет, то почему?

## Лабораторная работа №7

### Исследование аналоговых устройств на основе операционных усилителей

Цель работы: Познакомиться с основными применениями операционных усилителей.

## 1. Подготовка к лабораторной работе.

Изучить литературу [5, с. 44-57]. Обратить внимание, что универсальность ОУ позволяет путем изменения схемы цепи ОС строить на их основе различные устройства: усилители (с инверсией фазы входного сигнала или без инверсии); фильтры (полосовой, верхних или нижних частот); генераторы сигналов (гармонических, релаксационных или сигналов специальной формы); интегрирующие или дифференцирующие устройства; преобразователи аналоговых сигналов и другие устройства. При этом вид выполняемого преобразования определяется исключительно внешними элементами, а от параметров самого ОУ зависит точность преобразования.

Настоящая работа является продолжением работы 6, и в ней используются те же самые ОУ. Расположение выводов, схемы коррекции и параметры исследуемых ОУ приведены в приложении.

## 2. Задание на выполнение лабораторной работы

Зарисовать условные обозначение ОУ, схемы коррекции и выписать значения предельных параметров.

### 2.1. Исследовать инвертирующий усилитель на основе ОУ.

2.1.1. Собрать схему инвертирующего усилителя рис.7.1. В инвертирующем усилителе, как это видно из его названия, фаза выходного сигнала инверсна по отношению ко входному сигналу (т.е. они различаются на  $180^\circ$ ).

2.1.2. С выхода генератора подать на инвертирующий вход ОУ сигнал  $U_{Г}=100\text{мВ}$  с частотой 1кГц.

2.1.3. С помощью вольтметров измерить  $U_{\text{ВЫХ}}$  и  $U_{Г}$ . Рассчитать

$$K_{\text{у.эксп}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{Г}}$$

Сопоставить фазы входного - выходного сигналов.

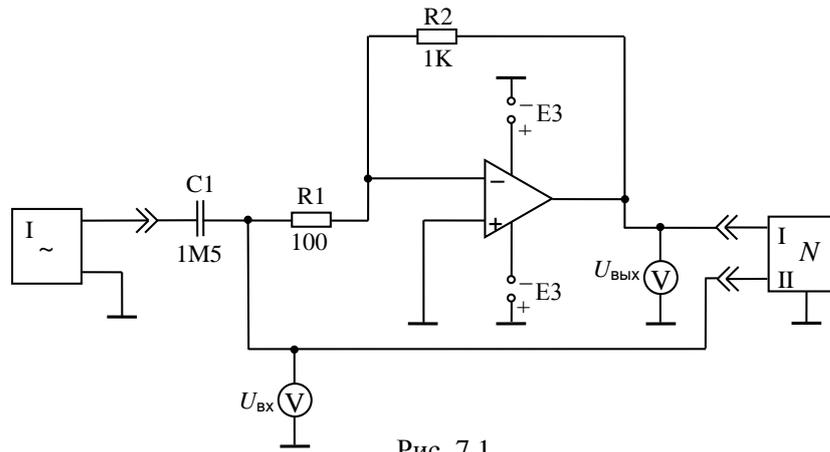


Рис. 7.1

2.1.4. Для данной схемы включения ОУ.  $K_y$  рассчитывается по формуле:

$$K_{y.теор} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (7.1)$$

2.1.5. Повторить измерения и расчеты по пп. 2.1.2-2.1.4 при  $R_2=10$  кОм.

2.2. Исследовать дифференцирующее звено (дифференциатор) на ОУ.

2.2.1. Собрать схему дифференциатора рис.7.2, (Заметим, что  $R_1$  введено в схему для повышения устойчивости ее работы и не является обязательным элементом схемы).

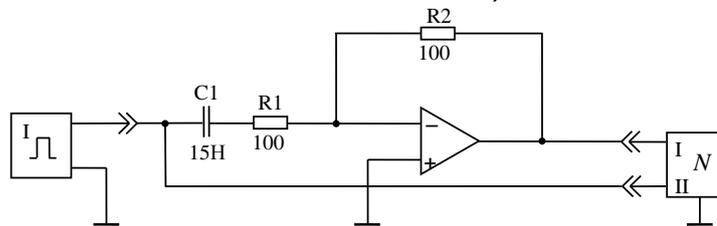


Рис. 7.2

2.2.2. Установить на выходе генератора с помощью осциллографа выходной сигнал с амплитудой 100 мВ и периодом 10 мс. Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов.

2.2.3. Повторить измерения на 2...3 произвольно выбранных частотах в диапазоне 200 Гц - 2 кГц. Зарисовать осциллограммы.

2.3. Исследовать интегрирующее звено (интегратор) на ОУ.

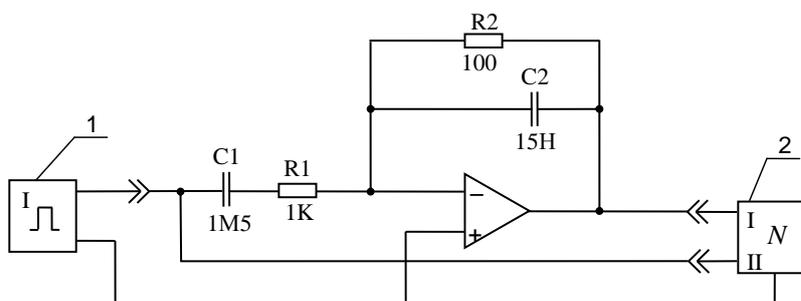


Рис. 7.3

2.3.1. Собрать схему интегратора, согласно рис 7.3. (Заметим, что наличие резистора  $R_2$  необязательно, он включен для повышения устойчивости работы ОУ).

2.3.2. С помощью осциллографа 2 установить на выходе генератора амплитуду сигнала прямоугольной формы, равную 100 мВ. Период колебаний генератора - 10 мс. Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов.

2.3.3. Повторить эксперимент на 2...3 частотах в диапазоне частот генератора 200 Гц - 2 кГц.

2.4. Исследовать неинвертирующий усилитель.

Как следует из его названия, такое усилительное фазы выходного и входного сигналов совпадают. Его схема приведена на рис.7.4.

2.4.1. Собрать схему рис.7.4.

2.4.2. Подать с выхода генератора на неинвертирующий ("+") вход ОУ сигнал  $U_{\Gamma}=100$  мВ с частотой  $f_{\Gamma}=1$  кГц. Сравнить фазы входного и выходного сигналов.

2.4.3. С помощью вольтметра измерить величину  $U_{\text{Вых}}$  и рассчитать коэффициент передачи усилителя:

$$K_{\text{у.эсп}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\Gamma}} \quad (7.2)$$

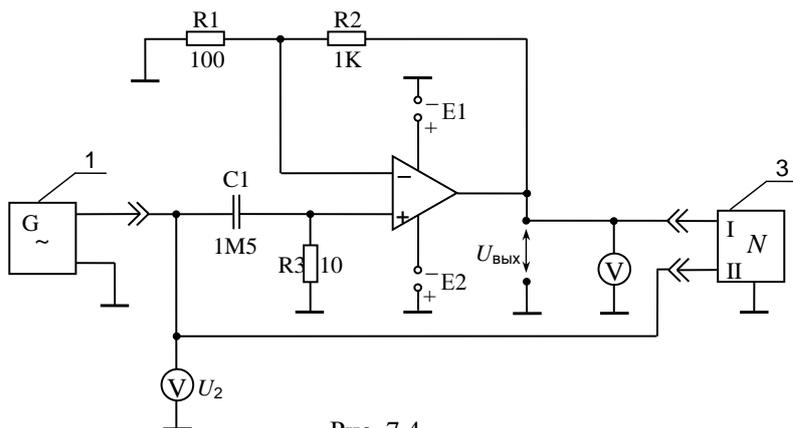


Рис. 7.4

2.4.4. Рассчитать теоретическое значение коэффициента передачи по формуле:

$$K_{\text{у.теор}} \cong 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (7.3)$$

2.5. Исследовать генератор релаксационных колебаний.

С помощью ОУ могут быть созданы генераторы синусоидальных и не-синусоидальных (в частности, релаксационных) колебаний. Схема генератора релаксационных колебаний приведена на рис.7.5 (источники питания на ней не показаны).

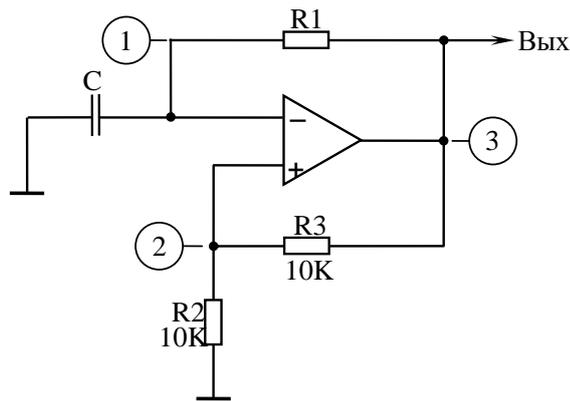


Рис. 7.5

2.5.1. Собрать схему рис.7.5.

Установить в схему конденсатор С1 с номиналом 0,047 мкФ, а R1 - 10 кОм.

2.5.2. Подключая осциллограф к разным точкам схемы генератора (1...3), зарисовать осциллограммы. Измерить с помощью осциллографа период и рассчитать частоту колебаний генератора.

3. Содержание отчета.

Отчет должен содержать:  
 паспортные данные исследуемого ОУ;  
 схемы исследований по каждому пункту;  
 результаты измерений и расчетов;  
 осциллограммы сигналов.

Контрольные вопросы.

1. Приведите примеры использования ОУ в радиоэлектронной аппаратуре.
2. Для чего включают обратные связи в ОУ?
3. По каким формулам определяют коэффициенты усиления инвертирующего и неинвертирующего ОУ?  
 Чем определяется погрешность интегрирования и

4. дифференцирования соответственно интегратора и дифференциатора на ОУ?

### Лабораторная работа №8

#### Исследование интегральных схем транзистор-транзисторной логики

Цель работы: Изучить электрические параметры интегральных схем транзистор-транзисторной логики.

##### 1. Подготовка к лабораторной работе.

При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить литературу [3, с 129-138] и конспект лекций.

Основное внимание следует уделить физическому смыслу и методам измерений основных электрических параметров логических микросхем, а также схемотехническим особенностям ТТЛ-схем. Статические параметры могут быть определены с помощью графиков передаточной  $U_{\text{ВЫХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$  (рис. 8.1.) и входной  $I_{\text{ВХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$  (рис. 8.2) характеристик.

Сначала по графику передаточной характеристики (рис.8.1.) определяют уровень логического нуля  $U^0$  и уровень

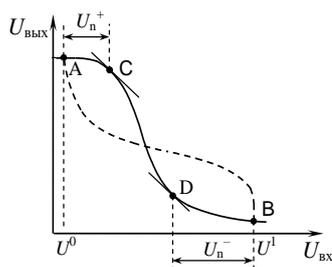


Рис. 8.1

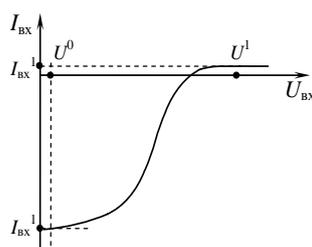


Рис. 8.2

логической единицы  $U^1$  (точки А и В определяются пересечением характеристики с ее зеркальным отражением), а затем с помощью графика (рис.8.2) входные токи  $I_{вх}^0$  и  $I_{вх}^1$ .  
 С помощью графика (рис.8.1.) определяют статическую помехоустойчивость ИМС.  $U_n = \min\{U_n^+, U_n^-\}$ , (Напомним, что в точках С и D касательная проходит под углом  $45^\circ$ ).

Быстродействие микросхем определяет среднее время задержки распространения сигнала

$$t_{зд.ср} = \frac{1}{2}(t_{зд}^{0,1} + t_{зд}^{1,0}),$$

где  $t_{зд}^{0,1}$  и  $t_{зд}^{1,0}$  - времена задержки переднего и заднего фронтов импульса, измеряемые на уровне 0,5 от амплитуды импульса.

Экономичность микросхемы характеризует средняя потребляемая мощность (в состояниях ноль и единица)

$$P_{ср} = \frac{1}{2}(P^0 + P^1).$$

Интегральное качество микросхемы определяет синтетический параметр работа переключения

$$A_{неп} = t_{зд.ср} \cdot P_{ср}.$$

В лабораторной работе используется микросхема К155ЛА3 или К555ЛА3, в состав которой входят 4 схемы 2И-НЕ. Принципиальные схемы, расположение выводов и основные электрические параметры используемых микросхем приведены в приложении.

В процессе подготовки к работе приведенные в приложении схемы и параметры ИМС должны быть внесены в протокол измерений.

## 2. Задание на выполнение лабораторной работы.

### 2.1. Снять передаточную и входную характеристики микросхемы.

2.1.1. Собрать схему рис.8.3, используя любую из четырех схем 2И-НЕ микросхемы К155ЛА3 (в качестве примера приведены номера выводов одной из схем).

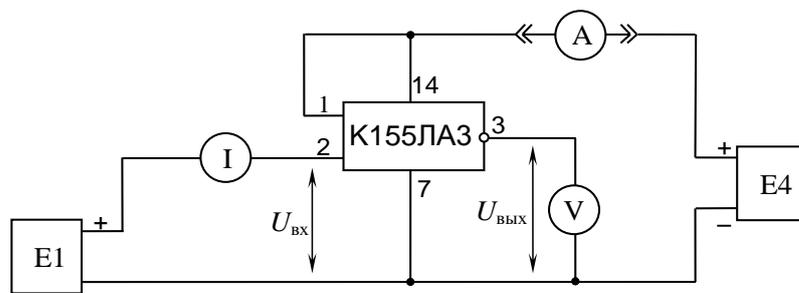


Рис. 8.3

На один из входов ИМС подать входное напряжение, а второй (не используемый) подключить к “плюсу” источника питания. Изменяя входное напряжение  $E1$  в интервале  $0...5$  В снять входную  $I_{ВХ}=f(U_{ВХ})$  и передаточную  $U_{ВЫХ}=f(U_{ВХ})$  характеристики. Результаты измерений внесите в таблицу.

2.1.2. Измерьте ток, потребляемый от источника питания  $I^0_{\text{потр}}$  при  $U_{ВХ}=U^0 \approx 0,4$  В и  $I^1_{\text{потр}}$  при  $U_{ВХ}=U^1 \approx 2,4$  В. (Для уровней  $U^0$  и  $U^1$  использованы паспортные данные).

2.2. Измерить нагрузочную способность микросхемы.

Использовать схему исследования из предыдущего пункта. Подать на вход ИМС паспортное значение напряжения логического нуля  $U_{ВХ}=0,4$  В. Подключая к выходу ИМС сопротивления нагрузки  $R_H=10\text{кОм}$ ,  $1\text{кОм}$ ,  $470\text{Ом}$ ,  $100\text{Ом}$ , снимите нагрузочную выходную характеристику  $U_{ВЫХ}=f(R_H)$ .

2.3. Исследовать быстродействие логической микросхемы.

Собрать схему рис.8.4

Четыре микросхемы включены последовательно, чтобы увеличить время задержки для облегчения измерений (не забудьте полученный результат разделить на четыре).

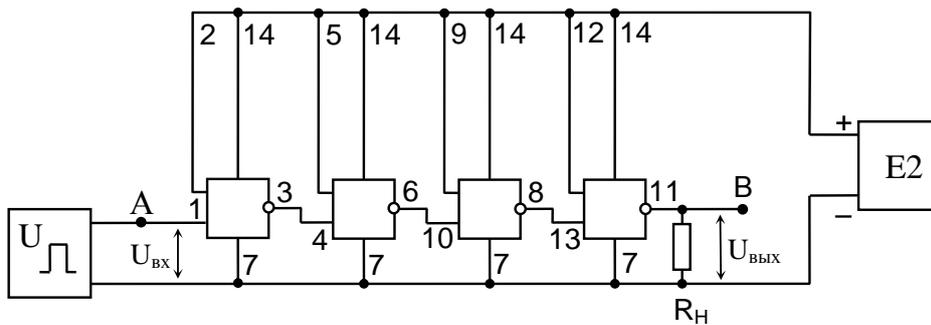


Рис. 8.4

Ко входу (точки А) и выходу (точки В) подключить осциллограф. При этом к выходу ИМС осциллограф должен быть подключен через делитель напряжения 1:10, установленный в пульте. Это позволяет в 10 раз уменьшить влияние емкости соединительного кабеля и осциллографа. (Входная цепь низкоомная и здесь это не требуется).

Подать на вход прямоугольные импульсы амплитудой 5 В и частотой следования 1 кГц. Измерить время задержки переднего  $t_{зд}^{0,1}$  и заднего  $t_{зд}^{1,0}$  фронтов.

### 3. Обработка результатов эксперимента.

3.1. По результатам измерений в п.2.1 построить графики зависимостей  $U_{ВЫХ}=f(U_{ВХ})$  и  $I_{ВХ}=f(U_{ВХ})$  и определить параметры:  $U^0$ ,  $U^1$ ,  $I_{ВХ}^0$ ,  $I_{ВХ}^1$ ,  $U_{п}^+$ ,  $U_{п}^-$ ,  $U_{п}$ . Рассчитать среднюю потребляемую мощность  $P_{ср}$ .

3.2. Рассчитать среднее время задержки распространения сигнала  $t_{зд.ср}$  и работу переключения  $A_{пер}$ .

3.3. По результатам измерений в п.1.2 построить зависимость выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  от сопротивления нагрузки  $U_{ВЫХ}^1=f(R_H)$ . На графике отметить  $R_{H.min}$  соответствующее уменьшению выходного напряжения до паспортной величины  $U_{ВЫХ}^1=2,4$  В.

#### 4. Содержание отчета.

Отчет должен содержать:  
паспортные данные микросхемы К155ЛА3, приведенные в приложении;  
таблицы с результатами измерений и графики полученных зависимостей;  
полученные значения параметров ИМС.

#### Контрольные вопросы

1. С какой целью в схемах ТТЛ используется сложный инвертор?
2. Каковы преимущества схем ТТЛ перед схемами диодно-транзисторной (ДТЛ) логики?
3. Что такое логическая схема с тремя состояниями?
4. Какую роль выполняют диоды, шунтирующие входные цепи ИМС?

#### Лабораторная работа №9

##### Исследование интегральных оптронов

Цель работы: Изучить особенности работы и методики измерения параметров оптронов

#### 1. Подготовка к лабораторной работе.

Изучить литературу [1, с.274-309]. При изучении литературы следует иметь в виду, что оптроны являются основными структурными элементами оптоэлектроники - одного из современных направлений функциональной микроэлектроники.

Простейший диодный оптрон состоит из трех элементов (рис. 9.1): фотоизлучателя 1, световода 2 и фотоприемника 3, заключенных в светонепроницаемый

герметичный корпус. При подаче на вход электрического сигнала возбуждается фотоизлучатель. Световой поток по световоду попадает в фотоприемник, в котором вырабатывается выходной электрический сигнал. Существенной особенностью оптрона является то, что его элементы связаны оптически, а электрически вход и выход изолированы друг от друга. Благодаря этому легко обеспечивается согласование высоковольтных и низковольтных, а также высокочастотных и низкочастотных цепей. Условное обозначение диодного оптрона приведено на рис.9.2, а его конструкция - на рис.9.3.

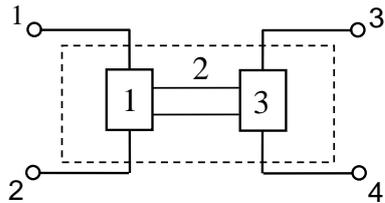


Рис. 9.1

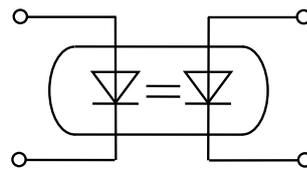


Рис. 9.2

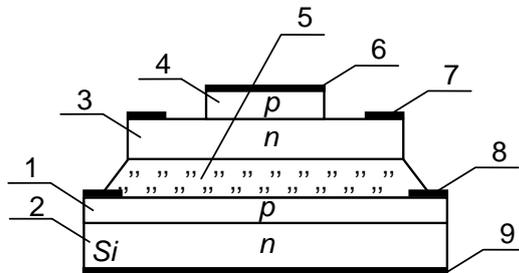


Рис. 9.3

1,2 - p и n области фотодиода; 3,4 - n и p области светодиода; 5 - световод на основе селенового стекла; 6,7 - контакты светодиода; 8,9 - контакты фотодиода.

В качестве фотоизлучателей оптронов получили распространение инфракрасные светодиоды, в которых испускание света определяется механизмом рекомбинации электронов и дырок.

Известно, что физическое явление, лежащее в основе принципа действия светодиода, называется

электролюминесценцией. Его сущность заключается в том, что в некоторых полупроводниковых материалах процесс рекомбинации электронов и дырок сопровождается излучением кванта света. Напомним, что в кремнии и германии энергия рекомбинирующих частиц рассеивается на колебаниях решетки (акустических фононах).

Для преобразования световых сигналов в электрические в основном используются фотодиоды (а также фоторезисторы, фототранзисторы и фототиристоры).

Фотодиод представляет собой обычный n-p-переход, чаще всего на основе кремния или германия, обратный ток которого определяется скоростью генерации носителей заряда порождаемых действием падающего света. Данное явление называется внутренним фотоэффектом.

Обратите внимание, что существуют два режима использования фотодиода: без внешнего питания - вентильный или фотовольтаический режим и с внешним питанием фотодиодный режим. Фотодиоды, предназначенные для преобразования световой энергии в электрическую без внешнего питания, называют вентильными фотоэлементами. Возникновение фото-ЭДС  $U_{\phi}$  связано с разделением генерированных светом электронно-дырочных пар полем n-p-перехода. При этом происходит накопление дырок в p-области и электронов в n-области, за счет чего, на n-p-переходе создается добавочная разность потенциалов. Величина фото-ЭДС  $U_{\phi}$  зависит от уровня оптического сигнала  $P_{\phi}$  и величины сопротивления нагрузки.

Типичные выходные характеристики вентильного фотоэлемента приведены на рис.9.4.

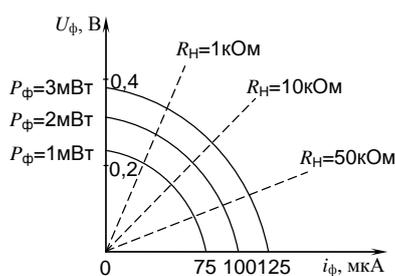


Рис. 9.4

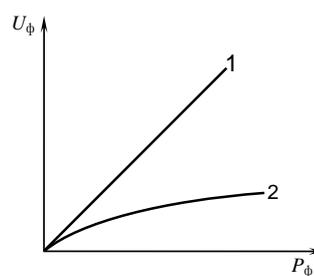


Рис. 9.5

Необходимо иметь в виду, что в фотодиодном режиме за счет источника внешнего напряжения фототок  $i_{\phi}$  примерно равен току короткого замыкания вентильного элемента, а падение напряжения от фототока на нагрузке  $U_{\phi}$  при любом сопротивлении нагрузки больше по величине. Зависимости напряжения сигнала  $U_{\phi}$  от мощности оптического излучения  $P_{\phi}$  для фотодиода (1) и вентильного элемента (2) при одинаковом сопротивлении нагрузки приведены на рис.9.5.

Эффективность фотоэлектрического преобразования принято характеризовать вольт-ваттной  $S_U = U_{\phi}/P_{\phi}$  и ампер-ваттной  $S_i = I_{\phi}/P_{\phi}$  чувствительностью. Следует отметить, что дополнительным преимуществом фотодиодов является высокая линейность световых характеристик  $I_{\phi}$ ,  $U_{\phi} = f(P_{\phi})$ , позволяющая применять их в оптических линиях связи. Вентильные элементы в основном используются в качестве преобразователей энергии (солнечные батареи).

Обратите внимание, что управление током с помощью света может быть получено и в биполярном транзисторе, причем с существенно большей чувствительностью, чем в фотодиодах, за счет усиления тока базы. Следует отметить, что оптическая генерация носителей в базе фототранзистора эквивалентна введению в базу носителей заряда от внешнего источника. В результате фототок транзистора усиливается в  $\beta$  раз по сравнению с фотодиодом, где  $\beta$  - статический коэффициент усиления тока базы фототранзистора.

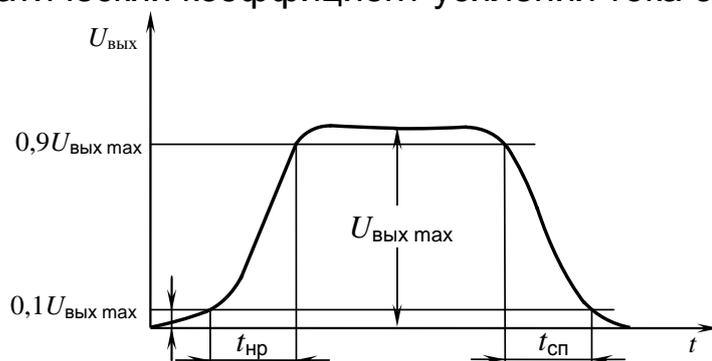


Рис. 9.6

Инерционность оптрона связана с процессами в светодиоде и приемнике излучения и описывается с помощью времен нарастания  $t_{нр}$  и спада  $t_{сп}$  выходного сигнала рис.9.6. (При подаче на вход прямоугольного импульса).

Можно выделить следующие основные параметры диодных оптронов:

максимальный входной ток  $I_{вх\ max}$ ;

максимальное входное напряжение  $U_{вх\ max}$ ;

максимальное выходное обратное напряжение  $U_{вых\ обр.\ max}$ ;

входное напряжение  $U_{вх}$  - постоянное входное напряжение, соответствующее заданному входному току;

выходной обратный темновой ток  $I_{вых\ обр.\ т}$ ;

времена нарастания  $t_{нр}$  и спада  $t_{сп}$  выходного сигнала - интервалы времени, в течение которых выходной сигнал диодного оптрона изменяется в интервалах 0.1-0.9 и 0.9-0.1 от своего максимального значения (рис.9.6);

коэффициент передачи по току  $K_I$  - отношение приращения выходного тока к входному  $K_I = (I_{вых} - I_{вых\ обр.\ т}) / I_{вх}$ .

Предельные параметры и расположение выводов диодных оптронов, используемых в работе, приведены в приложении.

## 2. Задание на выполнение лабораторной работы.

Зарисовать принципиальную схему исследуемого оптрона и выписать предельные параметры.

### 2.1. Исследовать характеристики диодного оптрона.

2.1.1. Собрать схемы исследования рис.9.7. Остановить ограничители тока в источниках питания в соответствии с предельными параметрами оптрона.

2.1.2. Изменяя  $E_1$ , снять входную характеристику оптрона:  $I_{вх} = f(U_{вх})$ . Принять  $I_{вх} = E_1/R_1$ , так как входное сопротивление светодиода много меньше  $R_1$ .

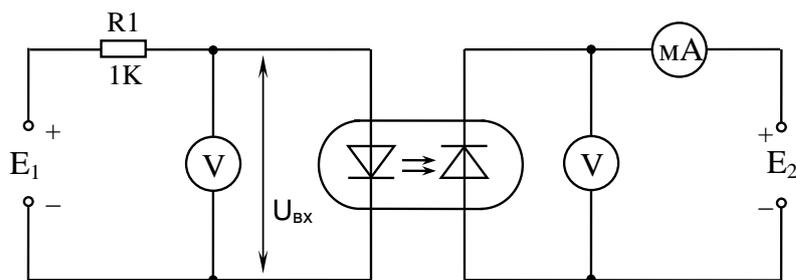


Рис. 9.7

Результаты измерений занести в табл. 9.1.

Таблица 9.1

E1, В	
$U_{вх}$ , В	
$I_{вх}=E1/R1$ , мА	

2.1.3. Остановить  $E2=0$ . Изменяя  $E1$ , снять передаточную характеристику оптрона при использовании фотovoltaического режима  $I_{вых}=f(I_{вх})$ .

Результаты измерений занести в табл.9.2.

Таблица 9.2

E1, В	
$I_{вых}$ , В	
$I_{вх}=E1/R1$ , мА	

2.1.4. Установить  $E2=5$  В. Повторить измерения по п.2.1.3 для оптрона при использовании фотодиодного режима. Результаты измерений занести в табл.9.3, аналогичную 9.2.

2.1.5. Измерить времена нарастания  $t_{nr}$  и спада  $t_{sp}$  выходного тока оптрона.

Собрать схему исследования, изображенную на рис.9.8, включив в цепь светодиода генератор импульсов. Установить на выходе генератора амплитуду импульсов 5В с частотой следования примерно 1кГц. К измерительному резистору R2 через делитель напряжения 1:10 подключить

осциллограф. (Другой канал осциллографа используйте для измерения амплитуды импульсов на выходе генератора). Установить  $E_2=5\text{В}$  и по осциллограмме выходного тока (пропорционального падению напряжения на  $R_2$ ) измерить времена нарастания  $t_{\text{нр}}$  и спада  $t_{\text{сп}}$ .

Установить  $E_2=0$  и повторить измерение времен для фотovoltaического режима.

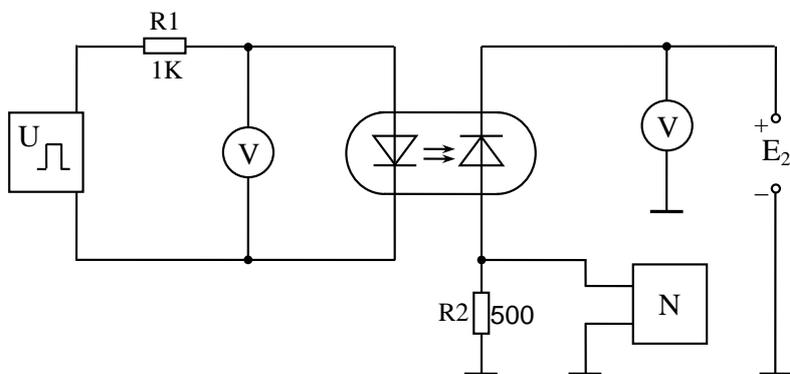


Рис. 9.8

2.2. Исследовать характеристики транзисторного оптрона. Собрать схему рис.9.9, установить  $E_2=5\text{ В}$ .

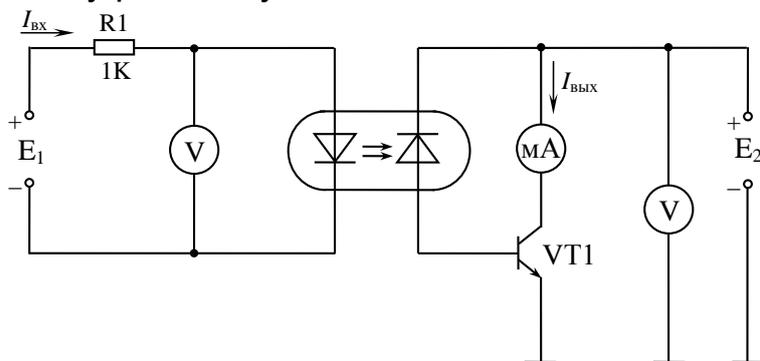


Рис. 9.9

(В этой схеме фотодиод оптрона и внешний транзистор имитируют фототранзистор).

Изменяя  $E_1$ , снять передаточную характеристика транзисторного оптрона  $I_{\text{ВЫХ}}=f(I_{\text{ВХ}})$ ; принять  $I_{\text{ВХ}}=E_1/P_1$  и  $I_{\text{ВЫХ}}=I_K$ . Результаты измерений занести в табл.9.4, аналогичную 9.2 и 9.3.

### 3. Обработка результатов эксперимента.

3.1. Построить входную характеристику оптрона и определить величину входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующего  $I_{\text{ВХ}}=10$  мА.

3.2. Построить передаточные характеристики оптрона в диодном и фотовольтаическом режимах и определить коэффициенты передачи тока  $K_I$  при  $I_{\text{ВХ}}=10$  мА.

3.3. Рассчитать среднее время задержки распространения сигнала в диодном оптроне

$$t_{\text{зд.ср}} = \frac{1}{2} \left( \frac{t_{\text{ип}}}{2} + \frac{t_{\text{сн}}}{2} \right).$$

3.4. Построить передаточную характеристику транзисторного оптрона и рассчитать коэффициент передачи тока  $K_I$  при  $I_{\text{ВХ}}=10$  мА..

### 4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:  
предельные параметры и принципиальную схему исследуемого оптрона;  
схемы измерений;  
таблицы и графики снятых зависимостей;  
рассчитанные значения параметров;  
осциллограммы токов и напряжений.

#### Контрольные вопросы.

- 1 . Что такое внутренний фотоэффект?
2. Поясните процесс образования фототока диода. Какой

- параметр описывает эффективность данного процесса?
3. Почему чувствительность фототранзистора выше, чем фотодиода:
  4. В чем причина инерционности фотодиодов?
  5. В чем причины инерционности фототранзисторов?
  6. Поясните принцип действия светодиода.
  7. Почему оптроны используются для развязки электрических цепей?

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Справочные данные исследуемых в лаборатории электронных приборов и интегральных микросхем

### П1. Выпрямительные, импульсные и высокочастотные диоды

Тип диода	Структура	$I_{\text{пр доп}}$ , мА	$U_{\text{обр доп}}$ , В	$f_{\text{max}}$ , кГц	$\tau_{\text{восст}}$ , мкс
D2 E	Ge, точечный	16	50		3
D2 Ж	Ge, точечный	8	150		3
D7 Г	Ge, сплавной	300	200	2,4	
D7 Ж	Ge, сплавной	300	400	2,4	
D9 E	Ge, точечный	20	30		3
D104	Si, микросплавной	30	100	150	0,5
D226	Si, сплавной	300	200	1,0	
KD503 A	Si, эпитаксиально- планарный	20	30		0,01
D312	Ge, диффузионный	50	75		0,7

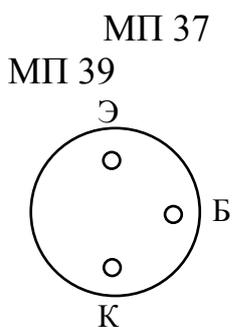
### П2. Стабилитроны и стабисторы

Тип диода	Структура	$U_{\text{ст}}$ , В	$I_{\text{см min}}$ , мА	$I_{\text{см max}}$ , мА	$r_{\text{D}}$ , Ом
D814 Б	Si, сплавной	8...9,5	3	36	10
D814 D	Si, сплавной	11,5... 14,0	3	24	18
KC156 T	Si, диффузионно- сплавной	5,6	1	22,4	100
D219 C	Si, микросплавной стабистор	0,57	1	50	
KC113 A	Si, диффузионно- сплавной стабистор	1,17... 1,8	1	100	80

### П3. Биполярные транзисторы

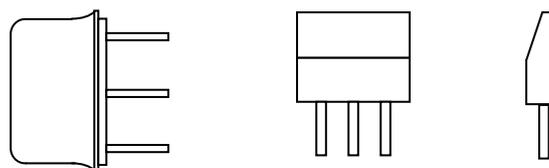
Тип тран-ра	Структура	$h_{21Э}$	$f_{h21Э}(f_T)$ , МГц	$I_{к доп}$ , мА	$U_{кэ доп}$ , В	$P_{к доп}$ , мВт	$\tau_k$ , мкс	$C_k(10 В)$ , пФ
МП37Б	n-p-n, Ge, сплавной	20-50	1,0	20	15	150		40
МП39Б	p-n-p, Ge, сплавной	20-50	0,5 1,5	20	20	150		40
КТ315Б	n-p-n, Si, эпитаксиальн о-планарный	50-350	(250)	100	20	150	0,5	7
КТ361Б	p-n-p, Si, эпитаксиальн о-планарный	50-350	(250)	50	20	150	0,5	9

(ТР 2)



(ТР 27) КТ 315

КТ 361



### П4. Полевые транзисторы

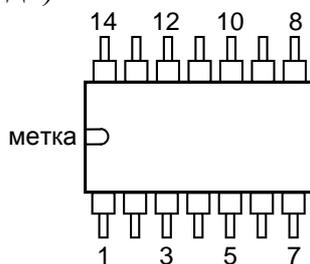
Тип транзистора	Структура	$I_{с доп}$ ( $I_{с нач}$ )	$U_{си доп}$ , В	$P_{с доп}$ , мВт	$C_{зи}$ , пФ	$C_{зс}$ , пФ	$C_{си}$ , пФ	$r_k$ , Ом	$U_{отс}$ , В
КП103И	n-p-переходный p-канальный	(0,8-1,8)	12	21	20	8	-	30	0,8-3
КП103Е	-----	(0,4-1,5)	10	7	20	8	-	50	0,4-1,5
КП103М	-----	(5-7,5)	10	120	20	8	-	60	3-5
КП301Б	p-МОП, индуцированный канал	15	20	200	3,5	1	3,5	100	-4
КП305Д	n-МОП, встроенный канал	15	15	150	5	0,8	5	80	-6

(ТР 67) КП 103 (ТР 69) КП 305 (ТР 71) КП 301



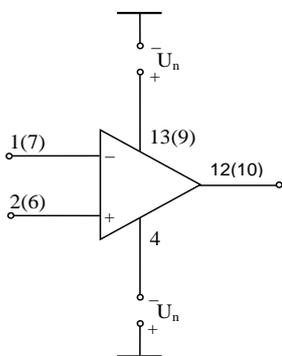
## П5. Интегральные микросхемы

Все используемые в лаборатории микросхемы имеют прямоу-гольные пластмассовые или керамические корпуса типов 201.14.1-201.14.9 с расположением 14 выводов в 2 ряда (метка может быть выполнена в виде точки около первого вывода).



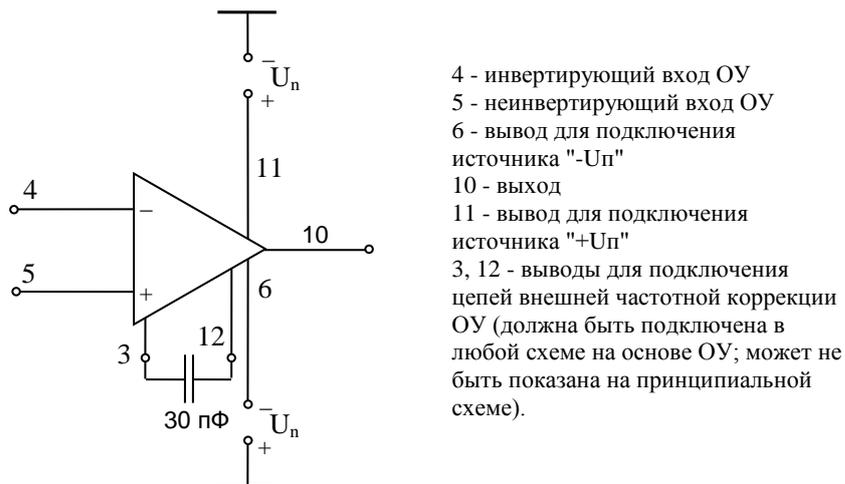
Корпуса 201.14.1-201.14.9 (вид сверху)

К140УД20. Сдвоенный операционный усилитель.



1(7) - инвертирующий вход ОУ;  
 2(6) - неинвертирующий вход ОУ  
 4 - вывод для подключения источника "-U<sub>n</sub>"  
 12(10) - выход ОУ  
 13(9) - вывод для подключения источника "+U<sub>n</sub>"  
 (Цифры в скобках относятся ко второму ОУ, размещенному на этом кристалле).

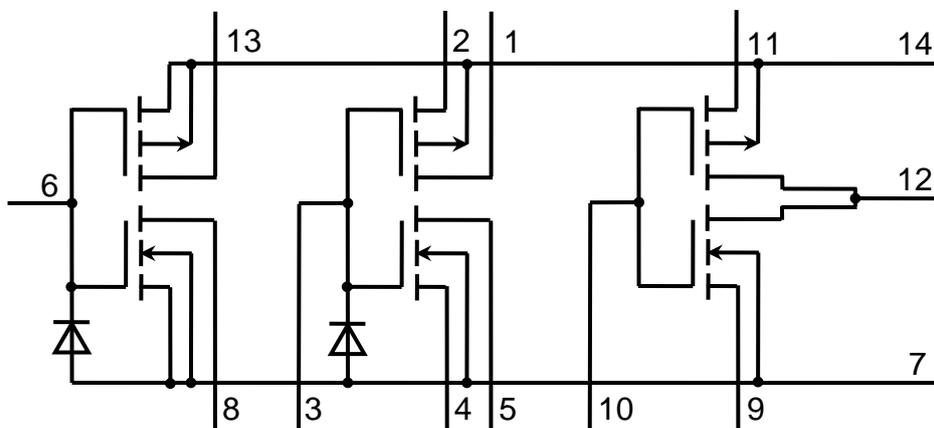
## К553УД2; КР1408УД1 Операционные усилители



### Основные параметры ОУ, исследуемых в лаборатории

Тип ОУ	$K_{ув}$ $10^3$	$U$ см, мВ	$I_{вх},$ мкА	$I_{вх},$ мкА	$f_1,$ МГц	$U_{в.}$ вых, в/мкС	$K_{ос}$ сф дБ	$U_{вх},$ В	$U_{вх}$ сф, В	$U$ п, В
К553У Д2	2 0	7,5	1, 5	0,5	1	0,5	7 0	1 0	1 0	+( 6- 1 5)
К140У Д20	5 0	5	0, 2	0, 0 5	0,5 5	0,3	7 0	1 2	1 1	+( 6- 1 5)
для каждо го ОУ										

К176ЛП1 Универсальный логический элемент КМОП-структуры (при соответствующей коммутации может быть использован в качестве трех элементов НЕ, элемента НЕ с большим коэффициентом разветвления, элемента ЗИ-НЕ, элемента ЗИЛИ-НЕ и триггерной ячейки).



Основные электрические параметры:

напряжение питания  $U_{\text{п}}=9\text{В}+5\%$ ,

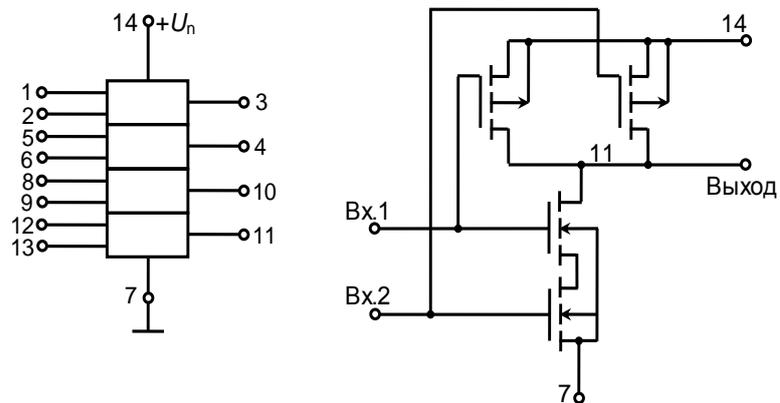
уровни логических сигналов  $U^0_{\text{ВЫХ}} \leq 0,3\text{В}$ ;  $U^1_{\text{ВЫХ}} \geq 8,2\text{В}$ ; потребляемый ток, мА, не более 0,3;

среднее время задержки распространения  $\leq 200$  нс.

Работоспособность сохраняется при уменьшении напряжения питания до 5В.

Допустимый диапазон входных сигналов (0 -  $U_{\text{п}}$ ).

К176ЛА7,  
К176ЛА8. 4 элемента 2И-НЕ КМОП-структуры



Принципиальная схема каждого из элементов 2И-НЕ.

Предельные и основные электрические параметры как для К175ЛП1.

## Содержание

Лабораторная работа	стр.
1. Исследование характеристик и параметров полупроводниковых диодов. . . . .	3
2. Исследование статических характеристик и параметров биполярных транзисторов. . . . .	8
Исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе. . . . .	14
3. Исследование полевого транзистора с управляющим переходом. . . . .	21
4. Исследование ключевых схем на полевых транзисторах. . . . .	28
5. Исследование параметров операционных усилителей. . . . .	31
6. Исследование аналоговых устройств на основе операционных усилителей. . . . .	38
7. Исследование интегральных схем транзистор-транзисторной логики. . . . .	44
8. Исследование интегральных оптронов. . . . .	48
ПРИЛОЖЕНИЕ. . . . .	