

С.Г.Камзолова

ПОСОБИЕ

к выполнению лабораторных работ

по дисциплине

«Общая электротехника и электроника»,

раздел «Электронные приборы»

для студентов специальности 201 300

всех форм обучения

Часть 2

Москва

Рецензент д-р технических наук, профессор В.Д.Рубцов

Камзолова С.Г.

Пособие по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Общая электротехника и электроника», ч.2 – М.: МГТУ ГА, 2001. - с.

Данное пособие издается в соответствии с учебным планом для студентов специальности 201 300.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры

\_\_\_\_\_ 2001 г. и методического совета \_\_\_\_\_ 2001 г.

## Работа № 6

### УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

#### Цель работы

Целью работы является изучение и экспериментальное исследование параметров и характеристик однотактного и операционного усилителей.

Методические указания к  
выполнению лабораторной работы.

Однотактный усилитель имеет один вход и один выход. Он может быть выполнен как на биполярном, так и на полевом транзисторе (ПТ).

В настоящее время широкое распространение получили усилительные каскады на ПТ, так как они обладают значительно большим входным сопротивлением, чем усилительные каскады на биполярных транзисторах. Наиболее часто используют усилительный каскад с общим истоком (ОИ), схема которого приведена на рис. 6.1.

В этом каскаде резистор  $R_3$ , на котором выделяется выходной сигнал, включен в цепь стока. В цепь истока включен резистор  $R_4$ , на котором создается необходимое падение напряжения в режиме покоя, являющееся напряжением смещения между затвором и истоком. Резистор  $R_1$  в цепи затвора обеспечивает в режиме покоя равенство потенциала затвора и общей точки усилительного каскада. Следовательно, потенциал затвора ниже потенциала истока на величину падения напряжения на резисторе  $R$  от постоянной составляющей тока  $I_{и0}$ .

При подаче на вход переменного напряжения в канале ПТ появляются переменные составляющие тока  $I_{и}$  и тока стока  $I_c$ , причем  $I_c = I_{и}$ . За счет падения напряжения на резисторе  $R_4$  от переменной составляющей тока  $I_{и}$  переменная составляющая напряжения

между затвором и истоком, усиливаемая ПТ, может быть значительно меньше входного напряжения

$$U_{зи} = U_{вх} - I_{и} \cdot R_3$$

Это явление, называемое отрицательной обратной связью, приводит к уменьшению коэффициента усиления усилительного каскада. Для его устранения параллельно резистору включают конденсатор  $C_2$ , сопротивление которого на самой низкой частоте усиливаемого напряжения должно быть во много раз меньше сопротивления резистора  $R_4$ . При этом условии падение напряжения от тока  $I_{и}$  на цепочке  $R_4 C_2$ , называемой звеном автоматического смещения, очень маленькое, так что по переменной составляющей тока исток можно считать соединенным с общей точкой усилительного каскада.

Выходное напряжение снимается через конденсатор связи  $C_3$  между стоком и общей точкой каскада, т.е. оно равно переменной составляющей напряжения между стоком и истоком.

При подаче на вход усилительного каскада переменного напряжения  $U_{вх}$  появляется переменная составляющая тока стока  $I_c$ . Изменение этого тока приводит к изменению напряжения  $U_{си}$  между стоком и истоком; его переменная составляющая, численно равная и противоположная по фазе падению напряжения на резисторе  $R_4$ , является выходным напряжением каскада

$$U_{вых} = -I_{вх} \cdot R_3$$

Из формулы видно, что выходное напряжение противофазно входному, причем оно значительно больше его, так как напряжение в цепи стока значительно больше, чем в цепи затвора.

Коэффициент усиления по напряжению определяется следующим образом:

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} .$$

Входное сопротивление ПТ, т.е. сопротивление между затвором и истоком имеет значение порядка  $10^8$  Ом, поэтому входное сопротивление рассматриваемого усилительного каскада определяется сопротивлением резистора  $R_1$ , который подключен параллельно входным зажимам ПТ

$$R_{вх} \approx R_1 = 10^5 \dots 10^6 \text{ Ом.}$$

Выходное сопротивление современных ПТ, т.е. сопротивление между стоком и истоком, имеет значение порядка  $10^4 + 10^5$  Ом, поэтому выходное сопротивление усилительного каскада на ПТ определяется сопротивлением резистора R3.

$$R_{\text{ВЫХ}} \approx R3 = 10^3 \dots 10^4 \text{ Ом.}$$

Операционный усилитель (ОУ) – это усилитель с непосредственными связями, большим коэффициентом усиления, большим входным сопротивлением, дифференциальным входом, несимметричным выходом с малым выходным сопротивлением. Название этих усилителей связано с первоначальным их применением главным образом для выполнения различных операций над аналоговыми величинами (сложение, вычитание, интегрирование и др.). Однако, благодаря достижениям в области микроэлектроники и широкому выпуску операционных усилителей в интегральном исполнении они приобрели более широкие схемотехнические возможности. В настоящее время ОУ играют роль многоцелевых элементов при построении аппаратуры самого различного назначения. Они применяются в усилительной технике, устройствах генерации сигналов синусоидальной и импульсной формы, в стабилизаторах напряжения, активных фильтрах и т.д.

Операционный усилитель почти всегда используется с внешней глубокой отрицательной обратной связью, определяющей его результирующие характеристики. Введение обратной связи того или иного вида обеспечивает способность ОУ выполнять различные математические операции над сигналами, циркулирующими в его цепях.

Операционные усилители характеризуются большим числом параметров, которые делятся на группы: общие, точностные, динамические и др.

ОУ имеет два входа: инвертирующий ( $e_-$ ) и неинвертирующий ( $e_+$ ) (рис.6.3). При работе ОУ в линейном режиме напряжение на его входе увеличивается с уменьшением напряжения на инвертирующем входе и с увеличением напряжения на инвертирующем.

Разность напряжений на выходах ОУ  $U_{\text{ВХ}} = e_+ - e_-$  называют дифференциальным входным сигналом, а полусумму этих напряжений  $E_{\text{сиф}} = (e_+ + e_-)/2$  – синфазным входным сигналом.

К общим параметрам ОУ относятся:

$$\text{коэффициент усиления дифференциального сигнала } K_0 = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}},$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}$  – выходной дифференциальный сигнал;

Отношение ослабления синфазного сигнала

$$OOC = 20 \lg K_c/K_d,$$

где  $K_c$  - коэффициент передачи синфазного сигнала;

$$OOCС=60\dots 120 \text{ дВ};$$

входное сопротивление  $R_{ВХ}$  (для отдельных входов) и  $R_{\text{синф.}}$  (для объединенных входов);  $R_{ВХ}=103\dots 106 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{синф.}}=(10\dots 1000) R_{ВХ}$

выходное сопротивление.

Схема включения ОУ во внешнюю цепь (рис.6.2) содержит два разнополярных источника питания, обычно с одинаковыми значениями напряжений  $E_{к^+}$  и  $E_{к^-}$ , резистор нагрузки  $R_H$  и источник входного сигнала  $\pm U_{ВХ}$ .  $U_{\text{синф.}}$  поступает на оба входа одновременно (в фазе).

Выходное напряжение ОУ может симметрично изменяться относительно нуля, причем, если  $U_{ВХ}=0$ , то  $U_{ВЫХ}=0$ . Это условие называется условием баланса ОУ.

Напряжение входного сигнала также может быть двуполярным.

Если заземлен инвертирующий вход ОУ, то усилитель является неинвертирующим и его переходная характеристика имеет вид, представленный на рис 6.3 (сплошная линия). В этом случае входной и выходной сигналы изменяются в одинаковой фазе.

Если заземлен неинвертирующий вход ОУ, то схема включения является инвертирующей (пунктирная линия на рис.6.3.).

Если в схеме нет обратных связей, наклон передаточной характеристики  $U_{ВЫХ}/U_{ВХ}$  равен собственному коэффициенту усиления  $K_0$ . Максимальная амплитуда выходного сигнала:

$$U_{ВЫХ \text{ МАХ.}}=U_{ВЫХ \text{ МАХ.}}^+ - U_{ВЫХ \text{ МАХ.}}^-$$

В реальном ОУ наблюдается разбаланс (рис.6.4). При этом, когда оба входа ОУ заземлены и  $U_{ВХ}=0$ , на выходе имеется некоторое напряжение  $+\Delta U_{ВЫХ}$  или  $-\Delta U_{ВЫХ}$ . Это напряжение пересчитывается на вход ОУ через  $K_0$  во входное напряжение

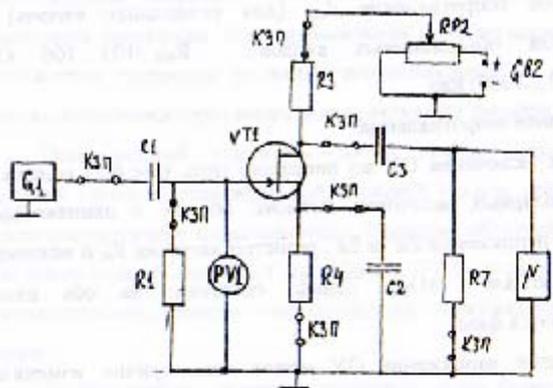


Рис. 6.1

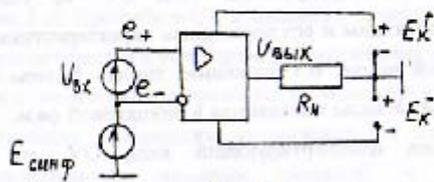


Рис. 6.2

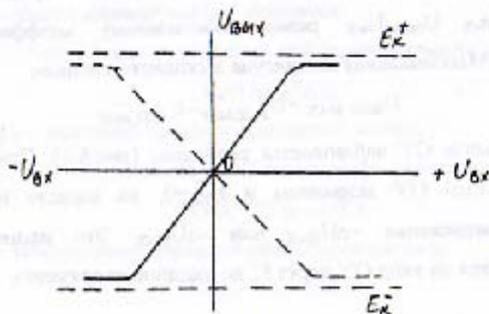


Рис. 6.3

смещения нуля  $-U_{см0}$  или  $+U_{см0}$ . Параметры смещения нуля относятся к точностным.

Изменение питающего напряжения вызывает разбаланс ОУ. Качество усиления по этому параметру определяется отношением ослабления влияния питания – ООВП:

$$\text{ООВП} = U_{см0} / \Delta E_{к\pm}$$

которое определяется раздельно для положительного и отрицательного источников питания и имеет размерность мкВ/В, либо выражается в дБ.

К динамическим параметрам относятся параметры, характеризующие быстродействие ОУ, которое определяется различными способами.

Для схемы обработки гармонических сигналов используется малосигнальная частотная характеристика, которая отображает закон уменьшения коэффициента усиления  $K_0$  при увеличении частоты и имеет две особые точки: значение частоты, на которой  $K_0$  падает до уровня  $0,7 / -3$  дБ/, и значение частоты единичного усиления  $f_1$ , где  $K_0$  становится равным единице. Наиболее универсальной и простой характеристикой быстродействия усилителя является его скорость отклика  $\rho$ . При ее определении на вход ОУ подается большой скачок сигнала и измеряется скорость нарастания выходного импульса.

При импульсном режиме работы требуется знать время установления  $t_{уст}$  выходного сигнала, а также время восстановления усилительных свойств после перегрузки ОУ входным сигналом. Отметим на диаграмме выходного отклика характерные точки, используемые при определении импульсных и временных характеристик ОУ (рис.6.5).

$t_1 - t_0$  – время включения ОУ.

За время  $t_2 - t_1$  происходит нарастание выходного сигнала со скоростью  $\rho$  до конечного уровня  $U_{ВЫХ}$ .

Если выходной сигнал имеет выброс, то  $t_3 - t_2$  – время восстановления. В момент  $t_4$  выходной сигнал входит в требуемую зону ошибки  $\pm \Delta U_{ВЫХ}$  и считается установившимся.

Применение обратных связей в операционных усилителях (ОУ) позволяет создать усилители с любыми амплитудными и частотными характеристиками. Как правило, это отрицательная связь. Она осуществляется применением навесных элементов. Рассмотрим влияние нескольких вариантов обратных связей на результирующие характеристики ОУ.

1. Инвертирующий усилитель (рис.6.6).

Коэффициент передачи инвертирующего усилителя:

$$K = -R_2/R_1.$$

Достоинством такого усилителя является то, что ОУ в нем работает при нулевом синфазном сигнале. Это снимает вопрос о влиянии на  $U_{ВЫХ}$  конечного значения ослабления синфазного сигнала примененного ОУ. Благодаря этому оказывается возможным прикладывать ко входу инвертирующего усилителя большие напряжения, в том числе и превышающие напряжение питания. При этом  $R_2/R_1$  должно быть таким, чтобы  $U_{ВЫХ}$  оставалось в границах линейного участка амплитудной характеристики.

ОУ в инвертирующем усилителе позволяет производить суммирование сигналов от нескольких источников при практически полном отсутствии влияния их друг на друга. Недостатком инвертирующего усилителя является относительно низкое  $R_{вх}=R_1$ , поэтому он применяется тогда, когда нужно инвертировать  $U_{вх}$  и к

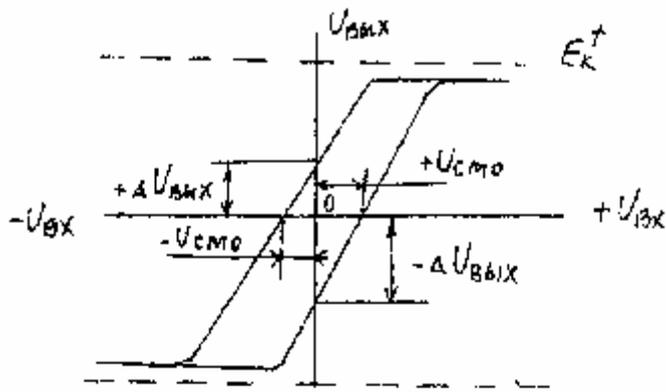


Рис. 6.4

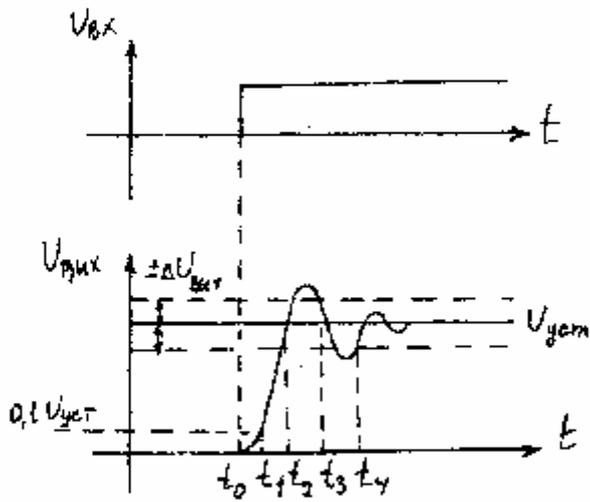


Рис. 6.5

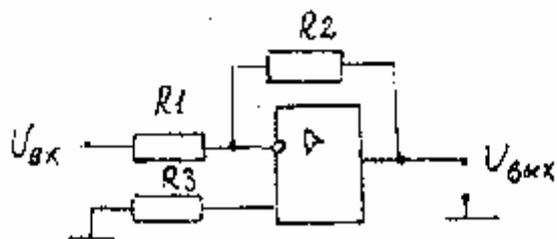


Рис. 6.6

усилителю не предъявляется требование высокого  $R_{BX}$ , или когда нужно просуммировать несколько входных сигналов (рис.6.7).

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\left(U_1 \frac{R_{OC}}{R_1} + U_2 \frac{R_{OC}}{R_2} + U_3 \frac{R_{OC}}{R_3}\right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{K_0 \beta}},$$

где  $\beta$  - коэффициент обратной связи:

$$\beta = \frac{R_1 // R_2 // R_3}{R_{OC} + (R_1 // R_2 // R_3)}.$$

## 2. Неинвертирующий усилитель (рис.6.8).

В неинвертирующем усилителе реализуется последовательная отрицательная обратная связь путем подачи части выходного напряжения на инвертирующий вход. Коэффициент передачи усилителя:

$$K = 1 + R_2/R_1.$$

Неинвертирующий усилитель обладает большим  $R_{ВХ}$ .

Широкое применение находит неинвертирующий усилитель с  $K=1$  (рис.6.9). Он имеет высокое  $R_{ВХ}$ , малое  $R_{ВЫХ}$ . Его включают между источником сигнала и нагрузкой для исключения влияния сопротивления нагрузки на источник сигнала, имеющий сравнимое с нагрузкой внутреннее сопротивление.

## Лабораторное задание.

### 1. Исследование работы усилительных каскадов на ПТ.

Исследование усилительного каскада, собранного по схеме с общим истоком.

Используя КЗП, соберите схему усилительного каскада (рис.6.10). Ручкой потенциометра  $RP_2$  установите максимальное значение  $U_{СИ}$ . Отключите генератор  $G_1$  входных сигналов (уберите

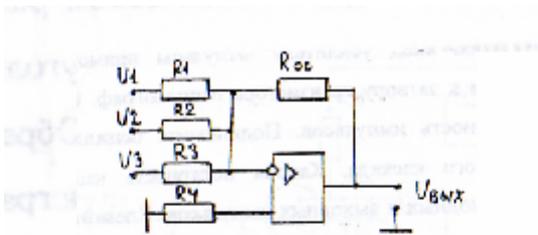


Рис. 6.7

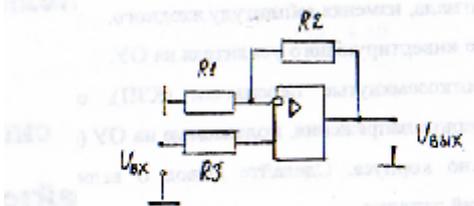


Рис. 6.8

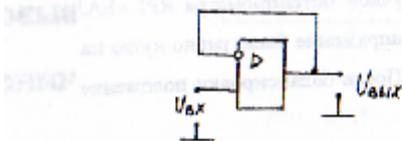


Рис. 6.9

КЗП) и измерьте величины  $U_{\text{зио}}$ ,  $I_{\text{со}}$  и  $U_{\text{сио}}$  в статическом режиме ( $U_{\text{вх}}=0$ ). Подайте на вход усилителя импульсы прямоугольной формы. Подключите к затвору транзистора осциллограф. Обратите внимание на полярность импульсов. Подключите осциллограф к выходу усилительного каскада. Какова полярность импульсов? Нарисуйте эпюры входных и выходных импульсов. Сделайте вывод о соотношении фаз входного и выходного сигналов в усилительном каскаде, собранном на ПТ по схеме с общим истоком.

Подайте на вход гармонический синусоидальный сигнал (установите тумблер SA в нижнее положение). Наблюдайте за формой выходного сигнала, изменяя амплитуду входного.

## 2. Исследование инвертирующего усилителя на ОУ.

Используя короткозамкнутые перемычки (КЗП), соберите схему (рис.6.11). Измерьте напряжения, подаваемые на ОУ (выводы 07 и 04) относительно корпуса. Сделайте вывод о величине и полярности напряжений питания.

Отключите КЗП, соединяющую С1 и резистор R2. С помощью КЗП подсоедините резистор R2 к гнезду  $\perp$ . Таким образом, оба входных напряжения равны нулю. Измерьте величину выходного напряжения (если измерения осуществляются осциллографом, то пользуйтесь открытым входом). В идеале оно должно быть равно нулю. Если это не так, то ручкой потенциометра РР1 «БАЛАНС» добейтесь, чтобы выходное напряжение было равно нулю на самом маленьком пределе прибора. После балансировки положение ручки «БАЛАНС» изменять нельзя.

Установите тумблер SAI в положение « $\perp$ ». Подключите к выходу генератора С1 осциллограф и с помощью ручки потенциометра задайте амплитуду синусоидального сигнала порядка 0,1+0,2 В. Получите на экране осциллографа устойчивое

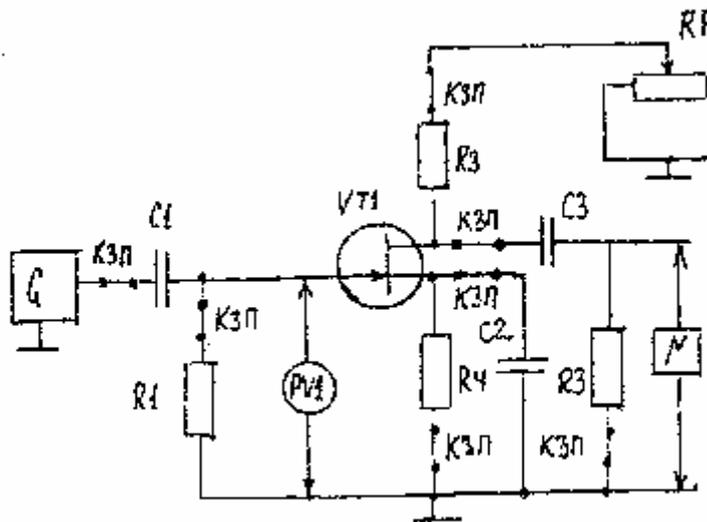


Рис. 6.10

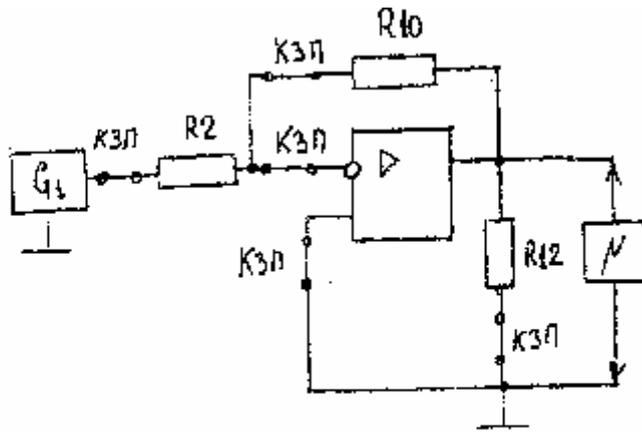


Рис. 6.11

изображение одного периода гармонического сигнала. Измерьте амплитуду и период. Подайте этот сигнал на вход усилителя (соедините выход генератора с резистором R2). Осциллографом измерьте амплитуду выходного сигнала. Рассчитайте коэффициент усиления напряжения, используя амплитудные значения входного и выходного напряжений и значения номиналов резисторов, которые установлены в цепи ООС ( $R_0$ ) и на инвертирующем входе ( $R_B$ ):

$$K = -U_{\text{мВЫХ}}/U_{\text{мВХ}} = -R_0/R_B = -R_{10}/R_2.$$

Не изменяя амплитуды входных сигналов, замените резистор в цепи ООС  $R_{10}$  на  $R_{11}$  и посмотрите, как изменилась амплитуда выходного сигнала. Рассчитайте коэффициент усиления напряжения. Поменяйте резистор во входной цепи  $R_2$  на  $R_3$ . Посмотрите осциллограмму выходного сигнала. Сделайте вывод о том, как зависит коэффициент усиления от величины сопротивления резисторов  $R_0$  и  $R_B$  и коэффициента усиления ОУ.

Восстановите во входной цепи резистор  $R_2$ , а в цепи ООС –  $R_{10}$ . Снимите передаточную характеристику инвертирующего усилителя, т.е. зависимость  $U_{\text{мВЫХ}} = f(U_{\text{мВХ}})$ . Для этого необходимо задаваться амплитудой входного сигнала (0,1; 0,2 ... 1,2 В) и измерять соответственно амплитуду выходного сигнала. Во время работы не допускайте искажений формы выходного синусоидального сигнала. Постройте передаточную характеристику.

Подайте на инвертирующий вход усилителя импульсы прямоугольной формы амплитудой 0,4+0,5 В. Для этого выключатель SA1 переведите в положение « ». Посмотрите на осциллограмму выходного сигнала. Измерьте амплитуду и обратите внимание на полярность импульсов. Сделайте вывод.

Получите на экране осциллографа один выходной импульс и «растянув» его передний фронт, измерьте время установления. Рассчитайте скорость нарастания выходного напряжения

$$V=U_{m\text{ВЫХ}}/t_{\text{УСТ.}}$$

### 3. Исследование неинвертирующего усилителя.

Соберите схему неинвертирующего усилителя (рис.6.12). Включите установку и, пользуясь методикой, приведенной в п.1, произведите балансировку ОУ, для этого неинвертирующий вход ОУ с помощью КЗП соедините с корпусом, временно отключив генератор G1. После балансировки ОУ ручку «БАЛАНС» не трогайте. Соедините генератор G1 с неинвертирующим входом ОУ и подайте на него прямоугольные импульсы амплитудой 0,2+0,3 В. Обратите внимание на их полярность. Подключите осциллограф к выходу усилителя и измерьте амплитуду выходных импульсов. Изменилась ли полярность импульсов? Рассчитайте

$$K=U_{m\text{ВЫХ}}/U_{m\text{ВХ.}}$$

Сделайте вывод об области применения данного усилителя.

Установите амплитуду входных импульсов на неинвертирующем входе 0,3+0,4 В. Максимально используя рабочую площадь экрана осциллографа, оцените крутизну входных и выходных импульсов и определите скорость нарастания выходного напряжения. Посмотрите, как изменяются осциллограммы выходных импульсов при изменении амплитуды входных. Сделайте выводы.

Рассчитайте коэффициент усиления неинвертирующего усилителя.

$$K=U_{m\text{ВЫХ}}/U_{m\text{ВХ}}=1+R_0/R_B=1+R11/R5.$$

Сравните полученные результаты с предыдущими. Замените резистор R11 на R10. Как изменилась амплитуда выходных импульсов?

Восстановите в цепи ООС R11 и подайте на вход усилителя сигнал синусоидальной формы. Снимите и постройте передаточную характеристику неинвертирующего усилителя. Сделайте вывод о работе усилителя.

### 4. Исследование повторителя напряжения.

Используя КЗП, соберите схему повторителя (рис.6.13). Включите установку и произведите балансировку ОУ. Подайте на неинвертирующий вход ОУ прямоугольные импульсы амплитудой  $0,6+0,7$  В. Запомните их полярность. Подключите осциллограф к выходу усилителя, измерьте амплитуду выходных импульсов и обратите внимание на их полярность. Изменилась ли она по сравнению с полярностью входных импульсов? Измените амплитуду

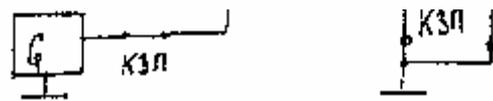
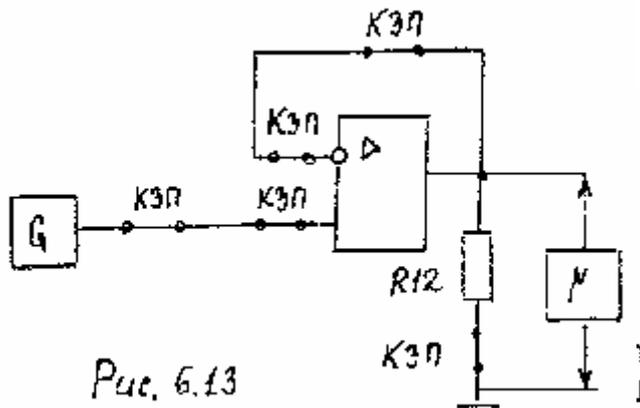


Рис. 6.12

входных импульсов. Как изменится амплитуда выходных импульсов? Рассчитайте коэффициент усиления для данной схемы.

#### Контрольные вопросы.

1. Входное и выходное напряжения схемы ОИ.
2. Чем обеспечивается положение точки покоя усилителя на ПТ?
3. Вид АЧХ операционного усилителя.
4. Какие преимущества ОУ обеспечивает его высокое входное сопротивление?
5. Какие преимущества ОУ обеспечивает его низкое выходное сопротивление?
6. К чему приводит наличие напряжения смещения при использовании ОУ в качестве усилителя?
7. Определите диапазон значений входного сигнала для работы ОУ при неискаженном усилении.
8. Из двух схем ОУ с разными значениями ООСС какая является лучшей и по какому признаку?

9. Как расширить динамический диапазон ОУ?
10. Особенности инвертирующего усилителя.
11. Особенности неинвертирующего усилителя.
12. Особенности повторителя.

## Работа № 7.

### ЭЛЕМЕНТЫ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ.

#### Цель работы.

Целью работы является экспериментальное исследование и анализ работы биполярного транзистора в режиме электронного ключа.

#### Методические указания

к выполнению лабораторной работы.

В ключевом режиме транзистор работает в импульсных и цифровых схемах. Для этих схем типичны переключения транзистора за короткое время из включенного состояния в выключенное, и наоборот. При этом токи и напряжения в транзисторе изменяются в широких пределах, так что проявляется нелинейность его характеристик.

Рассмотрим простейшую схему ключа (рис.7.1), содержащую транзистор, включенный по схеме ОЭ, и резисторы R1 и R2 в базовой и коллекторных цепях. В коллекторной цепи включен источник постоянного напряжения  $E_K$ . Статическое состояние ключа полностью описывается его выходной ВАХ (рис.7.2).

Если на вход ключа подано отрицательное напряжение  $U_{ВХ}$ , то транзистор находится в режиме отсечки, при этом  $I_K = I_{K0}$ ,  $I_B = -I_{K0}$ ,  $I_E = 0$ ,  $U_{ВЫХ} = E_K - I_{K0}R_2 \approx E_K$ ,

сопротивление транзистора  $r_{TP}^- \approx E_K / I_{K0}$  – велико. Режим отсечки

обеспечивается соблюдением соотношения:

$$(U_{\overline{BX}} - I_{K0 \max} \cdot R1) = U_{OTC} < 0,$$

где  $I_{K0 \max}$  – обратный ток коллекторного перехода при максимальной температуре рабочего диапазона температур. Обычно  $|U_{OTC}| \approx 0,2 \dots 0,4$  В и не более максимально допустимого обратного напряжения  $U_{БЭ \text{ обр. доп.}}$ .

При достаточно большом положительном напряжении  $U_{\overline{BX}}^+$  рабочая точка транзистора может оказаться в режиме насыщения. Это произойдет, если:

$$I_B^+ = \frac{U_{\overline{BX}}^+ - U_{БЭ}}{R1} \approx \frac{U_{\overline{BX}}^+}{R1} > I_{БН},$$

где  $I_{БН}$  – ток базы насыщения. При этом  $I_K = I_{КН}$  (рис.7.2),  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{КН}$ ,  $\tau_{TP}^H = U_{КН}/I_{КН}$  – мало.

Режим насыщения обеспечивается соотношением:  $I_B^+ = s I_{БН}$ , где  $s$  – степень насыщения (задается).  $I_{БН}$  можно определить графически построением нагрузочной прямой, линии насыщения  $ON$  и кривой  $ВАХ$ , исходящей из точки пересечения нагрузочной прямой и  $ON$  (т.М). Параметр этой кривой и будет искомым током  $I_{БН}$ .

$I_{БН}$  можно также найти по схеме рис. 7.1:

$$I_{БН} = \frac{I_{КН}}{\beta} = \frac{E_K}{R2 \beta},$$

где  $\beta$  – интегральный коэффициент передачи базового тока.

Итак, ключ имеет 2 статических состояния: выключен (транзистор в режиме отсечки) – ток мал, сопротивление велико, все напряжение источника питания падает на транзисторе;

включен (режим насыщения) – ток относительно велик, сопротивление транзистора мало, напряжение питания падает, в основном, на сопротивлении  $R2$ .

Помимо статических состояний ключа, которые должны быть стабильны, важными характеристиками ключа являются переходные процессы, определяющие его быстродействие.

Для изучения переходных процессов воспользуемся методом заряда. Заряд в базе

$$Q = \tau_\beta \cdot I_B,$$

где  $\tau_\beta$  – постоянная времени коэффициента  $\beta$ .

В режиме отсечки заряд в базе незначителен. При  $I_B = \text{const}$  заряд  $Q$  определяется базовым током. При  $I_B = I_{BH}$  заряд в базе достигает граничного значения  $Q_{ГР} = \tau_B I_{BH}$ . При  $Q_{изб.} = Q = Q_{ГР.}$ , а степень насыщения транзистора

$$s = \frac{I_B}{I_{BH}} = \frac{Q}{Q_{ГР}}.$$

При подаче на вход ключа скачка  $\Delta I_B$  заряд в базе и ток коллектора нарастают по экспоненте в соответствии с формулами:

$$Q(t) = \tau_B \Delta I_B (1 - \exp \frac{-t}{\tau_B}),$$

$$i_K(t) = \beta \Delta I_B (1 - \exp \frac{-t}{\tau_B}).$$

Рассмотрим переходные процессы, происходящие в транзисторном ключе при его включении (рис.7.3). От момента  $t_0$  до  $t_1$  транзистор закрыт напряжением  $U_{BX} = U_{\bar{B}}$ , при этом входной ( $i_B$ ) и выходной ( $i_K$ ) токи практически равны 0, заряд в базе ( $Q$ ) также равен 0, а выходное напряжение  $U_K = E_K$ . В момент  $t_1$  подан положительный скачок напряжения, который до  $t_2$  не изменит состояния схемы, что связано с перезарядом входной емкости транзистора ( $C_{BX}$ ). Интервал ( $t_2 - t_1$ ) называется временем подготовки и зависит от  $C_{BX}$ ,  $U_{\bar{B}}$  и  $I_B^+$ .

Стадия подготовки проявится в виде задержки выходных напряжений и тока на  $t_{\Pi}$ . С момента  $t_2$  по экспоненте изменяются  $Q$ ,  $i_K$  и  $U_K$ . Увеличение  $Q$  происходит до значения  $\tau_B I_B^+$ ,  $i_K$  до  $I_{KH}$ ,  $U_K$  снижается до  $U_{KH}$ . Изменения  $i_K$  и  $U_K$  заканчиваются в момент времени  $t_3$ , когда транзистор вошел в насыщение. На этом же заканчивается и переходной процесс, который, таким образом, состоит из 2-х стадий - времени подготовки  $t_{\Pi}$  и времени формирования отрицательного (спадающего) фронта  $t_{\bar{\Phi}P}$ .

$t_{\bar{\Phi}P}$  уменьшается при использовании транзистора с малым  $\tau_B$  (в. ч. транзистор), с увеличением  $I_B^+$  и уменьшением  $U_{\bar{B}}$ .

Рассмотрим переходные процессы, происходящие в транзисторном ключе при его включении (рис.7.4).  $t_0 - t_1$  - исходное состояние схемы (транзистор в режиме насыщения). После подачи запирающего напряжения  $U_{\bar{B}}$  базовый ток изменяет направление, однако

остается большим, пока транзистор находится в режиме насыщения (до  $t_2$ ). К моменту  $t_2$  закончится процесс рассасывания избыточных носителей в базе, транзистор войдет в активный режим, а ток коллектора и напряжение на коллекторе (выходные величины)

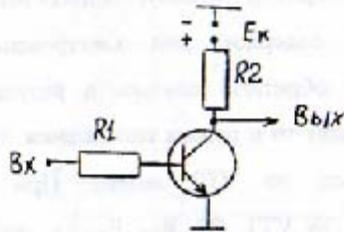


Рис. 7.1

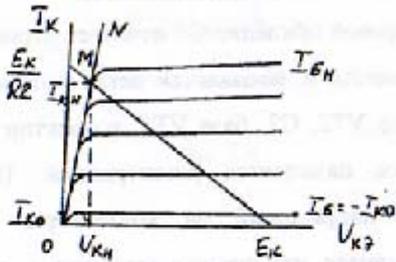
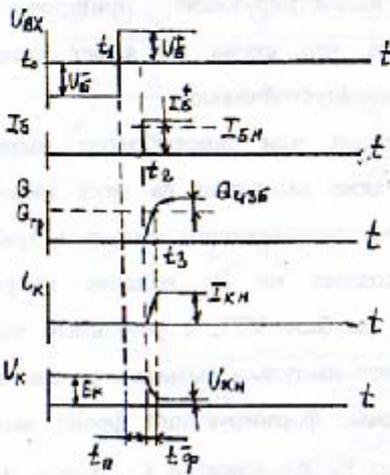


Рис. 7.2

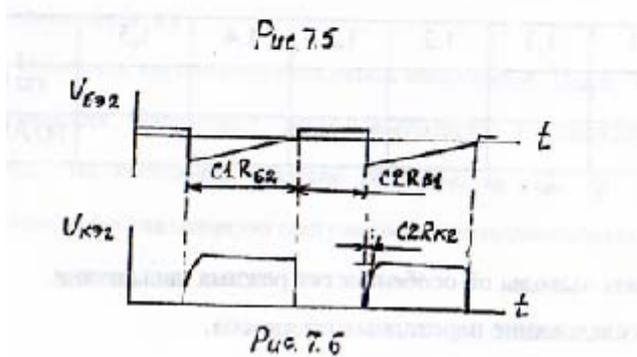
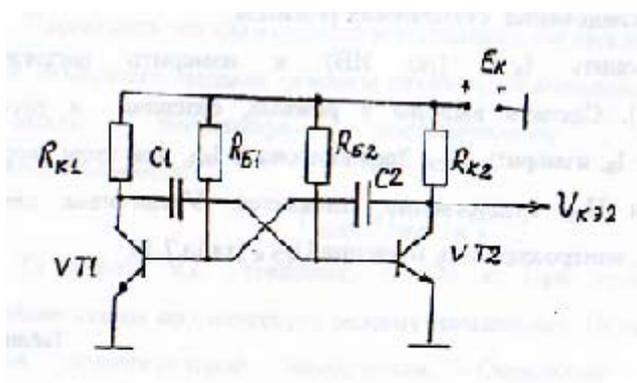
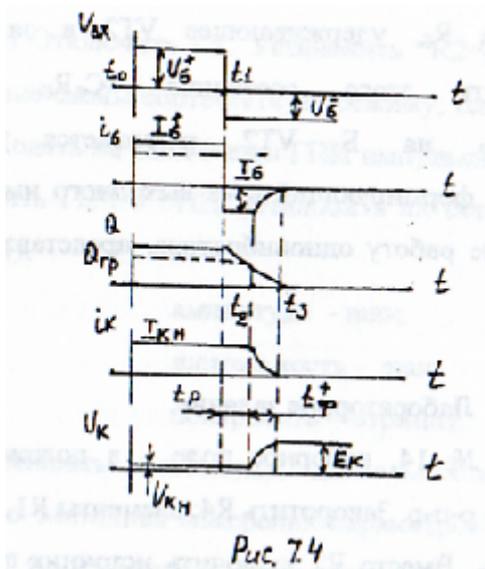


будут изменяться до значений режима отсечки ( $t_3$ ). Заряд в базе и базовый ток к моменту  $t_3$  снизятся до своих установившихся значений (практически равных 0). На этом заканчивается переходной процесс, связанный с выключением транзистора, который состоит из 2-х стадий - времени рассасывания  $t_p$  и времени формирования положительного (нарастающего) фронта  $t_{\phi}^+$ .  $t_p$  и  $t_{\phi}^+$  уменьшаются при использовании транзистора с малым  $\tau_b$ , с уменьшением  $I_B^+$  и увеличении  $U_B^-$ .

Рис. 7.3

Мультивибратор – генератор прямоугольных импульсов – представлен на рис.7.5 и содержит два электронных ключа, охваченных положительной обратной связью, в результате чего транзисторы поочередно входят то в режим насыщения, то в режим отсечки. Если VT1 открыт, то VT2 заперт. При этом C1 перезаряжается по цепи « $\perp$ , ЭК VT1, C2, R<sub>Б2</sub>, E<sub>К</sub>,  $\perp$ », поддерживая VT2 закрытым; C2 перезаряжается по цепи « $\perp$ , ЭБ VT1, C2, R<sub>К2</sub>, E<sub>К</sub>,  $\perp$ ». После того, как на правой обкладке C1 исчезнет отрицательное напряжение, VT2 открывается и замыкается петля положительной обратной связи: коллектор VT2, C2, база VT1, коллектор VT1, C1, база VT2. Этот процесс называется регенерацией. Проследив направление изменений напряжений на коллекторах и базах транзисторов, следует убедиться, что процесс закончится сменой их состояний: VT1 закрывается, VT2 открывается. Далее опять перезаряжаются конденсаторы, что приводит к следующему замыканию петли положительной обратной связи. На рис.7.6 представлены эпюры, иллюстрирующие принцип работы мультивибратора. Очевидно, что схема не имеет устойчивых состояний. Оба состояния квазиустойчивые.

Ждущий мультивибратор, или одновибратор, имеет одно устойчивое состояние и также выполнен на двух электронных ключах (рис.7.7). До подачи запускающего импульса транзистор VT2 открыт. Его ток создает на R<sub>Э</sub> падение напряжения, превышающее напряжение на базе VT1, в результате чего VT1 закрыт. Приход запускающего импульса вызывает регенеративный процесс переключения схемы, формирующий фронт выходного импульса. Заряженный ~ до E<sub>К</sub> конденсатор C<sub>Б</sub> теперь начинает перезаряжаться по цепи « $\perp$ - R<sub>Э</sub>-ЭК VT1, C<sub>Б</sub>, R<sub>Б</sub>». Его ток создает



падение напряжения на  $R_B$ , удерживающее  $VT_2$  в закрытом состоянии. Длительность этого состояния  $\sim C_B R_B$ . После исчезновения «минуса» на Б  $VT_2$  развивается второй регенеративный процесс, формирующий срез выходного импульса. Эпюры, иллюстрирующие работу одновибратора, представлены на рис.7.8.

#### Лабораторное задание.

Установить плату № 14, наборное поле – в положение 1. Исследуемый транзистор р-п-р. Закоротить  $R_4$ ; элементы  $R_1, R_2, C_2, C_3, C_4$  не устанавливать. Вместо  $R_2$  включить

источник тока ГТ. Установить  $R_k(R3)=620 \text{ Ом}$ ,  $C1=0,1 \text{ мкф}$ . Подать питающее напряжение  $E_k(Ec)=-10 \text{ В}$ .

1. Исследование статических режимов.

Установить  $I_B=0$  (по ИВ) и измерить напряжение  $U_{KЭ}(ABM-1)$ . Сделать выводы о режиме, близком к отсечке. Увеличивая  $I_B$ , измерять  $U_{KЭ}$ . Зафиксировать  $I_{БН}$ , при этом скорость уменьшения  $U_{KЭ}$  существенно снижается. Увеличивая степень насыщения, контролировать значения  $U_{KЭН}$  (табл.7.1).

Таблица 7.1

S	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	
$I_B, \text{ мА}$							по U В
$U_{KЭ}, \text{ В}$							по АВМ-1

Сделать выводы об особенностях режима насыщения.

2. Исследование переходных процессов.

а) Отключить ГТ. Установить  $R2=33 \text{ к}$ . При этом исходное состояние схемы соответствует режиму, близкому к отсечке.

Подать на вход схемы ГПИ импульсный сигнал с параметрами (включить ГНЧ и ГПИ, установить их переключатели в положение 100 кГц):

амплитуда - max;

длительность – max;

полярность – отрицат.

Измерить амплитуду, длительность и период входных сигналов. Методика измерения параметров импульсов представлена на рис.7.9. Измерить параметры выходных импульсов:  $U_{ВЫХ}$ , длительность  $t_{И}$  | длительности фронтов  $t_{\Phi}^+$ ,  $t_{\Phi}^-$ , период T, полярность.

Нарисовать эпюры входного и выходного сигналов. Указать на эпюре выходного сигнала режимы отсечки, насыщения, активный. Рассчитать постоянную составляющую импульсной последовательности:

$$U_{\text{ВЫХ}}=U_{\text{ВЫХ}} \cdot t_{\text{и}}/T.$$

б) Убрать R2, установить R1=20 к. При этом исходное состояние схемы соответствует режиму насыщения. Подать входной сигнал положительной полярности. Остальные параметры соответствуют п. а)

Измерить параметры выходных импульсов:  $U_{\text{ВЫХ}}$ ,  $t_{\text{и}}$ ,  $t_{\phi}^+$ ,  $t_{\phi}^-$ , T, полярность. Нарисовать эпюры выходного и входного сигналов. Указать на выходном сигнале режимы,  $t_{\text{и}}$ ,  $t_{\phi}^+$ ,  $t_{\phi}^-$ . Рассчитать постоянную составляющую импульсной последовательности.

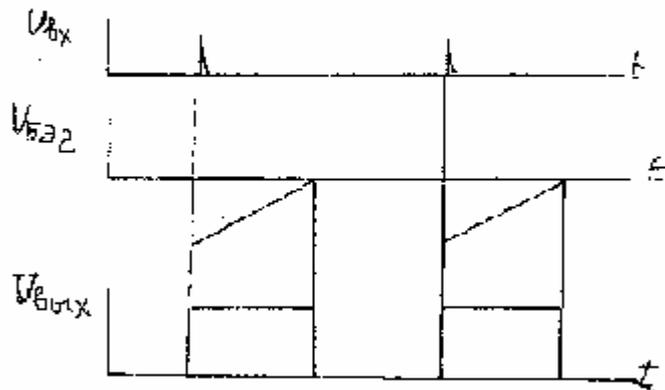
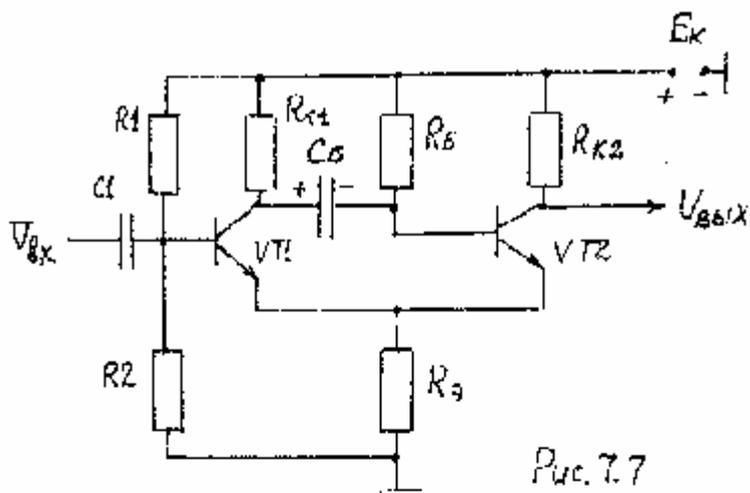


Рис. 7.8

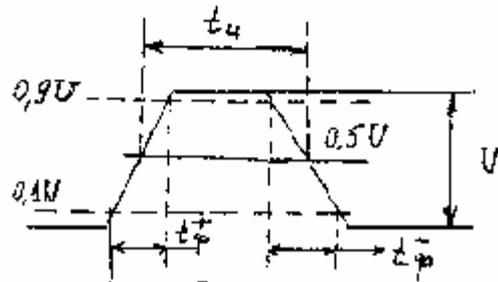


Рис. 7.9

### Контрольные вопросы.

1. Как обеспечить практически режим отсечки?
2. Какими свойствами обладает транзистор в режиме отсечки?
3. Как обеспечить практически режим насыщения с заданной степенью насыщения?
4. Какими свойствами обладает транзистор в режиме насыщения?
5. Каковы статические состояния электронного ключа?
6. Особенности переходного процесса при включении ключа.
7. Особенности переходного процесса при выключении ключа.

8. Объяснить эюры при положительном входном сигнале.
9. Объяснить эюры при отрицательном входном сигнале.

#### Литература

1. Е.И.Манаев, Основы радиоэлектроники. М. Радио и связь, 1990
2. М.А.Аваев, Г.Г.Шишкин. Электронные приборы. М. МАИ, 1996

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е.И.Манаев. Основы радиоэлектроники. М.: Радиои связь, 1990.
2. М.А.Аваев, Г.Г.Шишкин. Электронные приборы. М.: МАИ, 1996.

#### СОДЕРЖАНИЕ

	С.
1. Работа № 6. Усилители электрических сигналов.....	3
2. Работа № 7. Элементы импульсных устройств.....	21