

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И  
ИННОВАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

## **МИКРОСХЕМОТЕХНИКА**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ  
РАБОТАМ  
(ЧАСТЬ I)**

**Ташкент – 2023**

УДК 621.314

Абдурахмонов Б.А., Умарходжаева З.Н., Уралбаев Х.  
Микросхемотехника. Методические указания к лабораторным  
работам (Часть I). – Т.:ТашГТУ, 2023. –60 с

Методические указания включают в себя лабораторные работы по всем основным разделам, изучаемым в курсе “Микросхемотехника”. Работа предназначена для студентов направлений “Электроника и приборостроение (электроника в промышленности)” и “Лазерно-световые технологии и оптоэлектроника”.

*Печатается по решению научно-методического совета  
Ташкентского государственного технического университета.  
Протокол № 5 от 30 марта 2023 года*

Рецензенты: доц., к.ф.-м.н. Комилов Ш.Х. (НУУз);  
проф., д.т.н. Алимова Н.Б. (ТашГТУ)

## **Введение**

Помимо лекций важную роль в подготовке технических специалистов играют лабораторные занятия.

В лаборатории проводятся эксперименты для получения результатов, важных для успешного освоения студентами учебной программы. В ходе выполнения лабораторных работ студенты учатся применять теоретические знания, полученные в лекциях на практике. А также смогут сравнить результаты лабораторных работ с теоретическими результатами.

Эти указания основаны на учебном плане “Электроника и приборостроение (электроника в промышленности)” и включают в себя: теоретическую часть, описание лабораторного стенда, программу работ и методические указания для выполнения лабораторных работ, а также содержание отчёта и контрольные вопросы для сдачи лабораторных работ.

В работе включены 8 лабораторных занятий, студенты изучают амплитудные характеристики усилителей и их параметры, принцип работы усилителей и мультивибратора на биполярных и полевых транзисторах, интеграторов, компараторов, схемы на основе операционных усилителей.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКАСКАДНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

**Цель работы:** Исследование одиночных каскадов усиления на транзисторах, включенных по схеме: 1) с общим эмиттером (ОЭ), 2) с общим коллектором (ОК)

### Теоретическая часть

Схема усилительного каскада приведена на рис.1.1. Основными элементами схемы являются источник питания  $E_k$ , управляемый элемент-транзистор  $T$  и резистор  $R_k$ . Эти элементы образуют главную цепь усилительного каскада, в которой за счёт протекания управляемого по цепи базы коллекторного тока создаётся усиленное переменное напряжение на выходе схемы. Остальные элементы каскада выполняют вспомогательную роль. Конденсаторы  $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$  являются разделительными. Конденсаторы  $C_{p1}$  исключают шунтирование входной цепи каскада цепью источника входного сигнала по постоянному току, что позволяет, во-первых, исключить протекание постоянного тока через источник входного сигнала по цепи  $E_k-R_1-R_r$  и, во-вторых, обеспечить независимость от внутреннего сопротивления этого источника  $R_r$  напряжения на базе  $U_{бп}$  в режиме покоя. Функция конденсатора  $C_{p2}$  сводится к пропусканию в цепь нагрузки переменной составляющей напряжения и задержанию постоянной составляющей.

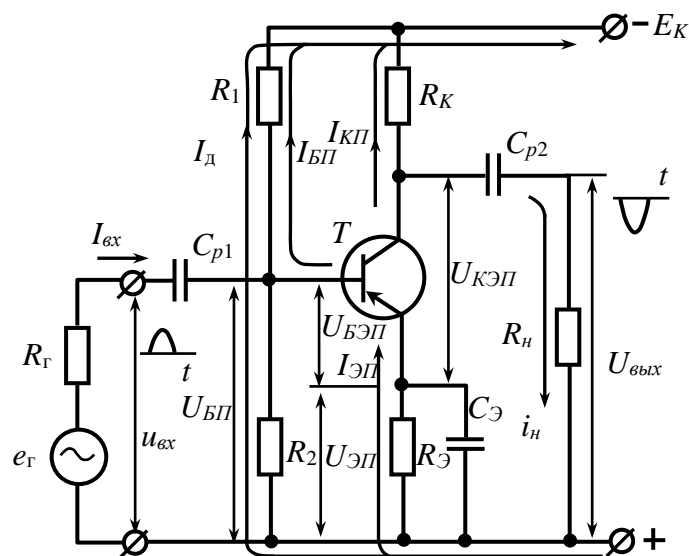


Рис. 1.1. Схема однокаскадного усилителя с ОЭ

Резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  используют для задания режима покоя каскада. Поскольку биполярный транзистор управляется током, ток покоя управляемого элемента (в заданном случае ток  $I_{кп}$ ) создаётся заданием соответствующей величины тока базы покоя  $I_{бп}$ . Резистор  $R_1$  предназначен для создания цепи протекания тока  $I_{бп}$  совместно с  $R_2$  резистор  $R_1$  обеспечивает исходное напряжение на базе  $U_{бп}$  относительно зажима “+” источника питания.

Резистор  $R_3$  является элементом отрицательной обратной связи, предназначенным для стабилизации режима покоя каскада при изменении температуры конденсатор  $C_3$  шунтирует резистор  $R_3$  по переменному току, исключая, тем самым проявление отрицательной обратной связи в каскаде по переменным составляющим. Конденсатора  $C_3$  привело бы к уменьшению коэффициентов усиления схемы.

В схеме включения транзистора с общим эмиттером усилитель обеспечивает усиление по напряжению, по току, по мощности. Такой усилитель имеет средние значения входного и выходного сопротивления по сравнению со схемами включения с общей базой и общим коллектором.

В режиме покоя, т.е. при отсутствии входного сигнала ( $U_{вх}=0$ ), постоянный ток  $I_{Б0}$  под действием  $E_K$  проходит по цепи  $+E_K$ -Э-Б- $R_B$ - $E_K$ . Величина этого тока подбором значений  $R_B$  задается такой, чтобы транзистор был полуоткрыт, т.е. напряжение на нем составляло бы примерно половину  $E_K$ . В свою очередь, при большом токе базы транзистор полностью открывается, т.е. его сопротивление между эмиттером и коллектором очень мало, напряжение  $U_{ЭК}$  почти нулевое, а при  $I_B = 0$  транзистор полностью закрыт, т.е. сопротивление велико и он практически не пропускает ток  $I_K$ .

Конденсатор  $C_{p1}$  служит для включения источника переменной входной ЭДС  $E_{вх}$ , с внутренним сопротивлением  $R_{вх}$  в цепь базы. Конденсатор связи  $C_{p2}$  служит для выделения на нагрузке  $R_H$  переменной составляющей коллекторного напряжения.

Название схемы “с общим эмиттером” означает, что вывод эмиттера транзистора по переменному току является общим для входной и выходной цепи каскада.

Анализ каскада по постоянному току проводят графоаналитическим методом, основанным на использовании графических построений и расчётных соотношений. Графические построения проводятся с помощью выходных (коллекторных)

характеристик транзистора (рис.1.2, а). Удобство метода заключается в наглядности нахождения связи параметров режима покоя каскада ( $U_{кэп}$  и  $I_{кп}$ ) с амплитудными значениями его переменных составляющих (выходного напряжения  $U_{выхм}$  и тока  $I_{км}$ ), являющимися исходными при расчёте каскада.

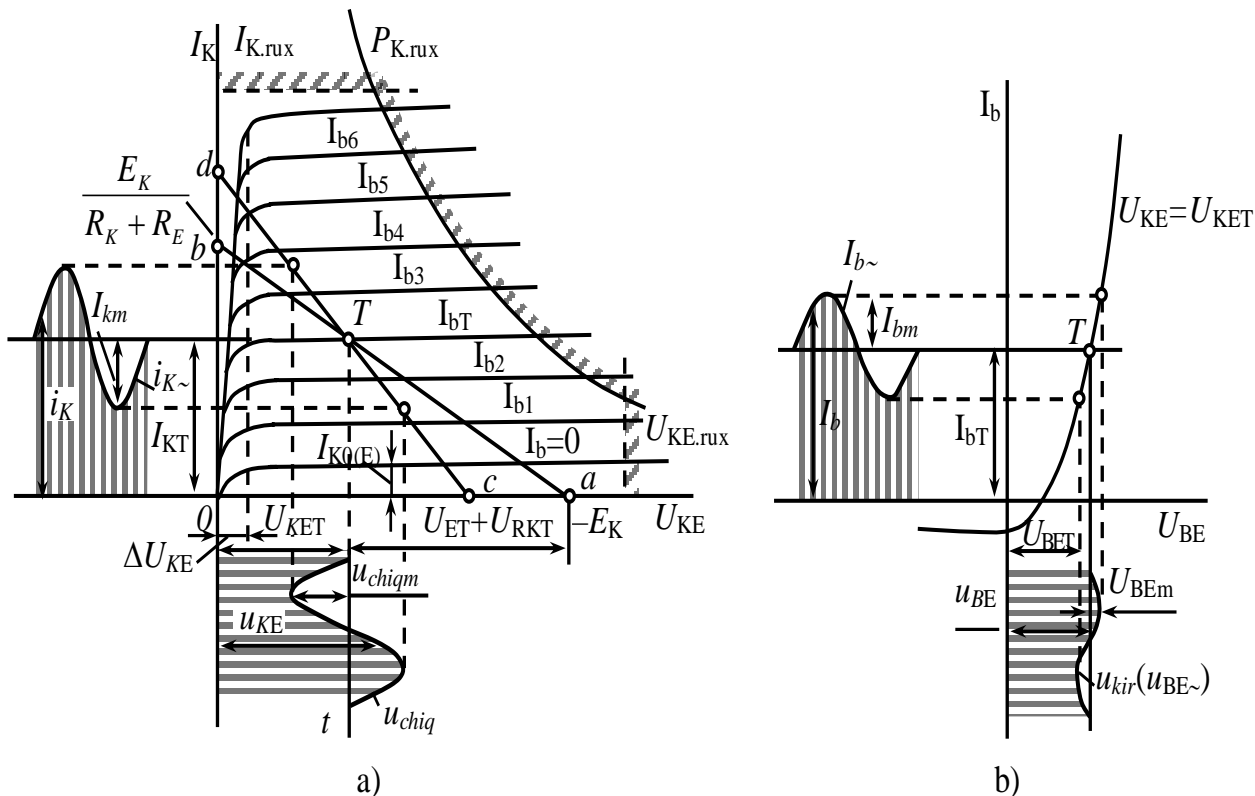


Рис.1.2. Графическое определение режима покоя каскада ОЭ на коллекторных (а) и базовых (б) характеристиках транзистора

Как было показано выше, во избежание нелинейных искажений в усилителе необходимо подавать напряжение смещения, для обеспечения требуемого тока смещения. Этот ток смещения может быть создан различными способами. Простейшим способом подачи смещения в транзисторном каскаде является фиксированное смещение.

### Описание лабораторного стенда

Питание на стенд подается включением В1. Стенд состоит из генератора синусоидальных сигналов в диапазоне 0,02-20 кГц с переключателем частоты на три поддиапазона В2 , с ручкой плавного изменения частоты П1, с гнездами Гн (1:1) , Гн (1:10), для ступенчатого переключения напряжения выходного сигнала генератора и ручкой выход "Выход " (П2) для плавного изменения напряжения сигнала.

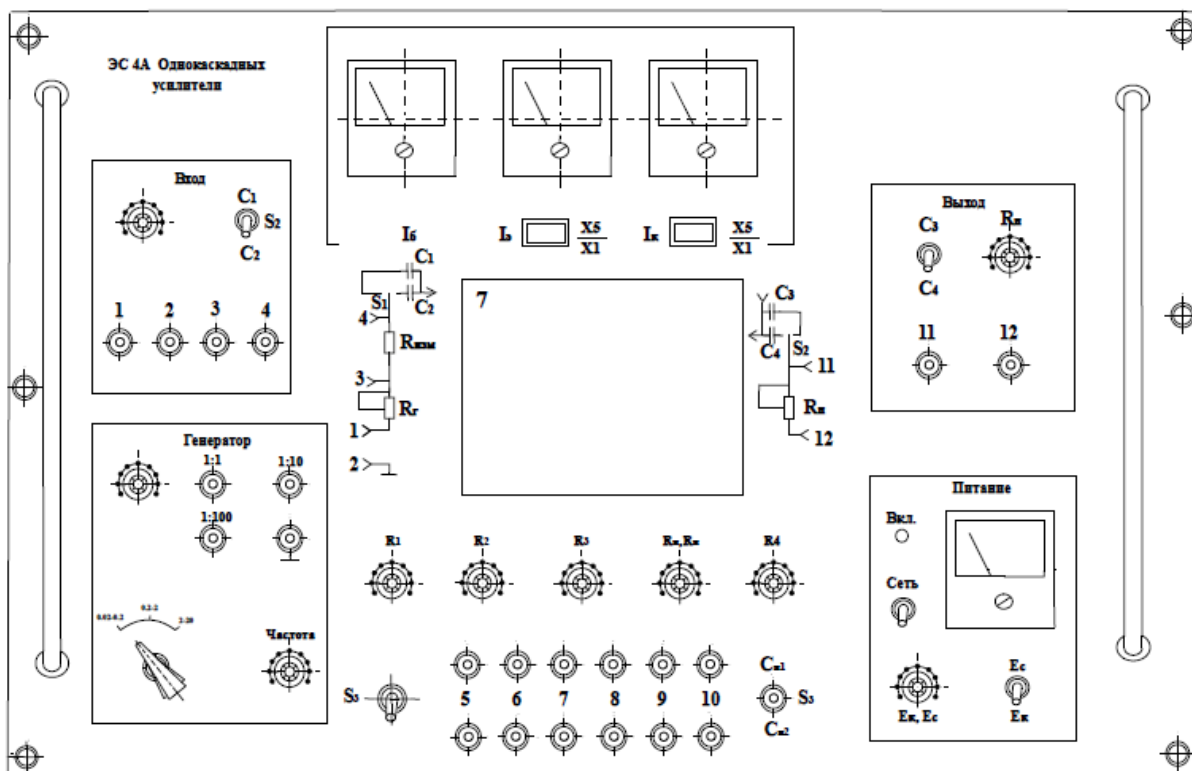


Рис. 1.3. Вид лабораторного стенда

Входом усилительного каскада являются гнезда Гн1, Гн2. Ручка ПЗ потенциометра R2 служит для изменения внутреннего сопротивления генератора сигнала, контактные гнезда Гн3 и Гн4 для просмотра осциллограмм входного сигнала. Переключатель S1 служит для подачи сигнала на вход исследуемой системы через соответствующую емкость  $C_1$  или  $C_2$ . Резьбовые отверстия Ф1 и Ф2 сделаны для укрепления панелек с разными схемами включения транзисторов 1-ОЭ, 2-ОК, 3- ОБ к лабораторному стенду. Переключатель S2 подключает нагрузку к каскаду через один из разделительных конденсаторов  $C_3$  и  $C_4$ . Потенциометром Rн изменяется величина сопротивления нагрузки, к гнездам Гн 11 и Гн12 подключается вольтметр для измерения выходного сигнала. Ручками R<sub>д1</sub> и R<sub>д2</sub> обеспечивается нужный режим покоя транзистора, изменяя плечи делителя напряжения и изменяя сопротивление в цепи коллектора ручкой потенциометра R<sub>к</sub>. Выключатель S3 служит для обеспечения смещения напряжения базы фиксированным током базы (выключенное состояние - вниз). Сопротивление R<sub>з</sub> служит для стабилизации режима покоя. Переключатель S4 изменяет величину емкости конденсатора, шунтирующего сопротивление R<sub>з</sub> по переменному току. Питание от источника постоянного тока подается переключателем S5 (положение E<sub>к</sub> для биполярных транзисторов) и величина напряжения устанавливается ручкой потенциометра E<sub>к</sub>.

Значение  $E_k$  фиксируется вольтметром. Гнезда 5,6,7,8,9,10 выведены на панель для измерения напряжения в характерных точках схемы усилителей. Миллиамперметр А1 (16), А2 (Iэ), А3 (Iк) включены в цепь для измерения соответственного тока базы, эмиттера, коллектора с выбором масштаба шкалы кнопкой X5/X1 (в каждом значении тока соответствует шкале прибора).

Установка содержит три схемы усилительных каскадов: 1 - схема с ОЭ, 2-схема с ОК, 3-схема с ОБ. Каждая из схем съемная и подключается в стенде при установлении панели с соответствующей схемой.

### Программа работ

1. Снять и построить амплитудную характеристику (АХ) для каскада ОЭ.
2. По осциллограмме выходного сигнала определить  $U_{вх}$ , с которого начинается искажение выходного сигнала.
3. Определить  $K_u$  каскада ОЭ.
4. Определить влияние  $R_n$  и  $R_d$  на  $K_u$  каскада ОЭ.

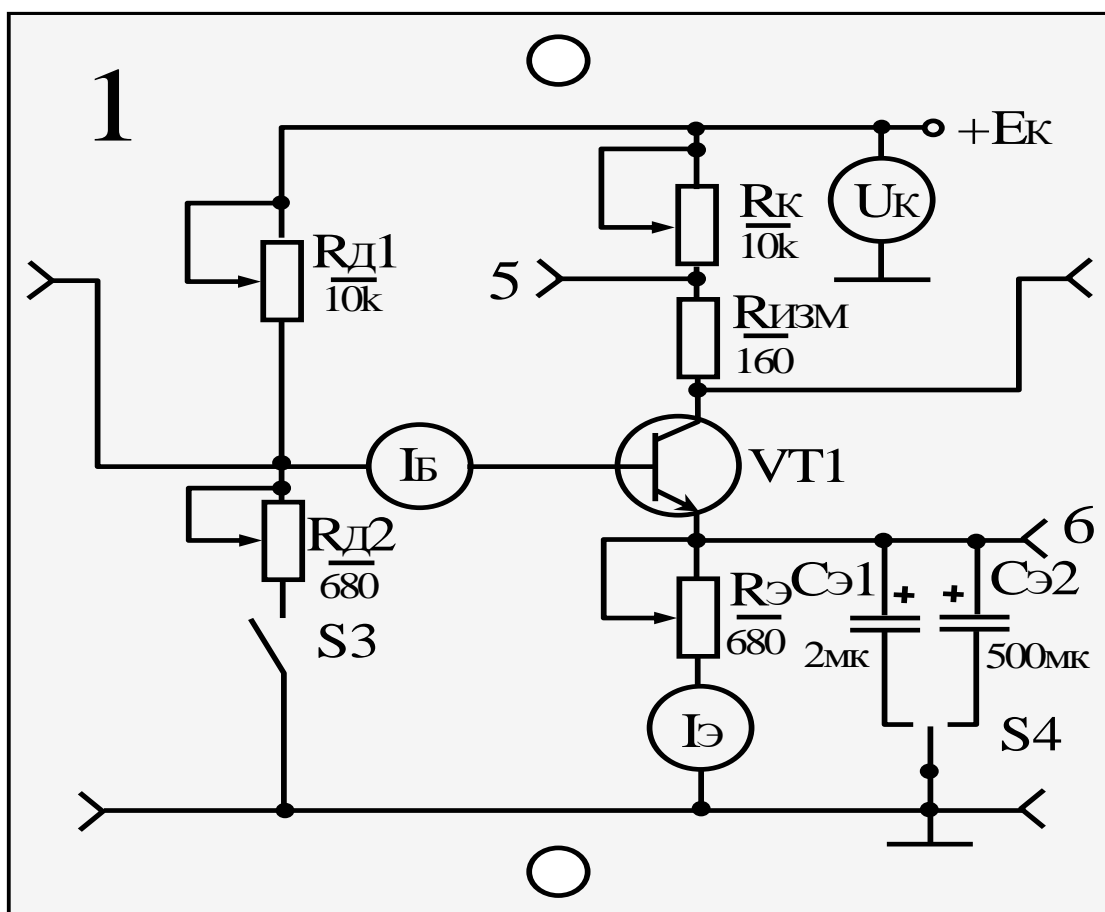


Рис.1.4. Схема с ОЭ



## Методические указания

### Для каскада с ОЭ

1. Установить на стенде панельку 1 со схемой ОЭ и укрепить болтами.
2. Соединить блок генератора со входом усилителя, после чего кабелем соединить контактные гнезда Гн (1:1) с Гн(1).
3. Кабель первого вольтметра В7-26 подсоединить к гнездам Гн (1:10) и заземление (вход усилителя).
4. Кабель второго вольтметра В7-26 подсоединить к гнездам Гн11 и Гн12 (выхода усилителя).
5. Осциллограф подключить к гнездам Гн10 и заземление.
6. Включить питание стенда выключателем ("сеть").
7. Включить с помощью  $S3$ ,  $R_{д12}$ . Сопротивлениями  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$  установить режим не искаженного выходного сигнала в возможном диапазоне изменения входного напряжения. Снять и построить АХ усилителя  $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{вх}})$  и для линейного участка характеристики определить  $K_u$ .
8. Снять и построить АХ усилителя  $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{вх}})$  при тех же значениях параметров элементов схемы, но с другой величиной сопротивления  $R_n$ .

### Для каскада с ОК

1. Установить на стенде панельку со схемой ОК (рис.1.3.) и укрепить болтами.
2. Соединить блок генератора со входом усилителя, для чего кабелем соединить контактные гнезда Гн (1:1) с Гн (1).
3. Кабель первого вольтметра В7-26 подсоединить к гнездам Гн (1:10) и заземление (вход усилителя).
4. Кабель второго вольтметра В7-26 подсоединить к гнездам Гн11 и Гн12 (выхода усилителя).
5. Осциллограф подключить к гнездам Гн10 и заземление.
6. Включить питание стенда выключателем ("сеть").
7. Включить с помощью  $S3$ ,  $R_{д12}$ . Сопротивлениями  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$  установить режим неискаженного выходного сигнала в возможном диапазоне изменения входного напряжения.

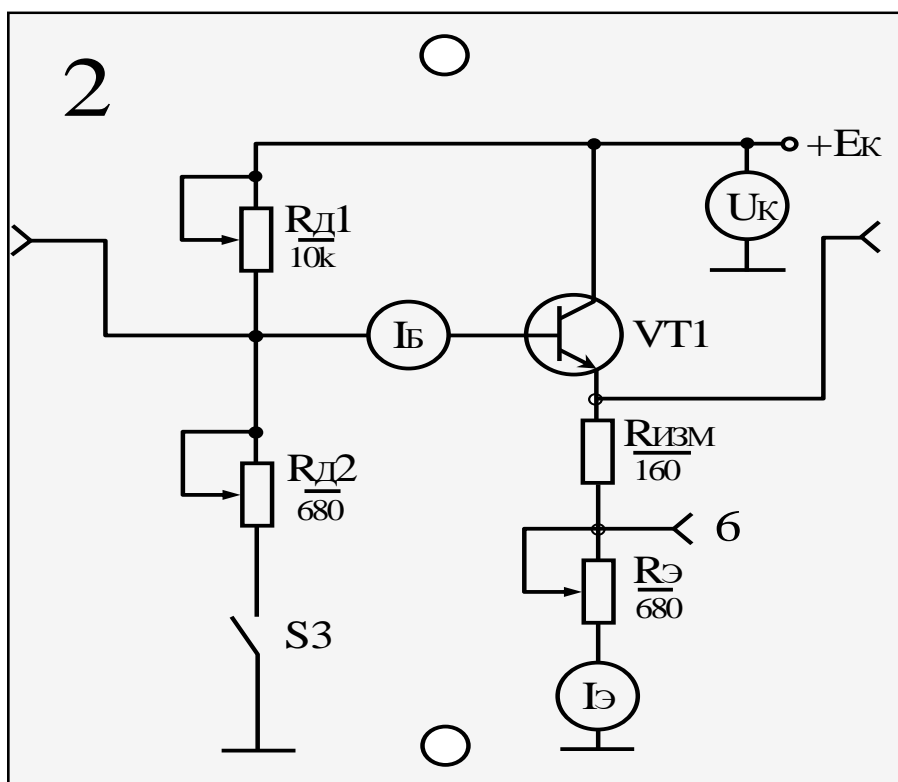


Рис.1.5. Схема с ОК

### Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Описание лабораторной работы, содержащей следующие разделы:
  - Цель выполняемой работы
  - Описание работы, проделанной в соответствии с разделом «Программа работы»
  - Схема исследуемого усилителя
  - График АХ и определенные по графикам значения  $K_u$
  - Справочные данные и характеристики транзистора КТ808А
  - Вывод по сделанной работе
  - Вопросы к защите работы

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение устройства - усилителя
2. На какие классы делятся усилители?
3. Какие схемы подключения транзистора в усилителе вы знаете?
4. Какие типы транзисторов используются в усилителях?
5. Какие составляющие напряжения, кроме переменной, имеются в схеме?

6. Объясните назначение элементов, используемых в усилителе.
7. Какое влияние оказывает на характеристики усилителя с каскадом ОЭ уменьшение  $K_u$ ?
8. Проведите сравнительные оценки схем включения ОЭ, ОБ.
9. Объясните стабилизирующее действие цепочки эмиттерной стабилизации в каскаде усилителя.
10. Сделайте анализ каскада по передаче переменного и постоянного токов.
11. Расскажите о путях увеличения  $K_u$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКАСКАДНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

**Цель работы:** Исследование одиночных каскадов усиления на транзисторах, включенных по схеме; с общим истоком (ОИ) и с общим стоком (ОС)

### Теоретическая часть

Принцип построения усилительных каскадов на полевых транзисторах тот же, что и каскадов на биполярных транзисторах. Особенность заключается в том, что полевой транзистор управляется по входной цепи напряжением, а не током. По этой причине задание режима покоя в каскадах на полевых транзисторах осуществляется подачей во входную цепь каскада постоянного напряжения соответствующей величины и полярности. Этой особенности уделяется главное внимание при анализе каскадов на полевых транзисторах по постоянному току. Каскад с **О.И.** является каскадом предварительного усиления в многокаскадном усилителе. Он выполняет функции усилителя напряжения. Схема усилительного каскада **О.И.** приведена на рис.2.1

Каскад выполнен на МДП-транзисторе со встроенным каналом p-типа, работа которого возможна как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения. Основными элементами каскада являются:  $+E_c$ , транзистор и резистор  $R_c$ . Нагрузка подключена через разделительный конденсатор  $C_{p2}$  к стоку транзистора.

Элементы  $R_3$ ,  $R_1$  и  $R_u$  предназначены для задания  $U_{зип}$  в режиме покоя. Резистор  $R_u$  создает в каскаде **О.О.С.** по постоянному току, служащего для стабилизации режима покоя при изменении

температуры и разбросе параметров транзистора. Конденсатор  $C_u$  – для исключения **О.О.С.** по переменному току.

3. Определить  $K_u$  каскада ОИ. 4. Определить влияние  $R_H$  и  $R_D$  на  $K_u$  каскада ОИ.

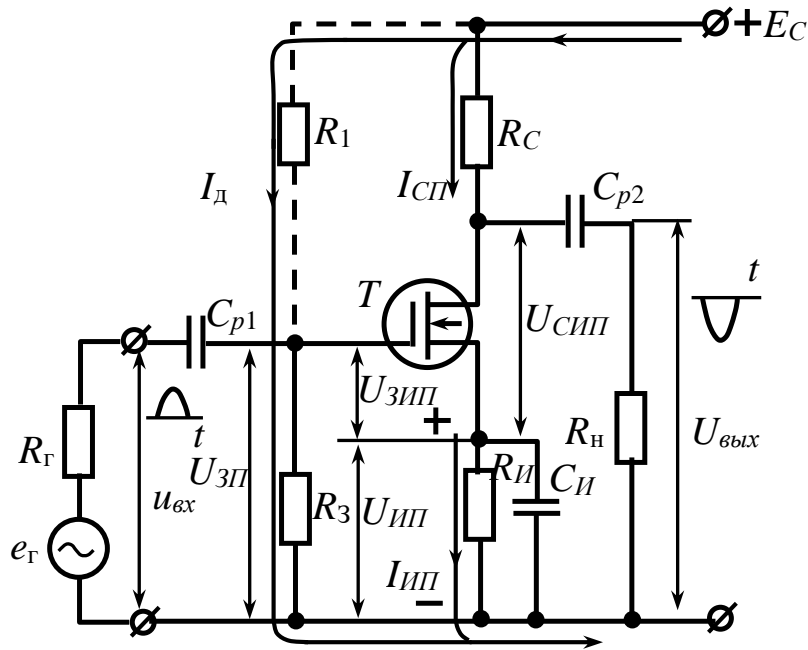


Рис.2.1. Схема усилительного каскада ОИ

Разделительный конденсатор  $C_{p1}$  обеспечивает связь каскада с источником входного сигнала. Принцип выбора режима покоя тот же, что и для схемы на биполярном транзисторе (рис.2.2). Соотношения, используемые при выборе режима покоя, можно записать в следующем виде:

$$U_{СИП} > U_{ВЫХМ} + \Delta U_{СИ}, \quad (1.1)$$

$$I_{СП} > I_{СМ}.$$

Точка П размещается на линии нагрузки по постоянному току, которая проходит через точки **а** и **б**. Для точки **а**  $I_c=0$ ,  $U_{СИ}=+E_c$ ; для точки **б**  $U_{СИ}=0$ ,  $I_c=E_c/(R_c+R_u)$ .

Линия нагрузки по переменному току определяется сопротивлением  $R_H = R_c || R_H$ . В многокаскадных усилителях нагрузкой каскада является входная цепь последующего каскада, обладающая достаточно высоким входным сопротивлением  $R_{ВХ}$ . В таких случаях нагрузка каскада по переменному току в значительной степени определяется сопротивлением  $R_c$ , выбираемым, по меньшей мере, на порядок меньше  $R_{ВХ}$ . По этой причине для каскадов предварительного усиления наклон линии нагрузки по переменному току (в-г) незначительно отличается от линии нагрузки по постоянному току.

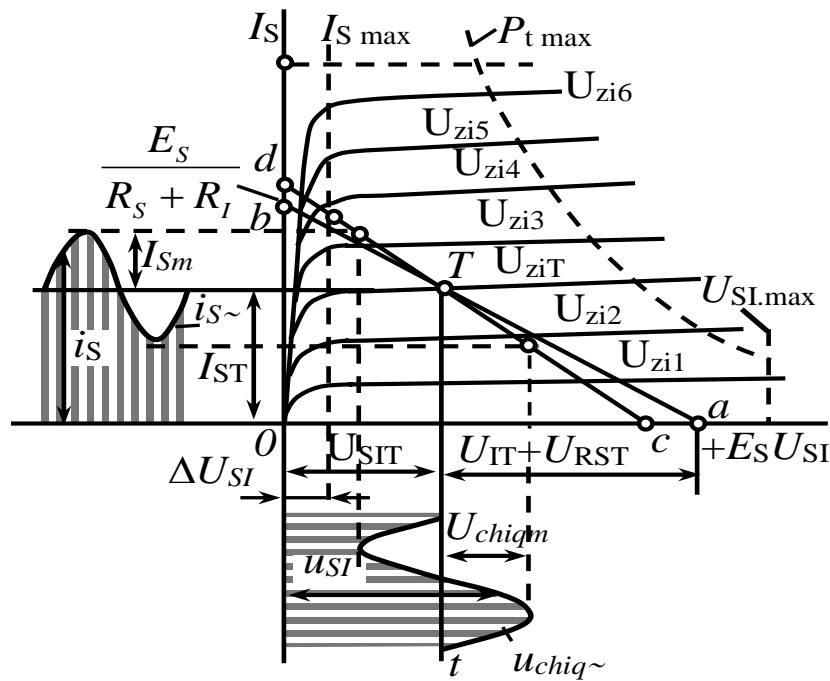


Рис.2.2 Графическое определение режима покоя каскада ОИ на выходных характеристиках транзистора

Рассмотрим осуществление требуемого смещения ( $U_{\text{сип}}$ ,  $I_{\text{сп}}$ ). Ток стока покоя  $I_{\text{сп}}$  и напряжение сток-исток покоя  $U_{\text{сип}}$  связаны соотношением

$$U_{\text{сип}} = E_c - I_{\text{сп}}(R_c + R_u) \quad (1.2)$$

и определяется напряжением затвор-исток транзистора  $U_{\text{зип}}$ , соответствующим точке покоя. Известно, что полевой транзистор со встроенным каналом может работать как в режиме обогащения канала носителями заряда, так и в режиме обеднения. Поэтому полному диапазону выходных характеристик этого транзистора соответствует напряжение затвор-исток, изменяемое не только по величине, но и по знаку. По указанной причине в режиме покоя напряжение на затворе может иметь как положительную, так и отрицательную полярность относительно истока и даже быть равным нулю. Рассмотрим случай, когда  $U_{\text{зип}} < 0$ , как наиболее типичный для каскада с О.И. Элементами, предназначенными для создания напряжения  $U_{\text{зип}} < 0$  в режиме покоя, являются только резисторы  $R_{\text{и}}$  и  $R_{\text{з}}$ , резистор  $R_1$  не нужен. Необходимые величины и полярность напряжения получаются на резисторе  $R_{\text{и}}$  в результате протекания через него тока  $I_{\text{ип}} = I_{\text{сп}}$ . В связи с этим выбор  $R_{\text{и}}$  производят по величине

$$R_H = \frac{U_{зип}}{I_{сн}}. \quad (1.3)$$

Резистор  $R_3$  предназначен для обеспечения потенциала затвора равным потенциалу нижнего вывода резистора  $R_H$ , т.е. для подачи напряжения  $U_{зип}$  с резистора  $R_H$  между затвором и истоком транзистора. Сопротивление  $R_3$  выбирают на несколько порядков меньше входного сопротивления транзистора. Это необходимо для исключения влияния температурной нестабильности и разброса значения входного сопротивления транзисторов на величину входного сопротивления каскада.  $R_3$  принимают равным 1-2 Мом. Помимо обеспечения требуемого смещения  $U_{зип}$  сопротивление  $R_H$  создает О.О.С. в каскаде, препятствующую изменению тока  $I_{сн}$  тока под действием температуры и разброса параметров транзистора. Тем самым функция  $R_H$  сводится также к стабилизации режима покоя каскада. С целью повышения стабильности часто идут на увеличение  $R_H$  сверх значения, нужного для обеспечения напряжения  $U_{зип}$ . Требуемая при этом компенсация избыточного напряжения  $U_{зип}$  осуществляется подачей на затвор соответствующего  $U_{зп}$  путем включения в схему резистора  $R_1$ , которое определяется из условия указанной компенсации соотношением:

$$U_{зип} = U_{ун} - U_{зн} = I_{сн} R_H - E_c \frac{R_3}{R_3 + R_1}, \quad (1.4)$$

$$R_1 = \frac{E_c R_3}{U_{ун} - U_{зип}}. \quad (1.5)$$

Величину  $U_{зп}$  определяют с учетом выбора напряжения питания

$$E_c = U_{снм} + U_{ун} + I_{сн} R_c. \quad (1.6)$$

Величина  $R_c$  оказывает влияние на частотные свойства каскада; ее рассчитывают исходя из верхней частоты диапазона. С точки зрения расширения частотного диапазона сопротивление  $R_c$  желательно уменьшать. Приняв в качестве известной величину внутреннего сопротивления транзистора  $r_i$ , получим оценку возможных значений  $R_c : R_c = (0,05 \div 0,15) r_i$ . Повышение напряжения  $U_{зп}$  благоприятно сказывается на стабильности точки покоя вследствие увеличения сопротивления  $R_H$ , однако, при этом возрастает требуемое напряжение источника питания  $E_c$ . В связи с указанным напряжением  $U_{зп}$  выбирают порядка  $(0,1 \div 0,3) E_c$ ,

$$E_c = \frac{U_{cn} + I_{cn} R_c}{0,7 \div 0,9}. \quad (1.7)$$

При  $U_{зип} \geq 0$  необходимость включения резистора  $R_{и}$  диктуется требованием стабилизации режима покоя. Включение  $R_1$  здесь обязательно. Выбор элементов производится с использованием соотношений (4 ÷ 6). При этом в выражениях (4, 5) следует брать  $U_{зип}$  либо равным нулю, либо изменить знак перед  $U_{зип}$ . Режим  $U_{зип} > 0$  является типичным для полевых транзисторов с индуцированным каналом. Поэтому с учетом изменения знака перед  $U_{зип}$  соотношения (4), (5) используют для расчета цепей смещения каскада **ОИ** на этих транзисторах. Выбор типа транзистора производится с учетом тех же данных, что и в каскаде **ОЭ**, т.е. по  $I_{сmax}$ ,  $U_{сmax}$ ,  $P_{max}$ .

### Программа работ

1. Снять и построить амплитудную характеристику (АХ) для каскада ОИ.
2. По осциллограмме выходного сигнала определить  $U_{вх}$ , с которого начинаются искажения выходного сигнала.

### Методические указания

1. Установить на стенде панельку со схемой ОИ и укрепить болтами.
2. Соединить блок генератора со входом усилителя, для чего кабелем соединить контактные гнезда Гн (1:1) с Гн (1).
3. Кабель первого вольтметра В7-26 подсоединить к гнездам Гн(1:10) и заземление (вход усилителя).
4. Кабель второго вольтметра В7-26 подсоединить к гнездам Гн11 и Гн12 (выхода усилителя).
5. Осциллограф подключить к гнездам Гн10 и заземление.
6. Переключить ВЗ положение Ес
7. Включить питание стенда выключателем В1 («сеть»).
8. Снять и построить АХ каскада с ОИ,  $U_{вых} = f(U_{вх})$ , установив значение элементов схемы, заданные преподавателем. Изменяя значение входного сигнала ручкой П2 записать величину входного и выходного сигналов по показаниям вольтметров в 6-8 точках. По осциллограмме отметить значение входного сигнала, с которого начинается его искажение, и зарисовать осциллограмму. Построить график  $U_{ввых} = f(U_{вх})$  и определить  $K_u$ .
9. Определить влияние сопротивления на нагрузки  $R_{н}$  и сопротивления генератора  $R_{г}$  на  $K_u$ .

### Содержание отчета

Отчет должен содержать:

Описание лабораторной работы, содержащей следующие разделы:

1. Цель выполняемой работы
2. Описание работы, проделанной в соответствии с разделом «Программа работы»
3. Схема исследуемого усилителя
4. График АХ для различных параметров схемы и определенные по графикам значения  $K_u$
5. Справочные данные и характеристики транзистора

### **Контрольные вопросы**

1. Какие существуют типы полевых транзисторов?
2. Из каких элементов состоит структурная схема однокаскадного усилителя с ОИ?
3. Какова полярность напряжения питания по отношению электродов транзистора с  $p$ -каналом?
4. Объясните значение элементов, используемых в усилителе с полевым транзистором в схеме ОИ.
5. Каково отличие каскада ОИ от каскада с ОЭ на биполярном транзисторе?
6. Начертите схему замещения схемы ОИ.
7. Каково влияние ёмкостей  $C_{зс}$ ,  $C_{зи}$  при высоких частотах на  $C_{вх}$  каскадов ОС и ОИ?
8. Покажите пути протекания переменных и постоянных составляющих токов.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО И НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ НА ОУ**

**Цель работы:** 1. Изучить принцип действия, основные параметры и характеристики инвертирующего и неинвертирующего усилителя на ОУ; 2. Получить навыки по измерению основных характеристик усилителей: амплитудно-частотной, фазо-частотной и амплитудной.

### **Теоретическая часть**

Операционный усилитель представляет собой многокаскадный усилитель постоянного напряжения, выполненный в виде интегральной микросхемы. Он используется в качестве отдельного



элемента схемы или библиотечного элемента для создания интегральных микросхем более высокой степени интеграции. В принципе нет никакой разницы между обычным и операционным усилителями: оба применяются для усиления напряжений или токов. Но если свойства обыкновенного усилителя задаются его внутренним устройством, то операционный усилитель рассчитывается таким образом, чтобы его функции преимущественно определялись цепями внешней обратной связи. Для этого операционные усилители выполняются с большим коэффициентом усиления и связью по постоянному напряжению. Во избежание дополнительных мер для установки рабочей точки входной и выходной потенциалы задают равными нулю, поэтому операционному усилителю обычно требуется два источника питания – положительного и отрицательного напряжений. Подобные усилители, собранные на дискретных элементах (электронных лампах или транзисторах), применялись раньше исключительно в аналоговых вычислительных устройствах и для выполнения таких математических операций, как сложение и интегрирование. Отсюда и произошло самоназвание операционных усилителей. Наиболее желательными характеристиками, которые стремятся получить изготовители **О.У.**, являются идеальные характеристики. Хотя идеальных характеристик достичь невозможно, мы будем считать, что они таковы в действительности, т.к. это упрощает рассмотрение схем и их анализ. Идеальный **О.У.** должен обладать следующими свойствами: иметь бесконечно большое входное и нулевое выходное сопротивление, собственный коэффициент усиления должен стремиться к бесконечности в бесконечно широкой полосе частот, причём амплитуда выходного сигнала должна оставаться постоянной на любой частоте.

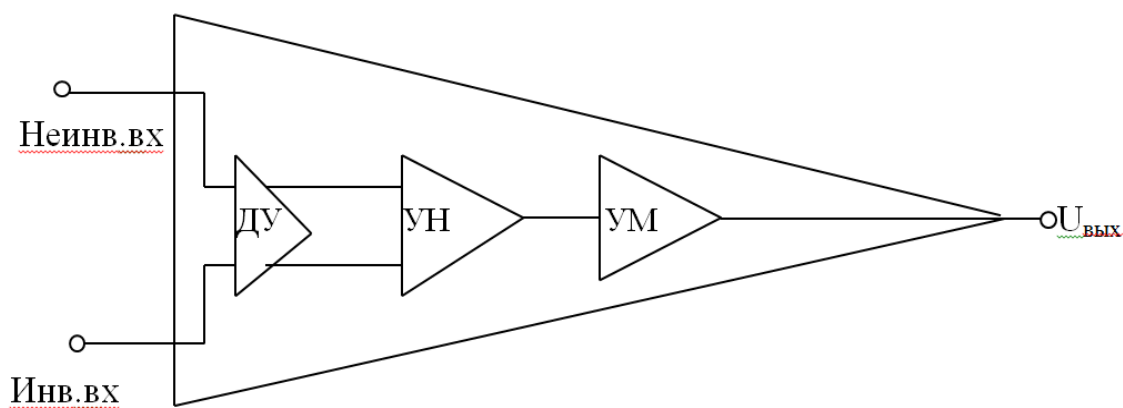


Рис.3.1. Структура операционного усилителя

**О.У.** в общем случае имеют трёхкаскадную структурную схему.

Он представляет собой усилитель с большим “**К**” с глубокой **О.С.**, которая доводит до требуемого уровня.

Входным каскадом такого **О.У.** является один из видов дифференциального усилителя (**Д.У.**) . Он обычно работает в режиме микроамперных токов, поэтому имеет небольшой коэффициент усиления по напряжению ( $\approx 10$ ). За входным **Д.У.** включается следующий дифференциальный каскад – усилитель напряжения (**У.Н.**) , который обычно работает с токами эмиттеров усилительных транзисторов порядка **1 – 2 мА**, поэтому его коэффициент усиления всегда превышает **100**. В этом же каскаде осуществляется операция сдвига уровня усиливаемого сигнала на некоторое строго постоянное напряжение, чтобы согласовать по постоянной составляющей выход **У.Н.** и вход окончного каскада. Оконечный каскад – усилитель мощности (**У.М.**) имеет коэффициент усиления по напряжению порядка **5...50**; с его помощью окончательно формируется требуемая амплитуда выходного сигнала на внешней низкоомной нагрузке. Этот каскад потребляет главную часть рабочего тока усилителя. Коэффициент усиления трехкаскадного **О.У.** (**О.У.** первого поколения) находится, таким образом, в пределах **10...100 тыс.** Входные параметры **О.У.** практически полностью определяются входным **Д.У.** Выходные параметры **О.У.** определяются схемой **У.М.**.. Частотная характеристика **О.У.** суммируется из частотных характеристик отдельных каскадов, работающих при разных токах эмиттеров и отличающихся нагрузках. Каждый из функциональных элементов структурной схемы имеет собственную постоянную времени, поэтому суммарная частотная характеристика трехкаскадного **О.У.** аппроксимируется диаграммой Боде с тремя изломами. Если в усилителе применяется сложный входной каскад с повышенным коэффициентом усиления, то **Д.У.** и **У.Н.** фактически совмещаются в одном каскаде, в результате чего **О.У.** имеет более выгодные энергетические параметры. При сохранении коэффициента усиления на прежнем уровне из частотной характеристики исключается одна постоянная времени. Т.о. перспективные **О.У.** (так называемые **О.У.** второго поколения) имеют структурную двухкаскадную схему. Как указывалось выше, **О.У.** имеет два входа и один выход и построены по дифференциальной схеме. **О.У.** обычно имеет два одинаковые источники питания разной полярности. Общая точка этих источников и является электрическим нулем схемы.

Напряжения  $U_{\text{вх1}}$  и  $U_{\text{вх2}}$ , прикладываемые между входами и землей, называются напряжениями общего вида. Вход, обозначенный на рис.3.2. знаком +, называется неинвертирующим входом, т.к. при  $U_{\text{вх1}} > 0$ ,  $U_{\text{вх2}} = 0$ ,  $U_{\text{н}} > 0$ . Вход, обозначенный знаком – называется инвертирующим входом, поскольку при  $U_{\text{вх2}} > 0$ ,  $U_{\text{вх1}} = 0$ ,  $U_{\text{н}} < 0$ . Иначе говоря, положительное приращение  $U_{\text{вх1}}$  вызывает положительное приращение  $U_{\text{н}}$  ( $U_{\text{вх1}}$  и  $U_{\text{н}}$  совпадают по фазе), положительное приращение  $U_{\text{вх2}}$  вызывает уменьшение  $U_{\text{н}}$  ( $U_{\text{вх2}}$  и  $U_{\text{н}}$  находятся в противофазе).

(–) – инвертирующий вход;

(+) – неинвертирующий вход;

$U_{(-)}$  – напряжение на инвертирующем входе;

$U_{(+)}$  – напряжение на неинвертирующем входе;

$U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение на ОУ;

$U_{\text{П+}}$  – положительное напряжение питания ОУ;

$U_{\text{П-}}$  – отрицательное напряжение питания ОУ.

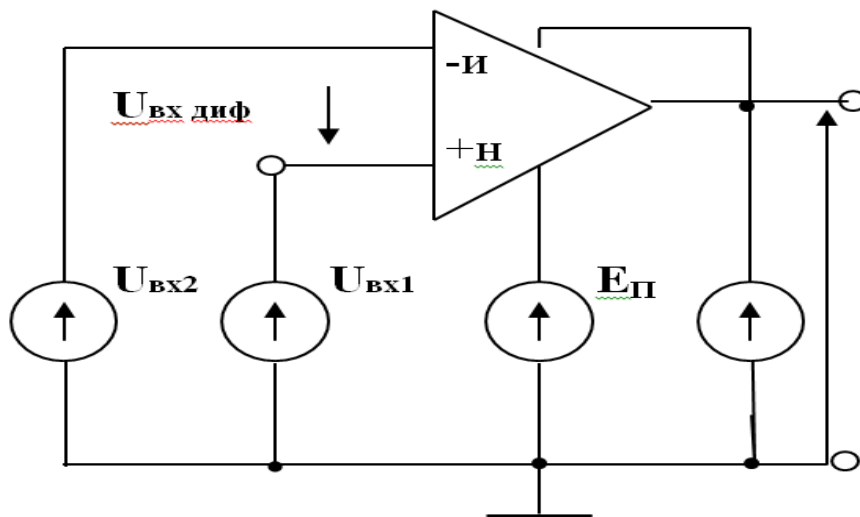


Рис.3.2. Схематическое изображение ОУ

Знак минус перед коэффициентом передачи  $A$  показывает, что выходное напряжение отрицательно для  $\Delta U > 0$ . Коэффициент передачи  $A$  можно определить как отношение величины выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  к разности значений входных напряжений  $\Delta U$ . Коэффициент передачи реальных ОУ на постоянном токе колеблется в пределах от 10 000 до 2 000 000. Большинство ОУ имеют биполярный выход. Это означает, что выходной сигнал может иметь как положительную, так и отрицательную полярность. Поэтому для нормальной работы ОУ требуются два источника питания. Выходное напряжение никогда не может превысить напряжение питания

( $U_{П-} < U_{ВЫХ} < U_{П+}$ ). Как правило, максимальное выходное напряжение ОУ на доли вольта меньше напряжения питания. Это ограничение известно как напряжение ограничения (положительное  $U_{огр+}$  и отрицательное  $U_{огр-}$ ).

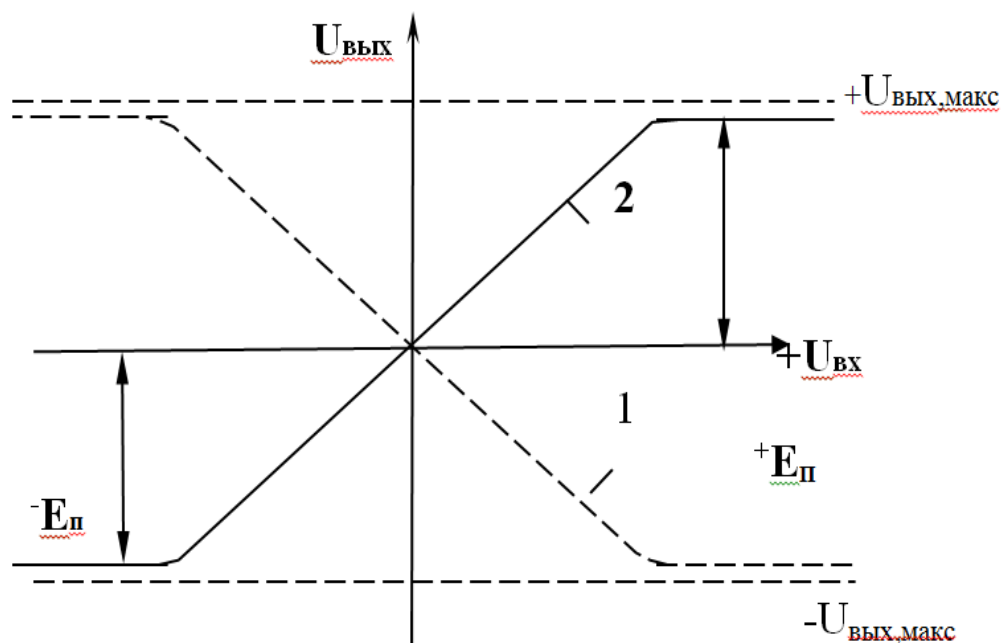


Рис.3.3. Переходная характеристика

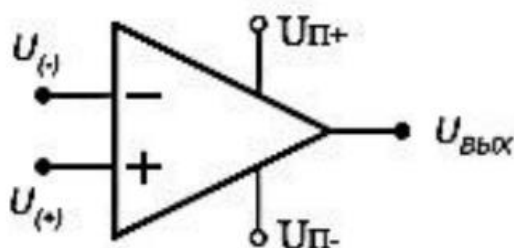


Рис.3.4. УГО операционного усилителя в схеме

### Инвертирующий усилитель

Такая схема является основной. Особенностью этой схемы является то, что операционные усилители характеризуются кроме усиления, еще и изменением фазы. Буква «к» обозначает параметр усиления. На графике изображено влияние усилителя в данной схеме. Синий цвет отображает входной сигнал, а красный цвет – выходной сигнал. Коэффициент усиления в этом случае равен:  $k = 2$ . Амплитуда сигнала на выходе в 2 раза больше сигнала на входе. Выходной сигнал усилителя перевернут, отсюда и его название.

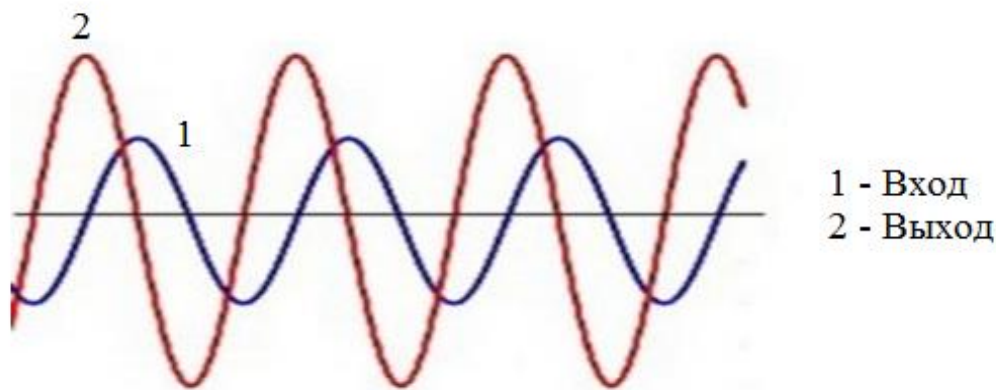


Рис. 3.5. Осциллограмма инвертирующего ОУ

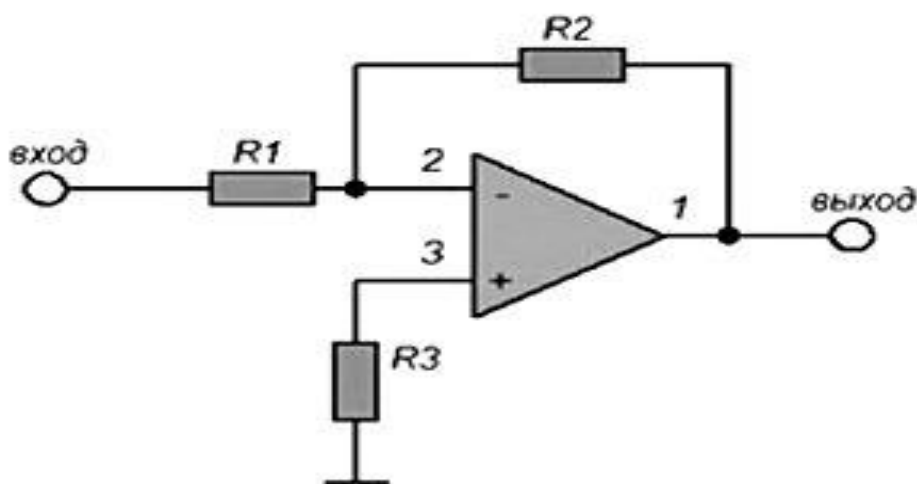


Рис.3.6. Простая схема инвертирующего ОУ

Такие операционные усилители стали популярными из-за своей простой конструкции. Для вычисления усиления применяют формулу:  $k = \frac{R_2}{R_1}$

Отсюда видно, что усиление операционника не зависит от сопротивления  $R_3$ , поэтому можно обойтись без него. Здесь он применяется для защиты. Схема рис.3.7 реализует включение О.У. в цепь инвертирующего усилителя. Здесь и ниже, где будут рассмотрены другие включения О.У., предполагается О.У. идеальным, т.е.  $K_u \rightarrow \infty$ .  $K_i \rightarrow \infty$  по каждому из симметричных дифференциальных входов О.У. Из последнего допущения вытекает, что по каждому из входов  $R_{вх} \rightarrow \infty$ . Кроме того, считается, что усилитель полностью симметричен, не имеет дрейфа и обладает неограниченной широкополосностью параметров в диапазоне условий эксплуатации. При отсутствии входного сигнала напряжение на выходе О.У. равно нулю.

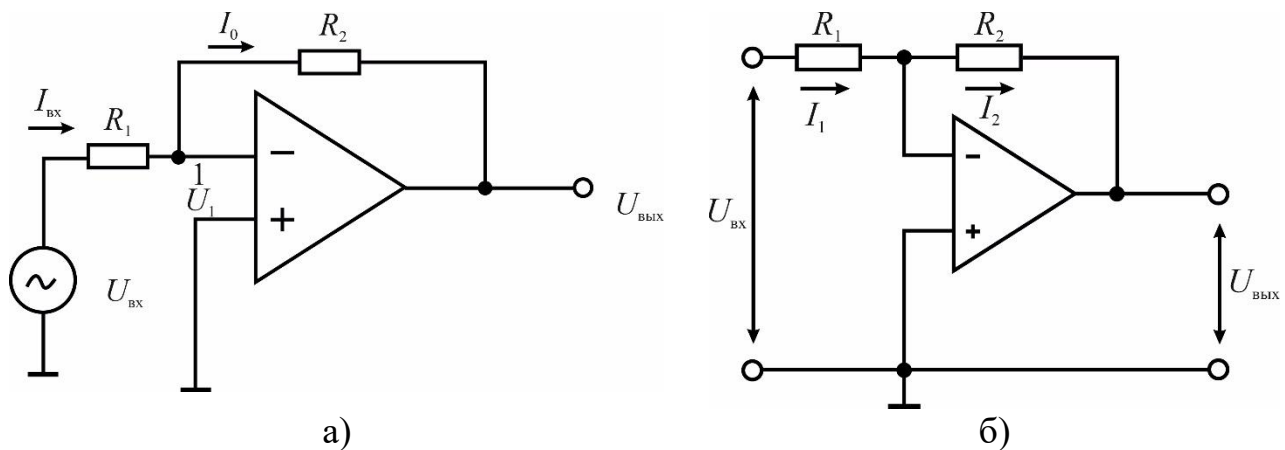


Рис. 3.7. Принципиальная схема инвертирующего ОУ

При охвате такого идеального О.У. обратной связью (рис.3.7) любой малый сигнал  $U_1$ , оказавшийся на входе, будет усилен и передан по цепи отрицательной обратной связи  $R_2$  обратно во входную цепь. При этом входное возмущение должно быть скомпенсировано так, чтобы в стационарном режиме (состоянии равновесия) сигнал  $U_1$  стал равным нулю, а точка 1 оказалась так называемой виртуальным (фактически) нулем.

Предположение о том, что  $U_1 = 0$ , существенно упрощает расчеты, связанные с анализом включения О.У. Из схемы (рис.3.7, а) в соответствии с приведенными выше предположениями видно, что

$$I_{\text{вх}} = I_0. \text{ Поскольку } I_1 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}, I_2 = -\frac{U_{\text{вых}}}{R_2}, \text{ то } U_{\text{вых}} = I_2 R_2 \text{ и тогда } K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{I_2 R_2}{I_1 R_1}$$

. Так как входное сопротивление инвертирующего входа (рис.3.1, б) бесконечно велико, следовательно, ток будет протекать только через цепь  $R_1 \rightarrow R_2$ . Два разных тока в одной ветви быть не может, поэтому получается, что  $I_0 = I_1$ . Коэффициент усиления цепи по напряжению, составит  $K_U = -\frac{R_2}{R_1}$ . Если выбрать  $R_2 = R_1$ , включение рис.3.7. будет

являться цепью инвертирующего повторителя. Таким образом, схемы инвертирующего усилителя и инвертирующего повторителя выполняют функцию преобразователя импедансов (комплексное полное сопротивление переменному току электрической цепи с активным и реактивным сопротивлением.)

Свойства инвертирующего усилителя

- выходной сигнал усилителя инвертирован по отношению ко входному сигналу

- входное сопротивление такого усилителя равняется сопротивлению  $R_1$
- выходное сопротивление очень мало

### Неинвертирующий усилитель (повторитель).

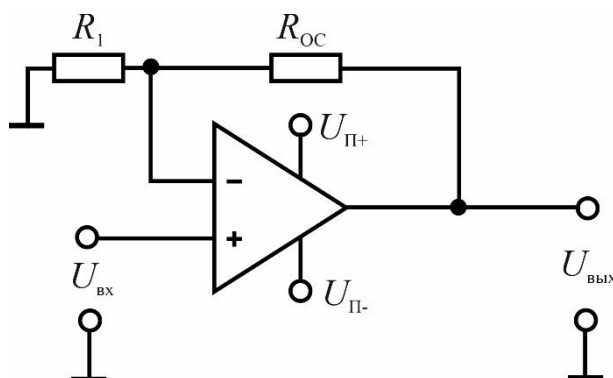


Рис. 3.8. Принципиальная схема неинвертирующего ОУ

Как видно из рис.3.8, поскольку  $U_{вх} = U_{вых} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ , схема осуществляет

операцию  $U_{вых} = U_{вх} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$ , Формируя коэффициент усиления

$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$  не зависящий от показателей усилителя.

### Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд ЭС-23 позволяет исследовать характеристики самого операционного усилителя (ОУ), а также схемы применения ОУ (см. рис.3.9). На лицевой панели стенда имеются: вольтметры постоянного тока для измерения входного и выходного сигналов, два источника сигналов: "ист.1", "ист.2", с возможностью регулирования амплитуды сигнала и его знака, сменные платы со схемами применения ОУ, секундомер с цифровой индикацией. Для каждой исследуемой схемы имеются возможности переключения (S1) коэффициентов передачи, величин емкостей (C1, C2), время интегрирования; для подачи сигналов от внешних устройств и для наблюдения выходных сигналов имеются специальные гнезда. Для исследования той или иной схемы ОУ соответствующие платы крепятся двумя крепежными винтами. В случае подключения на вход ОУ источников ист. 1, ист.2 - это указано непосредственно на плате. Вольтметр постоянного выходного напряжения подключается к выходу исследуемых схем, автоматически указывая полярность

измеряемых сигналов. Секундомер с цифровой индикацией автоматически подключается только при исследовании схемы интегратора.

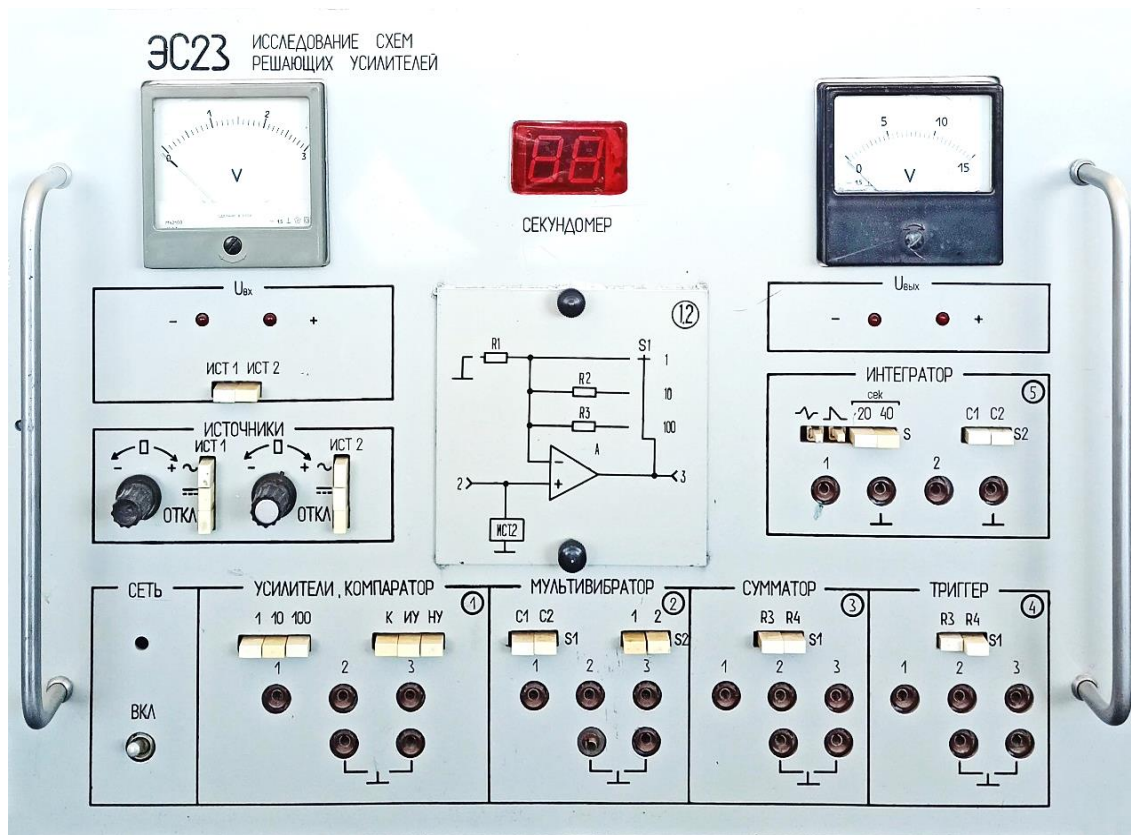


Рис. 3.9. Лицевая панель стенда

### Программа работ:

1. Исследование ОУ в режиме неинвертирующего усилителя (плата 1.2).
2. Снять амплитудную характеристику на постоянном токе для трех значений коэффициента передачи  $K$ - 1,10,100.
3. Снять АЧХ при  $K = 1$ .
4. Исследование ОУ в режиме инвертирующего усилителя (плата 1.3).
5. 1.1. Снять амплитудную характеристику на постоянном токе для трех значений коэффициента передачи  $K$ - 1,10,100.
6. 1.2. Снять амплитудную характеристику на переменном токе при тех же значениях коэффициента передачи.
7. 1.3. Снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) для коэффициентов передачи 1,10.
8. 1.4. Снять фазо-частотную характеристику (ФЧХ) ОУ (при коэффициенте передачи 1).



## Методические указания к проведению работы

К п.1. 1. Установить плату 1.2 (рис.3.10). Нажать кнопку "ИУ" на поле стенда, соответствующем исследованию усилителя и компаратора. Для изменения коэффициента передачи пользоваться кнопкой 81 (1,10,100) на этом же поле. Клеммы 1,2,3 соответствуют точкам платы 1.3 (1 - входы, 2 - входы, 3 - выход ОУ).

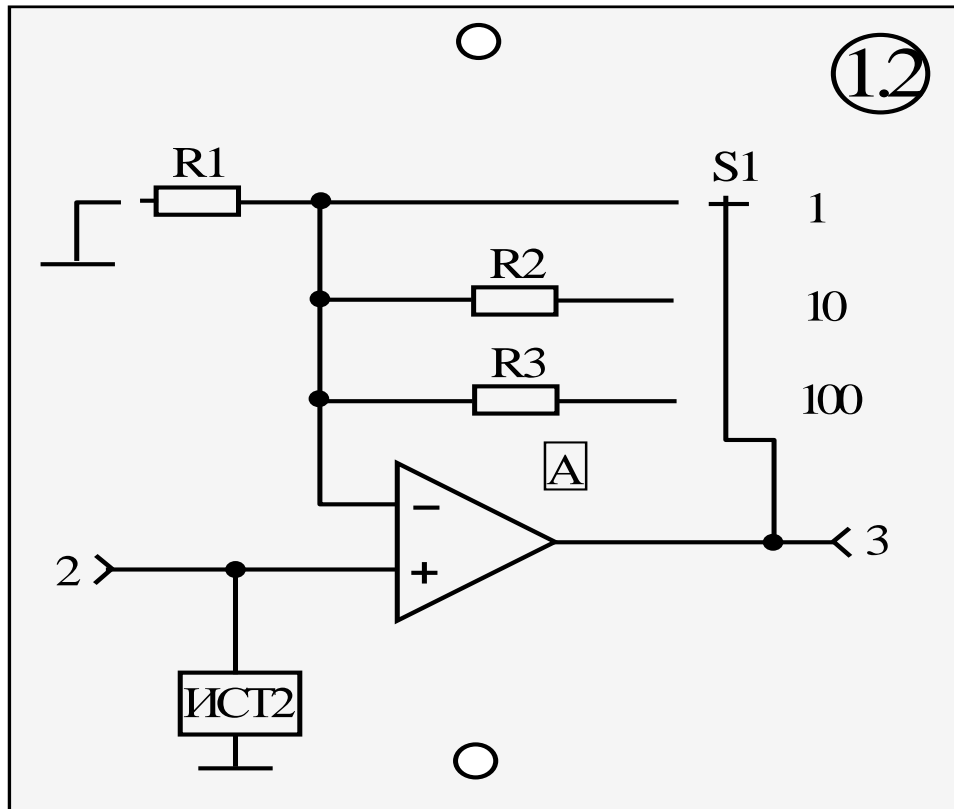


Рис.3.10. Панель неинвертирующего усилителя (ОУ)

Для снятия амплитудной характеристики необходимо подавать входной сигнал от «ист.1», для чего необходимо нажать кнопку «ист.1», вольтметр подключить нажатием кнопки ист.1. Выходное напряжение фиксировать на вольтметре выходных сигналов.

К п. 1.2. Для снятия амплитудной характеристики на переменном токе необходимо воспользоваться внешним звуковым генератором (ЗГ) и ламповым вольтметром (ЛВ) для измерения переменных сигналов. Сигнал от ЗГ подать между точками на стенке "1" и "-1-"; измерять между "3" и "-1-". Амплитудные характеристики снимать до режима насыщения  $U_{\text{вых}}$  максимально и не меняется).

К п.1.3. АЧХ снимают, подавая сигнал от внешнего ЗГ, подобрав амплитуду входного сигнала с частотой 20 Гц, чтобы ЛВых было

неискаженным. Частоту менять от 20 Гц до 60 кГц.  $U_{вых}$  измерять с помощью "ЛВ".

К п. 1.4. ФЧХ снимают, измеряя угол сдвига выходного сигнала относительно входного, либо по двухлучевому осциллографу, либо с помощью фигур Лиссажу.

К п.1. 1. Установить плату 1.3 (рис.3.11). Нажать. кнопку "ИУ" на поле стенда, соответствующем исследованию усилителя и компаратора. Для изменения коэффициента передачи пользоваться кнопкой 81 (1,10,100) на этом же поле. Клеммы 1,2,3 соответствуют точкам платы 1.3 (1 2 - входы, 3 -выход ОУ).

Для снятия амплитудной характеристики необходимо подавать входной сигнал от «ист.1», для чего необходимо нажать кнопку «ист.1: \_», вольтметр подключить нажатием кнопки ист. 1. Выходное напряжение фиксировать на вольтметре выходных сигналов.

К п. 1.2. Для снятия амплитудной характеристики на переменном токе необходимо воспользоваться внешним звуковым генератором (ЗГ) и ламповым вольтметром (ЛВ) для измерения переменных сигналов. Сигнал от ЗГ подать между точками на стенке "Г" и "-<sup>1</sup>-"; измерять между "3" и "-<sup>1</sup>-". Амплитудные характеристики снимать до режима насыщения  $U_{вых}$  максимально и не меняется).

К п.1.3. АЧХ снимают, подавая сигнал от внешнего ЗГ, подобрав амплитуду входного сигнала с частотой 20 Гц, чтобы  $U_{вых}$  было неискаженным. Частоту менять от 20 Гц до 60 кГц.  $U_{вых}$  измерять с помощью "ЛВ".

К п. 1.4. ФЧХ снимают, измеряя угол сдвига выходного сигнала относительно входного, либо по двухлучевому осциллографу, либо с помощью фигур Лиссажу.

К п.2.1. Установить плату 1.3 (рис.3.1). Нажать кнопку "НУ". Для измерения коэффициента передачи пользоваться кнопкой I. Клеммы 2,3 соответствуют точкам платы 1.2.

Для снятия амплитудной характеристики необходимо подать входной сигнал от "ист.2", для чего необходимо нажать кнопку "ист.2: \_", вольтметр подключить нажатием кнопки "ист.2". АЧХ снимать аналогично пункту 1.3.

## Содержание отчёта

В отчёте должны быть представлены результаты проведенных опытов, схема измерений и графики.

1. Амплитудные характеристики на постоянном токе для трех значений коэффициента передачи для неинвертирующего усилителя.
2. Амплитудные характеристики на переменном токе для ИУ.

## Контрольные вопросы

1. Объясните, что представляет собой операционный усилитель.
2. Назовите его параметры и характеристики.
3. Докажите, что в ОУ коэффициент передачи при наличии обратной связи не зависит от внутренних параметров.
4. Приведите все характеристики ОУ, объясните их (причины завалов, насыщения и т.д.).
5. Приведите схему неинвертирующего усилителя (НУ), начертите его характеристики и объясните их.
6. Объясните, что представляет собой операционный усилитель?
7. Назовите его параметры и характеристики.
8. Докажите, что в ОУ коэффициент передачи при наличии обратной связи не зависит от внутренних параметров.
9. Приведите все характеристики ОУ, объясните их (причины завалов, насыщения и т.д.).
10. Приведите схему инвертирующего усилителя (ИУ), начертите его характеристики и объясните их.

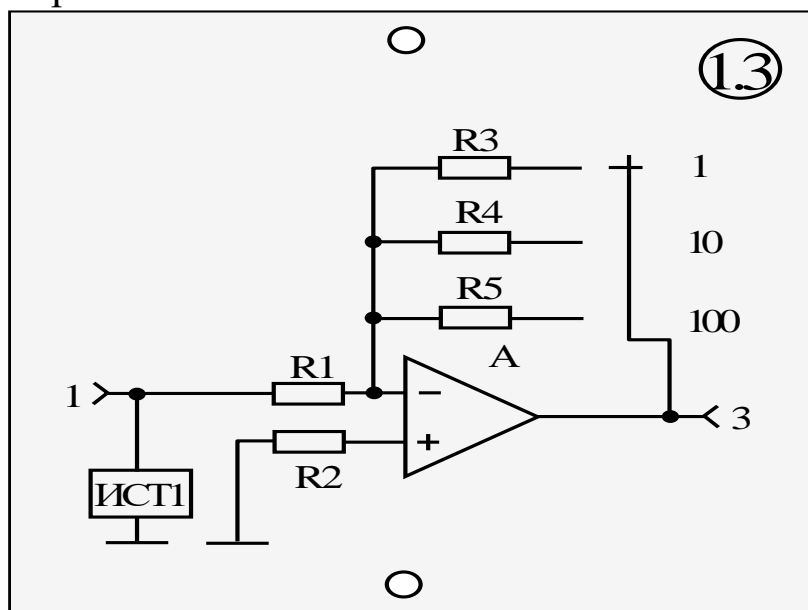


Рис.3.11. Панель инвертирующего усилителя

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ КЛЮЧЕЙ НА ТРАНЗИСТОРАХ

**Цель работы:** Изучение основных характеристик транзисторного ключевого элемента на взаимодополняющих транзисторах.

### Теоретическая часть

**Транзисторный ключ** – это электронный ключ, в качестве коммутирующего элемента в котором используется транзистор.

#### Назначение транзисторных ключей.

Транзисторные ключи предназначены для коммутации цепей нагрузки.

#### Классификация транзисторных ключей.

Транзисторные ключи классифицируются по следующим основным признакам:

1. По виду нелинейного элемента.
  - транзисторные ключи на биполярных транзисторах;
  - транзисторные ключи на полевых транзисторах.
2. По схеме включения (для схем транзисторных ключей на биполярных транзисторах).
  - схемы транзисторных ключей с общим эмиттером;
  - схемы транзисторных ключей с общим коллектором;
  - схемы транзисторных ключей с общей базой;
  - схемы транзисторных ключей ключ-звезда.
1. По состоянию транзистора в открытом состоянии.
  - насыщенный (схемы транзисторных ключей с внешним смещением; схемы транзисторных ключей с ускоряющим конденсатором).
  - ненасыщенный (схемы транзисторных ключей с диодной фиксацией (нелинейной отрицательной обратной связью)).
2. По включению сопротивления нагрузки в цепь транзисторного ключа.
  - последовательные схемы транзисторных ключей.
  - параллельные схемы транзисторных ключей.

Транзисторный ключ состоит из коммутирующего прибора, нагрузки, источника питания. Иногда коммутирующий элемент и нагрузка могут меняться местами.

#### Принцип действия транзисторных ключей.

Транзистор работает в ключевом режиме (режим большого сигнала), и может находиться в двух устойчивых состояниях:

- 1) закрытом состоянии (режиме отсечки);
- 2) открытом состоянии (режиме насыщения).

Активный режим имеет место при переходе из одного статического режима в другой.

Наибольшее распространение получил транзисторный ключ по схеме О.Э.. Входной управляющий сигнал управляет состоянием ключевого элемента-транзистора.

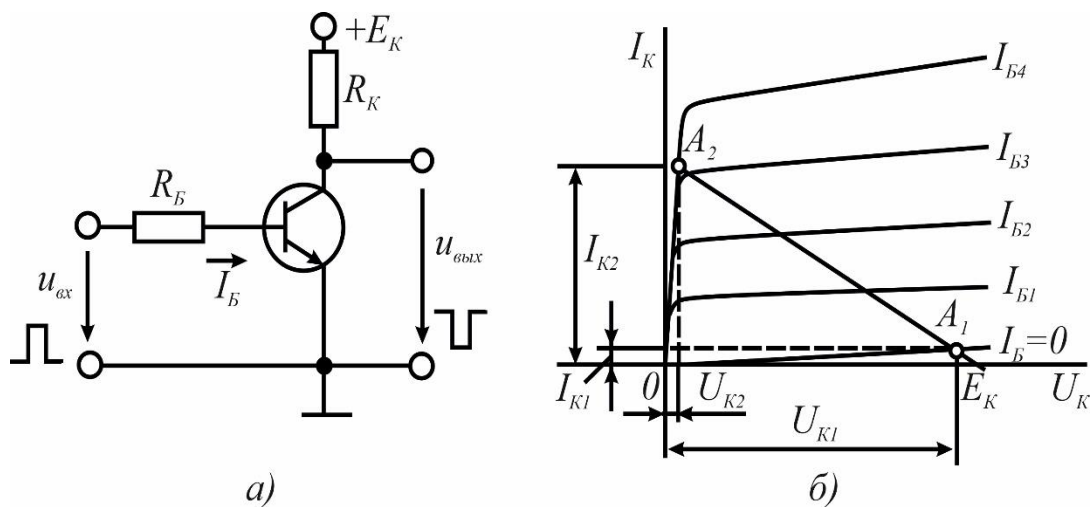


Рис.4.1 Схема и ВАХ ключа на биполярном транзисторе

При положительной полярности входного сигнала транзистор заперт и в его выходной цепи протекает ток  $I_{к0}$ . При отрицательной полярности входного сигнала в базовой цепи транзистора создаётся ток, достаточный для его насыщения. С помощью выходных характеристик транзистора (рис.4.1, б) определяем положение точек  $A_1$  и  $A_2$ . Точка  $A_1$  соответствует выключенному состоянию ключа, т.е. ток  $A_2$  транзистора соответствует включённому состоянию ключа, т.е. насыщенному транзистору.

Как видно из характеристик напряжения  $U_1$  близко к напряжению питания  $E_K$ . Напряжение  $U_2$  численно равно напряжению  $U_{KH}$  на коллекторе насыщенного транзистора, т.к.  $U_{KH}$  мало, то амплитуда изменения напряжения на нагрузке при переключении близко к  $E_K$ . Ключ должен управляться знакопеременным напряжением на входе  $U_{ВХ}(t)$ .

Транзистор  $p-n-p$  типа запирается при действии положительной полуволны входного напряжения и насыщается при отрицательной полуволне. При этом условия запираения и насыщения

обеспечиваются при определенных соотношениях между параметрами входящих в схему элементов. При действии положительной полуволны входного сигнала транзистор заперт и через него протекает ток  $I_{K0}$ . Условие запираения транзистора в схеме с О.Э. имеет вид.  $U_{БЭ} > 0$ ,  $U_{БЭ} = U_{ВХ} - I_{K0}R_B \geq 0$ . Отсюда  $R_B \leq \frac{U_{ВХ}}{I_{K0}}$ . При выполнении этого условия для режима отсечки  $I_B = -I_{K0}$ ,  $I_K = I_{K0}$   $U_{БЭ} = U_{ВХ} - I_{K0}R_B$ ,  $U_{K0} = -(E_R - I_{K0}R_B)$ . Так как  $I_{K0} \approx 0$ ,  $U_{БЭ} = U_{ВХ}$ ,  $U_{КЭ} = -E_K$ ,  $I_K = 0$

При действии отрицательной полуволны входного сигнала транзистор насыщен и переходы база-эмиттер, коллектор-эмиттер стянуты в точку. Для входной цепи  $I_B = \frac{U_{ВХ}}{R_B}$ . Для выходной цепи

$I_{КН} = \frac{E_K}{R_K}$ . Условие насыщения транзистора в общем виде имеет следующий вид  $I_{КН} \geq \beta I_B$  или  $\frac{E_K}{R_K} \geq \beta \frac{U_{ВХ}}{R_B}$  относительно  $R_B \leq \beta \frac{U_{ВХ}}{E_K} R_K$ . При

$U_{ВХ} = E_K$ ,  $R_B \leq \beta R_K$ . Выполнение этого условия соответствует границе насыщенного режима. Незначительное изменение параметров элементов схемы приводит к выводу транзистора из режима насыщения. Поэтому берут несколько меньшее значение  $R_B$ , создавая некоторый запас по степени насыщения транзистора  $S = I_B / I_{БН}$  - степень насыщения транзистора. Первое состояние «выключено» (транзистор закрыт) определяется точкой А1 на выходных характеристиках транзистора; его называют режимом отсечки. В режиме отсечки ток базы  $I_B = 0$ , коллекторный ток  $I_{К1}$  равен начальному коллекторному току, а коллекторное напряжение  $U_K = U_{К1} \approx E_K$ . Режим отсечки реализуется при  $U_{ВХ} = 0$  или при отрицательных потенциалах базы. В этом состоянии сопротивление ключа достигает максимального значения:  $R_{\max} = \frac{R_T \cdot R_k}{R_T + R_k}$ , где  $R_T$  - сопротивление транзистора в закрытом состоянии, более 1 МОм.

Второе состояние «включено» (транзистор открыт) определяется точкой А2 на ВАХ и называется режимом насыщения. Из режима отсечки (А1) в режиме насыщения (А2) транзистор переводится положительным входным напряжением  $U_{ВХ}$ . При этом напряжение  $U_{ВЫХ}$  принимает минимальное значение  $U_{К2} = U_{к.э.нас}$  порядка 0,2-1,0 В, ток коллектора  $I_{К2} = I_{к.нас} \approx E_K / R_K$ . Ток базы в режиме насыщения определяется из условия:  $I_B > I_{Б.нас} = I_{к.нас} / h_{21}$ .

## Описание лабораторного стенда

Стенд сконструирован в виде настольного переносного прибора. Все ручки и органы управления расположены на передней панели. На панели стенда нанесена принципиальная схема исследуемого ключа на взаимодополняющих МДП транзисторах. Питание стенда производится от однофазной сети переменного тока 220 В, частотой 50 Гц. Для выполнения лабораторной работы, кроме стенда исследуемого ключа, необходимы двухлучевой осциллограф, генератор импульсов пилообразного напряжения, генератор прямоугольных импульсов и соединительные провода к ним. Ключ на взаимодополняющих транзисторах разработан на интегральной микросхеме К176ЛПТ серии 176. Переключатель S2 позволяет включать напряжение  $E_{\text{шп}}$  либо непосредственно на шину питания ключевого элемента, либо через резистор  $R=510$  Ом. Переключатель S1 позволяет подключить конденсатор 1 мкф определения потребляемой мощности. Конденсатор 510 пф, подключаемый к выходу с помощью переключателя S3, используется для имитации паразитных емкостей.

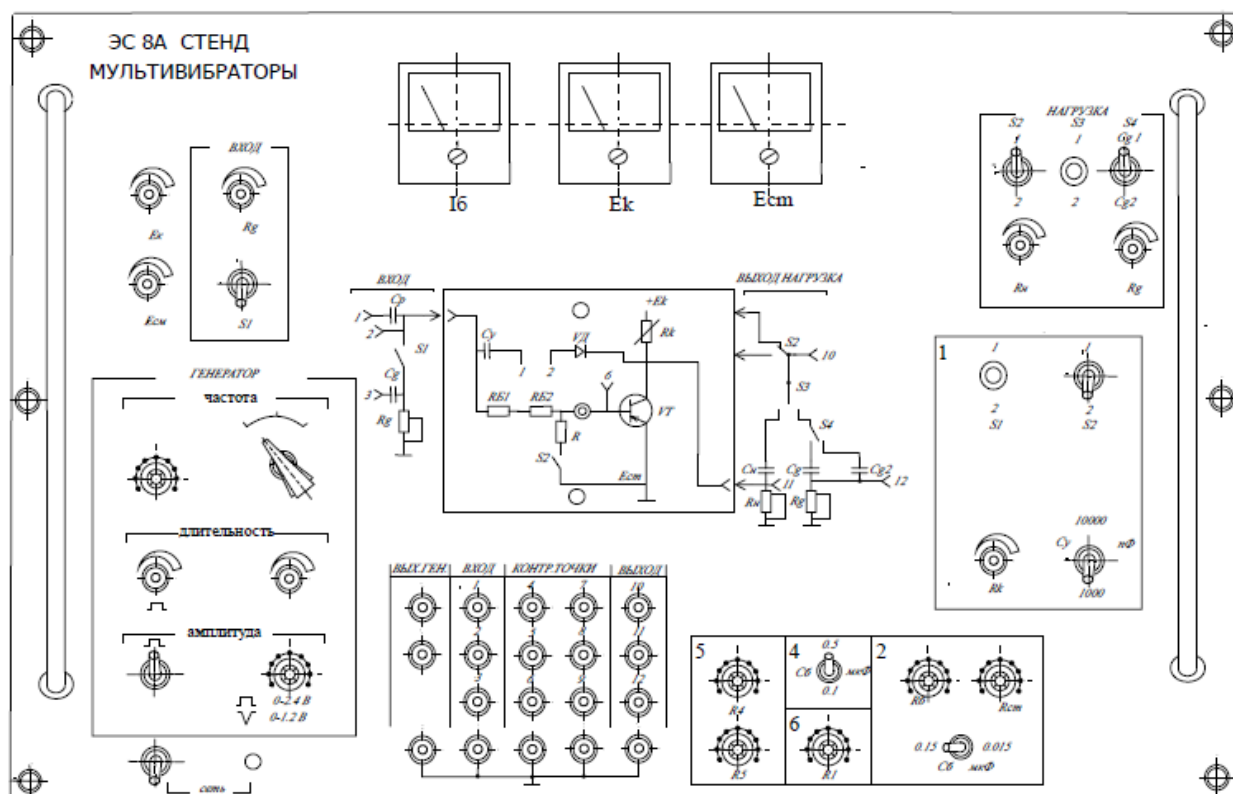


Рис.4.1. Лицевая панель стенда

## Подготовка стенда к работе

Внимательно ознакомиться с назначением каждого органа управления.

Переключатель S2 подсоединить к источнику +  $E_{\text{ип}}$ .

Тумблеры переключателей S1, S3 поставить в положение «отключено».

Выход генератора пилообразного напряжения подсоединить к входу ключа.

Подсоединить двухлучевой осциллограф к выходу ключа на МДП транзисторах.

Подсоединить шнуры питания к питающей сети.

Включить тумблеры «Сеть», при этом должна загореться лампочка сигнализации на стенда генератора и осциллографа.

### Рабочее задание

1. Снять характеристику переключения для  $E_{\text{ип}} = 9 \text{ В}$ .
2. Снять зависимость сквозного тока от входного напряжения.
3. Снять зависимость потребляемой мощности от частоты следования входного сигнала  $P = f(F)$ ,  $C = 510 \text{ пф}$ ,  $F = 1 + 10 \text{ кГц}$ .
4. Измерить  $t_{30}^{1,0}$ ,  $t_{30}^{1,0,0,1}$ ,  $t^{0,1}$

### Методические указания по выполнению работы

1. При снятии характеристик переключения пилообразное напряжение с генератора подается на вход ключевого элемента и один из входов осциллографа. Напряжение с выхода исследуемой схемы подается на второй вход осциллографа. На экране можно одновременно наблюдать две зависимости  $U_{\text{ВХ}}(t)$  и  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ , по которым строится характеристика переключения  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ .

2. Для исследования переходных процессов используется генератор прямоугольных импульсов. Для измерения  $t_{30}^{1,0}$ ,  $t_{30}^{0,1}$  необходимо получить на экране осциллограммы входного и выходного одновременно.

Для получения зависимости  $I_{\text{СКВ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  переключателем S2 подключить резистор  $R = 510 \text{ Ом}$  к шине питания и подать пилообразное напряжение на вход ключа (S1 разомкнут). С помощью двухлучевого осциллографа наблюдать на экране две зависимости  $U_{\text{ВХ}}(t)$  и  $U(t) = E - I_{\text{СКВ}}(t) \cdot R$ . По полученным данным строится зависимость  $I_{\text{СКВ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ .



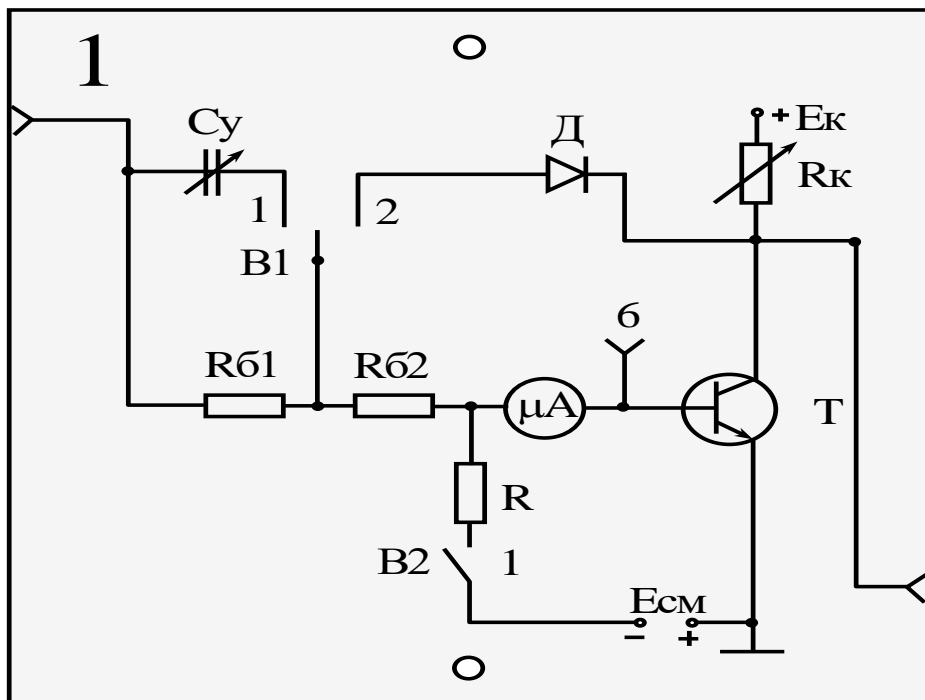


Рис.4.2. Панель транзисторного ключа

При подключении переключателями S1 и S2 конденсатора (1мкф) и резистора (510 Ом) можно определить средний ток и мощность, потребляемую схемой, поддерживая постоянное напряжение на шине питания и измерив падение напряжения на резисторе.

### Контрольные вопросы

1. Что такое транзисторный ключ?
2. Какие классификации Вы знаете?
3. Назовите области работы МДП транзистора и расскажите об их особенностях.
4. Что такое переключательная характеристика? Как она получается? Из каких участков состоит?
5. Объясните зависимость времени включения от амплитуды входного сигнала.
6. В чем заключаются особенности ключевых схем на взаимодополняющих МДП транзисторах?
7. Назовите области работы транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  в ключевом элементе на МДП транзисторах при изменении  $U_{ВХ}$  от 0 до  $E$  и  $E > U_{зи\text{пор} П} + U_{зи\text{пор} Р}$ .
8. Чем определяется мощность, потребляемая ключевым элементом на взаимодополняющих МДП транзисторах?
9. Что такое сквозной ток?
10. Как изменяется вид характеристики переключения для цепочки последовательно включенных ключевых элементов? Как

изменяется при этом помехоустойчивость схемы?

11. Сравните ключевые элементы на биполярных и на взаимодополняющих МДП транзисторах по быстродействию и мощности, потребляемой от источника питания.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО МУЛЬТИВИБРАТОРА С КОЛЛЕКТОРНО-БАЗОВЫМИ СВЯЗЯМИ**

**Цель работы:** В данной работе изучается принцип действия автоколебательных мультивибраторов на биполярных транзисторах. Для улучшения параметров выходных импульсов мультивибратора используются корректирующие диоды. На стенде с помощью осциллографа можно наблюдать электрические процессы в мультивибраторах и по ним рассчитывать параметры схемы.

### **Теоретическая часть**

*Мультивибратор* – релаксационный генератор электрических прямоугольных колебаний с короткими фронтами.

Мультивибратор является одним из самых распространённых генераторов импульсов прямоугольной формы, используемый в электронике и радиотехнике. Обычно представляет собой двухкаскадный резистивный усилитель, охваченный глубокой положительной обратной связью.

В электронной технике используются самые различные варианты схем мультивибраторов, которые различаются между собой схемотехникой, типом используемых активных компонентов (ламповые, транзисторные, тиристорные, микроэлектронные и другие), различающиеся режимом работы (автоколебательный, ждущие, с внешней синхронизацией синхронизации), видам связи между усилительными элементами, способам регулировки длительности и частоты генерируемых импульсов и другими параметрами.

Существуют три типа мультивибраторов в зависимости от режима работы:

- неустойчивый, автоколебательный или аустойчивый: устройство непрерывно генерирует колебания и самопроизвольно переходит из одного состояния в другое. При этом не обязателен внешний сигнал синхронизации, если не требуется захват частоты

колебаний;

- **моностабильный:** одно из состояний является стабильным, но другое состояние неустойчиво (переходное). Мультивибратор на некоторое время, определяемое параметрами его компонентов, переходит в неустойчивое состояние под действием запускающего импульса. Затем возвращается в устойчивое состояние до прихода очередного запускающего импульса. Такие мультивибраторы используются для формирования импульса с фиксированной длительностью, не зависящей от длительности запускающего импульса. Такой тип мультивибраторов иногда называют **одновибраторы** или **ждущие мультивибраторы**.

- **бистабильный:** мультивибратор устойчив в любом из двух состояний и может быть переключён из одного состояния в другое подачей внешних импульсов. Такие устройства называют **бистабильными триггерами**, и такие триггеры иногда, не совсем корректно, называют «мультивибраторы», так как двусмысленно.

Отнесение мультивибратора к классу автогенераторов оправдано лишь при автоколебательном режиме его работы. В ждущем режиме мультивибратор вырабатывает импульсы только тогда, когда на его вход поступают синхронизирующие сигналы. Режим синхронизации отличается от автоколебательного тем, что в этом режиме с помощью внешнего управляющего (синхронизирующего) колебания удаётся синхронизовать частоту колебаний автоколебательного мультивибратора под частоту синхронизирующего сигнала или сделать кратной ей (режим «захвата частоты») для автоколебательных мультивибраторов.

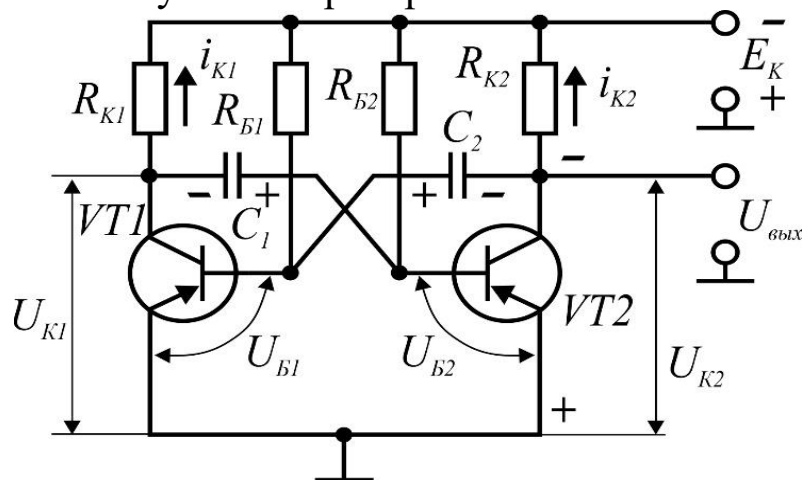


Рис.5.1. Симметричный автоколебательный мультивибратор

Автоколебательный мультивибратор, представленный на рис 5.1, представляет собой двухкаскадное устройство, в котором выход

первого каскада связан цепочкой  $CR_6$  с входом второго каскада, а выход второго аналогичной цепочкой с входом первого.

Когда оба транзистора работают в активном режиме, в схеме имеет место цепь положительная обратная связи:

Если транзисторы, конденсаторы и резисторы в обоих плечах одинаковы, то мультивибратор называют симметричным.

Предположим, что после подключения источника питания в схеме наступит такой режим, при котором оба транзистора находятся в активном режиме, а их коллекторные токи, напряжения на электродах и напряжения на конденсаторах связи окажутся одинаковыми:  $i_{k1}=i_{k2}$ ;  $U_{k1}=U_{k2}$ ;  $U_{61}=U_{62}$ ;  $U_{C1}=U_{C2}$ . Такое состояние неустойчиво. Пусть по какой-либо причине произойдёт внезапное уменьшение тока  $i_{K1}$ . Это вызывает уменьшение напряжения на  $R_{K1}$  и как следствие, понижение напряжения коллектора ( $U_{K1}=-E_K+i_{K1}R_{K1}$ ) на некоторую величину  $\Delta U_{K1}$ . Так как напряжение на конденсаторе  $C_1$  не может мгновенно изменяться, то в первый момент отрицательный скачок напряжения  $\Delta U_{k1}$  целиком приложится между базой и эмиттером  $T_2$ , что вызывает увеличение тока  $i_{K2}$ . Вследствие этого потенциал коллектора  $T_2$  ( $U_{k2}=-E_K+i_{K2}R_{K2}$ ) повысится (станет менее отрицательным). Этот положительный перепад напряжения на коллекторе  $T_2$  через конденсатор  $C_2$  приложится к входу транзистора  $T_1$  что приведёт к ещё большему уменьшению его тока и т.д. Так как каждый последующий скачок напряжения на базе больше предыдущего (за счёт усилительных свойств транзистора), то этот процесс нарастает лавинообразно, и спустя небольшое время, исчисляемое долями микросекунды, транзистор  $T_1$  оказывается запертым. С этого момента цепь положительной обратной связи обрывается и лавинообразный процесс прекращается. Параметры схемы выбраны так, чтобы открывшийся транзистор  $T_2$  оказывается в режиме насыщения. Предположим, что состояние равновесия, когда оба транзистора открыты, продолжается некоторое время, в течение которого оба конденсатора заряжаются до одинакового напряжения (каждый по цепи  $+E_K$  - открытый эмиттерный переход -  $C$  -  $R_K$  -  $(-E_K)$ ). При быстром опрокидывании напряжение на конденсаторе практически не успевает измениться. Эти изменения становятся заметными по окончании лавинообразного процесса.

После запираания, к примеру, транзистора  $T_1$  (когда потенциал коллектора  $U_{K1}$  становится более отрицательным), конденсатор  $C_1$  продолжает дозаряжаться через эмиттерный переход  $T_2$ , и резистор

$R_{K1}$ , с постоянной времени  $\tau_1 = C_1 R_{K1}$  до напряжения, близкого к  $E_K$ . Ток заряда создаёт на резисторе  $R_{K1}$  напряжение, так что к концу заряда  $U_{K1} = -E_K$ . Конденсатор  $C_2$  через малое сопротивление насыщенного транзистора  $T_2$  фактически подключается между базой и эмиттером транзистора  $T_1$  и удерживает его закрытым. Так как  $T_1$  заперт, конденсатор  $C_2$  не может продолжать заряжаться: цепь, связывающая  $C_2$  через  $T_1$  с зажимом  $+E_K$  разомкнута. Теперь ток через конденсатор  $C_2$  проходит по другой цепи:  $+E_K$  - открытый  $T_2$  -  $C_2$  -  $R_{B1}$  -  $(-E_K)$  т.е. в направлении, противоположном первоначальному. Конденсатор  $C_2$  разряжается с постоянной времени  $\tau_1 = C_2 R_{K1}$ . Если бы этот процесс не прерывался, конденсатор перезарядился бы: напряжение на нём поменяло бы полярность и приняло значение, близкое к  $-E_K$ . Однако когда в процессе разряда напряжения на конденсаторе  $C_2$  ( $U_{C2} \approx U_{B1}$ ) станет близким к нулю, транзистор  $T_1$  отойдёт. С этого момента и до тех пор, пока оба транзистора остаются открытыми в схеме протекает новый лавинообразный процесс, во времени которого  $i_{K1}$  возрастает, а  $i_{K2}$  уменьшается. Процесс завершается запирающим  $T_2$ , т.е. обрывом цепи положительной обратной связи. Теперь  $T_2$  заперт, а  $T_1$  открыт - произошло новое опрокидывание схемы, после которого через открытый теперь транзистор  $T_1$  происходит заряд конденсатора  $C_2$  по цепи:  $+E_K$  - эмиттер-база  $T_1$  -  $C_2$  -  $R_{K2}$  -  $(-E_K)$  и перезарядка конденсатора  $C_1$  по цепи  $+E_K$  -  $T_1$  -  $C_1$  -  $R_{B2}$  -  $(-E_K)$ . Описанные процессы регулярно повторяются и мультивибратор устойчиво генерирует колебания. Рассмотрим временные диаграммы процессов, проходящих в рассмотренной схеме (рис.5.2). До момента  $t_1$  транзистор  $T_2$  заперт, а транзистор  $T_1$  открыт и насыщен. Этому состоянию соответствуют потенциалы баз и коллекторов транзисторов:  $U_{BН1} \approx 0$ ;  $U_{КН1} \approx 0$ ;  $U_{B2} > 0$ ;  $U_{К2} \approx -E_K$ . В результате разряда конденсатора  $C_1$  подключенного через насыщение транзистор  $T_1$  ко входу транзистора  $T_2$ , потенциал базы  $U_{B2}$  убывает. В момент  $t = t_1$  транзистор  $T_2$  отпирается и в схеме развивается лавинообразный процесс. При этом напряжение на всех электродах транзисторов начинает скачкообразно изменяться. Потенциал коллектора  $U_{К2}$  транзистора  $T_2$  возрастает почти до нуля. Соответственно возрастает потенциал базы  $U_{B1}$  транзистора  $T_1$  и он запирается. Потенциал коллектора  $U_{К1}$  закрывшегося транзистора  $T_1$  скачкообразно становится более отрицательным, на такую же величину понижается потенциал базы

$U_{\text{б}2}$  транзистора  $T_2$ . Вслед за скачкообразными начинаются сравнительно медленные процессы.

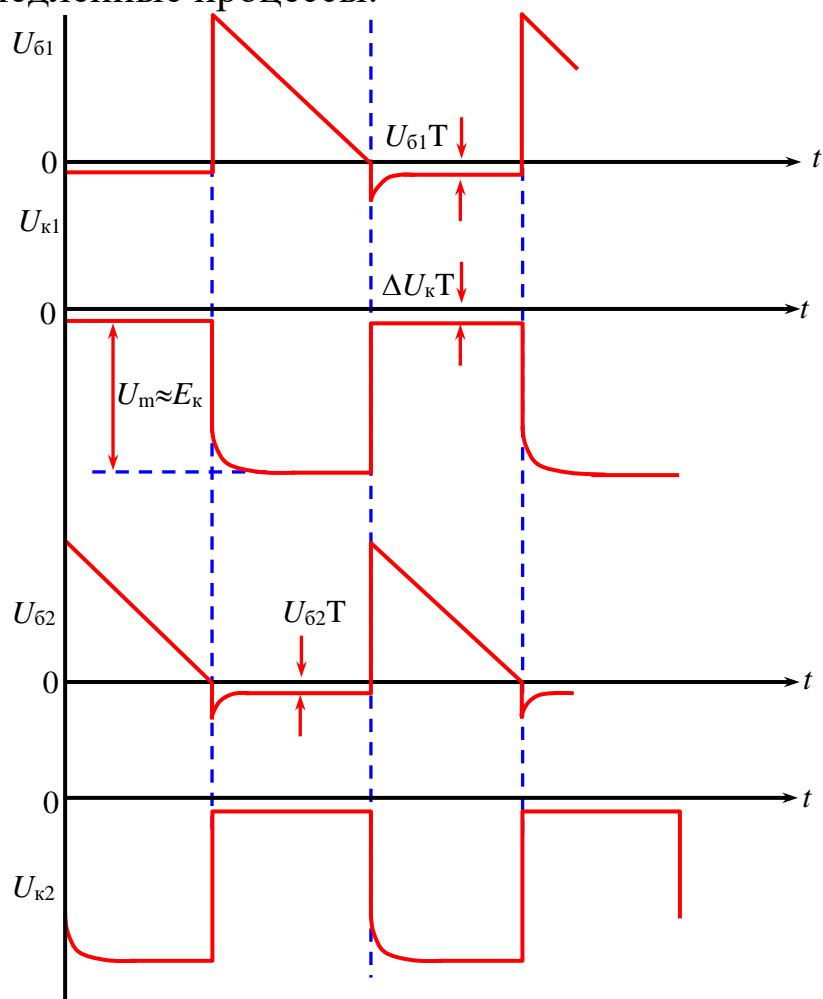


Рис.5.2. Временные диаграммы автоколебательного мультивибратора

Напряжение на коллекторе закрывшегося транзистора не сразу достигает максимального значения, так как по резистору  $R_{\text{к}1}$  в течение некоторого времени проходит убывающий со временем ток заряда конденсатора  $C_1$ . Этот ток протекает также через эмиттерный переход транзистора  $T_2$  и создаёт на нём убывающее по абсолютной величине напряжение с отрицательной полярностью на базе, которое добавляется к постоянному напряжению, выделяемому на этом переходе током базы открытого транзистора. Через насыщенный транзистор  $T_2$  происходит разряд конденсатора  $C_2$ , вследствие чего потенциал базы  $U_{\text{б}1}$  уменьшается. В момент  $t_2$  потенциал  $U_{\text{б}1}$  достигает нулевого уровня и транзистор  $T_1$  отпирается. С этого момента процессы в схеме и соответствующие этому временные диаграммы повторяются. Напряжения  $U_{\text{к}1}$  и  $U_{\text{к}2}$ , так же как и напряжения  $U_{\text{б}1}$  и  $U_{\text{б}2}$  сдвинуты на половину периода и имеют

одинаковую форму. Потенциал базы насыщенного транзистора  $T_1$  имеет небольшую отрицательную величину

$$U_{BH1} = i_B r_{BЭ} = -\frac{E_K R_{BЭ}}{R_{B1} + R_{BЭ}} \approx 0, \text{ так как } R_{B1} \gg r_{BЭ}. \quad (5.1)$$

Потенциал коллектора насыщенного транзистора  $T_1$  также имеет небольшую отрицательную величину, близкую к нулю.  $U_{KH1} = -(E_K - i_{KH1} R_{K1}) \approx 0$ , так как сопротивление насыщенного транзистора намного меньше  $R_K$ .

Потенциал коллектора закрытого транзистора  $T_2$  имеет отрицательную максимальную величину  $U_{кзан} = -(E_K - i_{к0} R_{к2}) \approx -E_{к1}$ , где напряжение, создаваемое на  $R_{к2}$  неуправляемым током  $I_{к0} R_{к2} \ll E_{к2}$ . Потенциал базы закрытого транзистора  $T_2$  определяется напряжением на конденсаторе  $C_1$ , присоединённом к коллектору открытого транзистора  $T_1$ . Начальное (максимальное) напряжение на этом конденсаторе равно  $E_K$ .

### Описание лабораторного стенда

Стенд выполнен в виде переносного настольного прибора.

Исследуемые схемы мультивибраторов, в виде съёмных панелей, крепятся двумя винтами к передней панели стенда. Здесь расположены:

1. Тумблер и сигнальная лампочка включения стенда.
2. Ручки регулирования напряжения питания  $E_K$  и напряжения смещения по базам транзисторов  $E_{см}$ .
3. Регулятор длительности входного запускающего импульса, который попадает с выхода дифференцирующей цепочки с резистором  $R_3$ . Эта цепочка включается тумблером В1.
4. Группа управления схем мультивибраторов "Генератор" с регулировкой частоты запускающих импульсов "Частота" и диапазонами 1,2,3,4,5, а также плавной регулировкой частоты.

Длительность запускающих импульсов положительной полярности  $\sqcup$  и  $\sphericalangle$  остrokонечных  $\sphericalangle$  импульсов отрицательной полярности  $\sqcup$  регулируется ручкой "Длительность". Амплитуда запускающих импульсов может регулироваться ручками "Амплитуда", причем импульсы положительной полярности в пределах от 0 до 24 В, а отрицательной полярности от 0 до 12 В. Вид запускающих импульсов определяется переключателем.

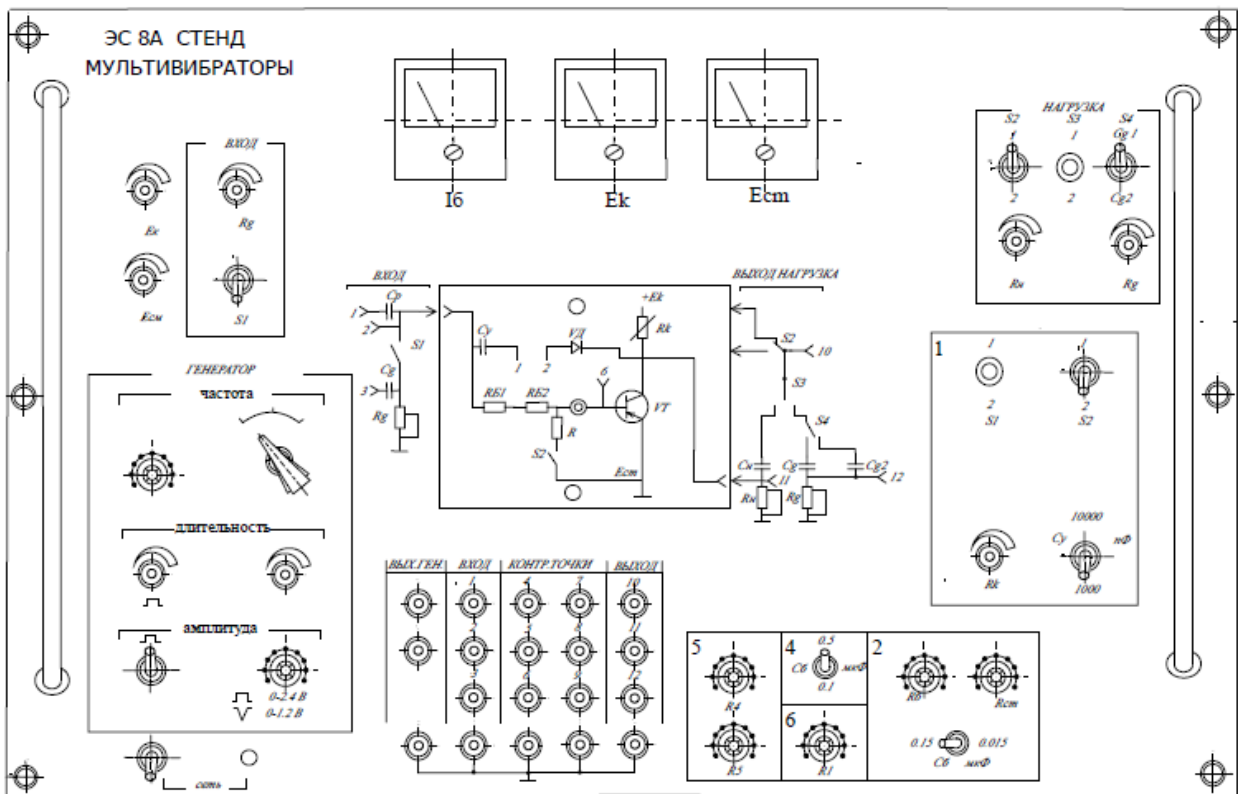


Рис.5.3. Передний вид лабораторного стенда

## Программа работ

### I. Исследование автоколебательного мультивибратора.

1. Прикрутить винтами панель 2.
2. Переключатель нагрузки В2 установить в положение I;  $C_0$  2 в положение 0,15 мкФ;  $R_{см}$  в среднее положение.
3. К выходу мультивибратора, между гнездом 10 и землей (гнездо 13-17) подключить осциллограф. Выставить значение  $E_{к}=10$  В;  $E_{см} = 5$  В. Для нескольких значений  $R_6$  определить на временных осциллограммах, снимаемых с экрана осциллографа: длительность выходного импульса  $t_{и}$ , длительность паузы  $t_{п}$ , длительность фронта импульса  $t_{ф}$ , амплитуду импульса  $U_m$ .
4. Для двух значений  $R_6$  определить частоту следования выходных импульсов, зная период  $T$ , по формуле  $F=1/T$ , а также зная длительность импульса  $t_{и}$  и значение  $C_6 = 0,15$  мкФ определить значение  $R_6$  по формуле  $t_{и} = 0,7R_6C_6$ . (2)
5. Повторить опыты пунктов 5 и 6 при значении  $C_6 = 0,015$  мкФ.
6. Для одного из значений  $R_6$  и  $C_6=0,15$  мкФ снять зависимость длительности выходного импульса  $t_{и}$  от значения  $E_{см}$ , т.е.  $t_{и}=f(E_{см})$  и построить таблицу.



$E_{см}$	5	7	9	10	
$t_{и}$					

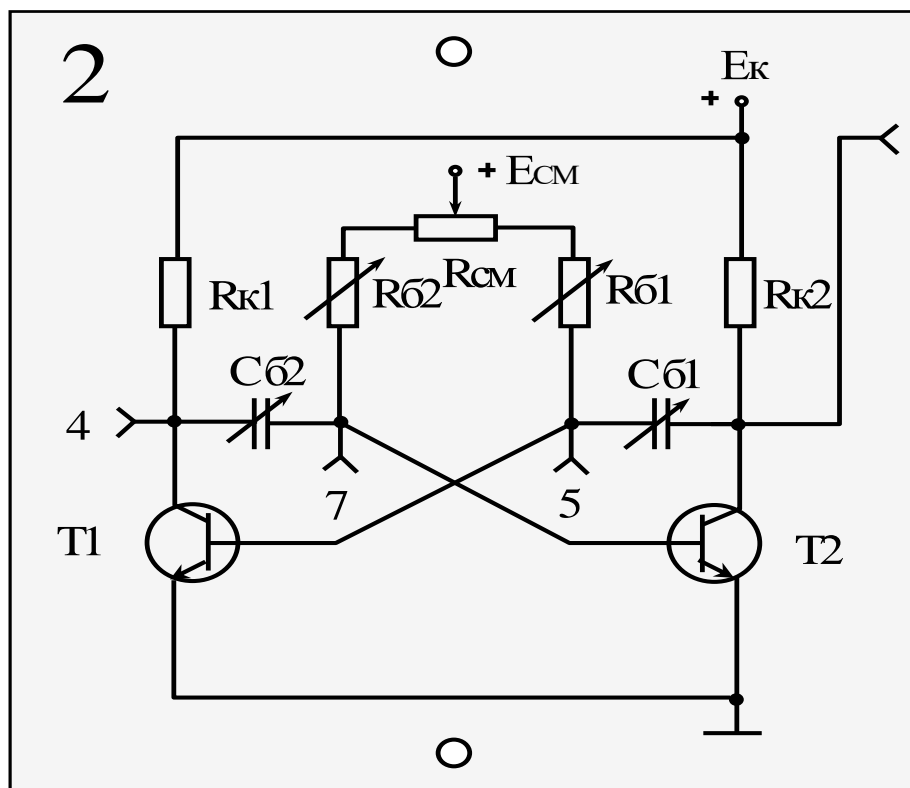


Рис.5.4. Схема автоколебательного мультивибратора

7. Установить значения  $E_{к} = 10$  В и  $E_{см} = 5$  В,  $C_{б} = 0,015$  мкФ. Для двух значений  $R_{б}$  зарисовать с экрана осциллографа временные диаграммы напряжения  $U_{эк}$  (выход 10) и напряжения  $U_{эб}$  (к точке 7).
8. Исследовать влияние нагрузки на параметры выходного напряжения автоколебательного мультивибратора. Для этого необходимо:
  - а) Переключатель ВЗ “Нагрузка” установить в положение 1, осциллограф подключить к гнезду 11 “Выход” и изменяя значение  $R_{н}$  зарисовать форму выходного импульса.
  - б) Для дифференцирования прямоугольного выходного импульса автоколебательного мультивибратора переключатель ВЗ группы “Нагрузка” установить в положение 2, осциллограф подключить к гнезду 12 “Выход”. Изменяя значение  $R_{д}$  убедиться, что выходной сигнал дифференцируется (преобразуется в два разно полярных остроконечных импульса).

- в) При некотором значении  $R_d$ , переключая значение  $C_d$  с помощью переключателя R4 группы “Нагрузка”, зарисовать с экрана осциллографа форму дифференцированных выходных импульсов мультивибратора.

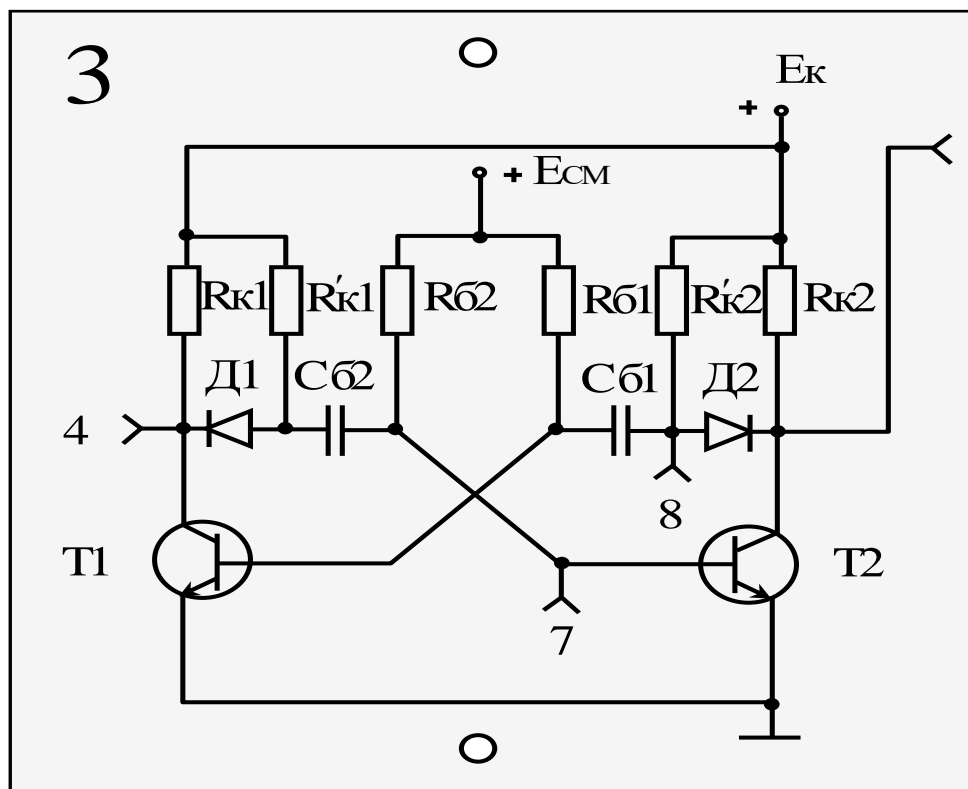


Рис.5.5. Панель схемы мультивибратора с корректирующими диодами

### Исследование автоколебательного мультивибратора с корректирующими диодами

1. Прикрутить винтами схему 3. установить значение  $E_k = 10$  В,  $E_{см} = 6$  В, осциллограф подключить к гнезду 10. Зарисовать форму выходного напряжения мультивибратора (выход 10) (к точке 7). Сравнить форму импульсов по пункту 9.
2. Снять съемную панель 3. Выключить стенд.

### Методические указания по выполнению работы

1. Временные диаграммы по пункту 9 и 11 должны быть построены на миллиметровке в одинаковом масштабе и показано не менее двух выходов сигналов.
2. Схемы выполняются карандашом или шариковой ручкой при помощи линейки.  
Условные обозначения должны соответствовать ГОСТу.

## Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Схемы исследуемых мультивибраторов.
2. Характеристику зависимости  $t_{и} = f(E_{см})$ .
3. Таблицу расчета параметров исследованных схем.
4. Временные диаграммы.

## Контрольные вопросы

1. Что представляет собой схема симметричного и несимметричного автоколебательного мультивибратора?
2. От каких параметров зависит частота выходного сигнала автоколебательного мультивибратора?
3. Какие параметры выходного импульса мультивибратора корректируют (улучшают) диоды в схеме 3?
4. Приведите примеры применения автоколебательных мультивибраторов.
5. Объясните принцип действия автоколебательного мультивибратора.
6. Покажите цепь заряда и цепь разряда времязадающих конденсаторов  $C_{б1}$  и  $C_{б2}$ .

Нарисуйте временные диаграммы напряжений на коллекторах и базах транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ИНТЕГРАТОРА И КОМПАРАТОРА НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

**Цель работы:** 1. Изучение принципа действия интегратора на ОУ; 2. Получение навыков по измерению параметров импульсных сигналов; 3. Изучение принципа действия компаратора на ОУ; 4. Получение навыков по измерению параметров импульсных сигналов.

## Теоретическая часть

**Схема интегратора.** Если в схему добавить конденсатор в обратную связь, то получится интегратор. Это еще одно устройство, в котором используются операционные усилители.

Схема интегратора подобна инвертирующему усилителю, с добавлением емкости в обратную связь. Это приводит к зависимости работы системы от частоты сигнала на входе.

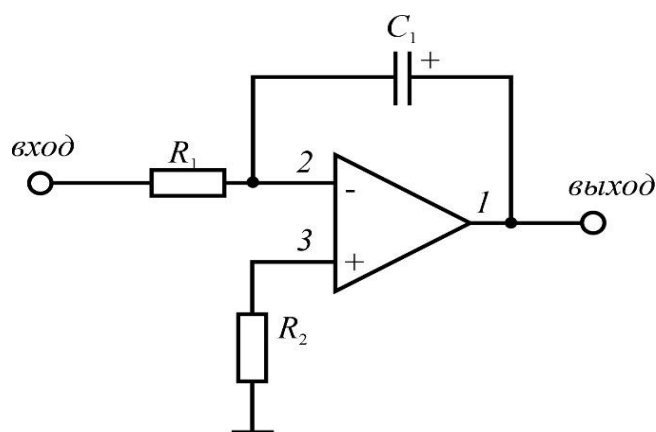


Рис.6.1. Схема интегратора

Интегратор характеризуется интересной особенностью перехода между сигналами: сначала прямоугольный сигнал преобразуется в треугольный, далее он переходит в синусоидальный. Расчет коэффициента усиления проводится по формуле:

$$k = -\frac{1}{j\omega R_1 C_1} \quad (6.1)$$

В этой формуле переменная  $\omega = 2\pi f$  повышается с возрастанием частоты, следовательно, чем больше частота, тем коэффициент усиления меньше. Поэтому интегратор может действовать в качестве активного фильтра низких частот.

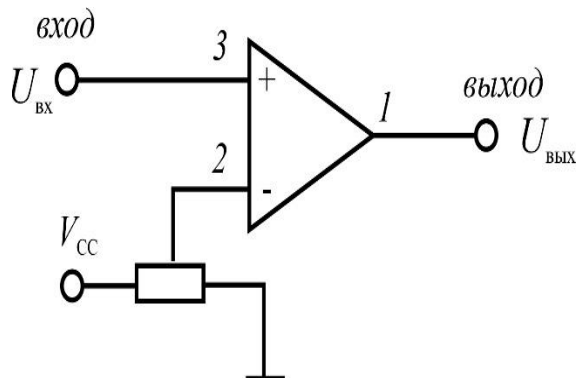


Рис. 6.2. Схема компаратора

**Аналоговый компаратор.** Устройство компаратора сравнивает два значения напряжения и переводит сигнал в низкое или высокое значение на выходе, в зависимости от состояния напряжения. Эта система включает в себя цифровую и аналоговую электронику.

Особенностью этой системы является отсутствие в основной версии обратной связи. Это означает, что сопротивление петли очень велико. На плюсовой вход подается сигнал, а на минусовой вход подается основное напряжение, которое задается потенциометром. Ввиду отсутствия обратной связи коэффициент усиления стремится к бесконечности.

При превышении напряжения на входе величины основного опорного напряжения на выходе получается наибольшее напряжение, которое равно положительному питающему напряжению. Если на входе напряжение будет меньше опорного, то выходным значением будет отрицательное напряжение, равное напряжению источника питания.

### **Описание лабораторного стенда**

Лабораторный стенд ЭС-23 позволяет исследовать характеристику самого операционного усилителя (ОУ), а также схемы примыкания ОУ. На лицевой панели стенда имеются: вольтметры постоянного тока для измерения входного и выходного сигналов, два источника сигналов: «ист.1», «ист.2», с возможностью регулирования амплитуды сигнала и его знака, сменные платы со схемами применения ОУ, секундомер с цифровой индикацией.

Для каждой исследуемой схемы имеются возможности переключения ( $S_1$ ) коэффициентов передачи, величин ёмкостей ( $C_1$ ,  $C_2$ ), время интегрирования; для подачи сигналов от внешних устройств и для наблюдения выходных сигналов имеются специальные гнёзда.

Для исследования той или иной схемы ОУ соответствующие платы крепятся двумя крепёжными винтами. В случае подключения на вход ОУ источников ист.1, ист.2 – это указано непосредственно на плате. Вольтметр постоянного выходного напряжения подключается к выходу исследуемых схем, автоматически указывая полярности измеряемых сигналов.

Секундомер с цифровой индикацией автоматически подключается только при исследовании схемы интегратора.

### **Программа работ**

#### *I. Исследование интегратора на ОУ.*

- 1.1. Снять зависимость  $U_{вых} = f(t)$  за 20 секунд при ёмкостях  $C_1$ ,  $C_2$  для значений  $U_{вх} = +0,8В$ .
- 1.2. Снять ту же зависимость за 40 секунд.
- 1.3. Сравнить с расчётными значениями.
- 1.4. Зарисовать форму выходных импульсов интегратора при однополярном входном импульсе и двухполярном. Измерить длительность прямого хода и обратного.

#### *II. Исследование компаратора на ОУ.*

2.1. Снять зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$  по инвертирующему входу при постоянном сигнале по неинвертирующему входу.

2.2. Снять зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$  по неинвертирующему входу при постоянном сигнале по инвертирующему входу.

2.3. Снять зависимость длительностей положительного и отрицательного импульсов функции  $U_{вх}$  по инвертирующему входу при синусоидальном сигнале по неинвертирующему входу

### Методические указания

К п.1.1. Установить плату 5.2. Включить стенд. Нажать кнопку  $S_2 \Rightarrow C_1$  (20 секунд). Включить секундомер кнопкой  $S_1=20$  секунд.

$U_{вых}$  измерять по выходному вольтметру, одновременно отмечая время по секундомеру. Повторить то же при ёмкости  $C_2$  (400 мкф).

К п.1.2. Снять эти же зависимости при включении интегратора на 40 секунд (кнопка  $S$  1-40 секунд). Отключить стенд.

К п.1.3. Для расчёта значения  $U_{вых}$  воспользоваться формулой:

$$U_{вых} = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{вх} dt = \frac{U_{вх(в)} * t(сек)}{R(нОм) * C(нкф)} \quad (6.2)$$

$$U_{вх} = 0,82 \text{ В} \quad C_1 = 20 \text{ мкф}$$

$$R = 0,82 \text{ МОм} \quad C_2 = 40 \text{ мкф}$$

К п.1.4. Установить плату 5.1 (рис.6.3). Включить стенд. Зарисовать форму  $U_{вых}$ . Длительность измерять с помощью меток на осциллографе.

Проделать то же при  $S_1$ . Отключить стенд.

### Компаратор

К п.1.1. Установить плату 1.1 (рис.6.4). включить стенд. Зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$  для ИУ снимать изменения  $U_{ист.1}$  от -3В до +3В и обратно (через 0,5В).  $U_{ист.2} = const: 0, -1, -2, +1, +2В$ .

К п.1.2.  $U_{вых} = f(U_{вх})$  для НУ снимать, изменяя  $U_{ист.2}$  от -3В до +3В и обратно.  $U_{ист.1} = const: 0, -1, -2, +1, +2В$ . Величины  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  измерять по приборам самого стенда.

К п.1.3. Длительности импульсов измерять с помощью меток на осциллографе. Амплитуда синусоидального сигнала  $U_{ист.2_m} = 785_m \text{ В}$ ; частоты 1000 Гц. Величину  $U_{вх.ист.1}$  измерить по входному вольтметру. Отключить стенд.

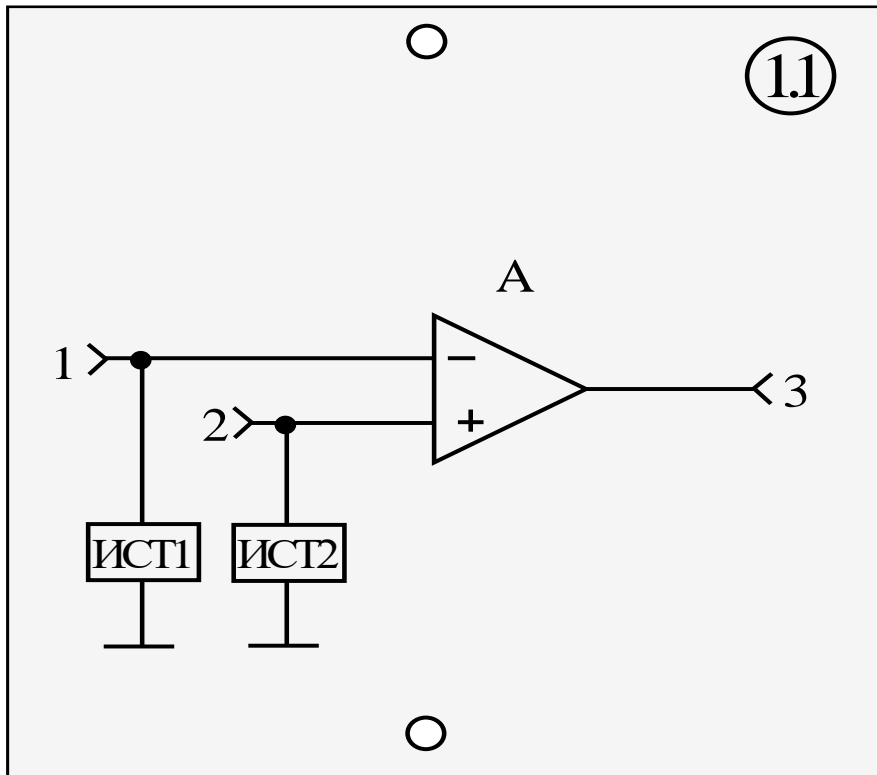


Рис.6.3. Панель компаратора на основе ОУ

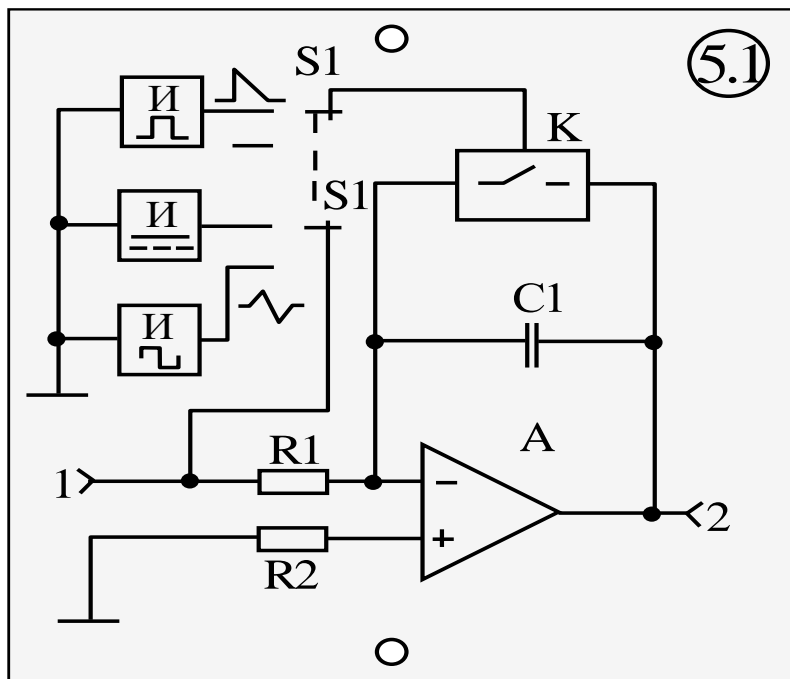


Рис.6.4. Панель интегратора на основе ОУ

### Содержание отчёта

В отчёте должны быть представлены результаты проведённых опытов, схемы исследований, расчётные данные.

1. Зависимости  $U_{вых} = f(t)$  для интегратора.

2. Входные импульсы интегратора при двух видах входного сигнала.
3. Схемы исследуемых устройств применения ОУ.
4. Характеристики компаратора  $U_{вых} = f(U_{вх})$  для ИУ и для НУ (п.1.1,1.2).
5. Таблица значений длительности положительного и отрицательного импульсов в функции  $U_{вх}$  для ИУ при синусоидальном входном напряжении.
6. Схемы исследуемых устройств применения ОУ.

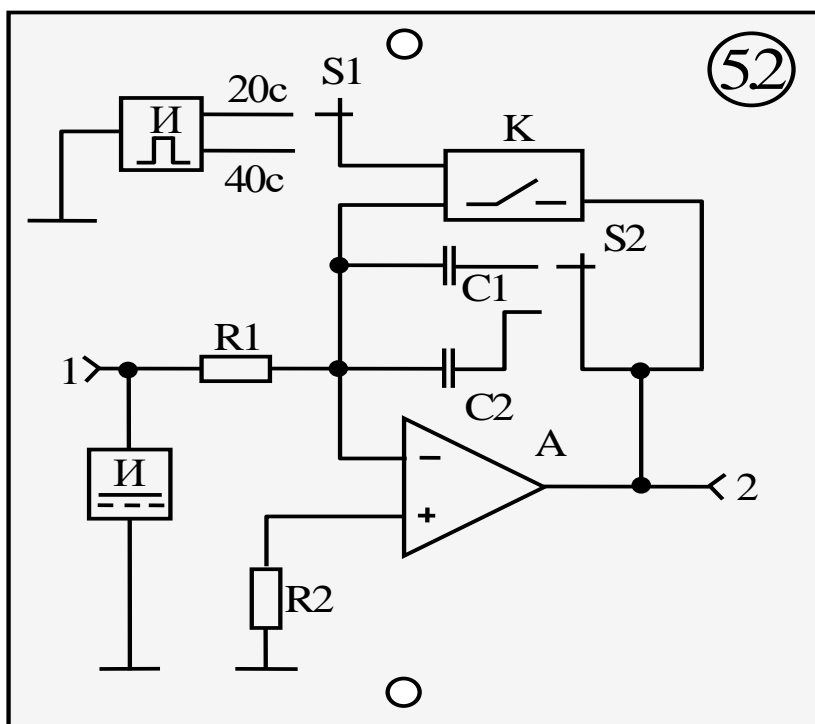


Рис.6.5. Панель интегратора на основе ОУ

### Контрольные вопросы

1. Что такое интегратор на ОУ? Привести схему.
2. Области применения интегратора.
3. Предпосылки применения ОУ в импульсных устройствах.
4. Объясните принцип действия интегратора, приведите формулу для  $U_{вых}$  при постоянном входном сигнале.
5. Объясните применение интегратора в схеме генератора линейно-изменяющегося напряжения. Приведите схему и диаграммы работы.
6. Объясните применение интегратора в схеме генератора треугольного сигнала.
7. Приведите схему и диаграммы работы компаратора.



8. Что такое компаратор на ОУ? Привести схему.
9. Области применения ОУ.
10. Приведите формулу коэффициента усиления компаратора.
11. Объясните принцип действия компаратора на ОУ, характеристики  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ .
12. Приведите временные диаграммы работы при синусоидальном сигнале на другом входе.
13. Приведите схему и диаграммы работы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ТРИГГЕРОВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

**Цель работы:** Изучение принципа действия несимметричного триггера на ОУ.

### Теоретическая часть

Наряду с простейшей схемой компаратора широко используется схема на ОУ с положительной обратной связью, называемая триггером Шмитта. Охват ОУ петлей положительной обратной связи и его работа в режиме насыщения, когда выходное напряжение может принимать только два значения ( $+U_{\text{вых max}}$  и  $-U_{\text{вых max}}$ ) приводят к появлению на передаточной характеристике триггера Шмитта петли гистерезиса и двух значений напряжения входного сигнала, в которых происходит опрокидывание схемы.

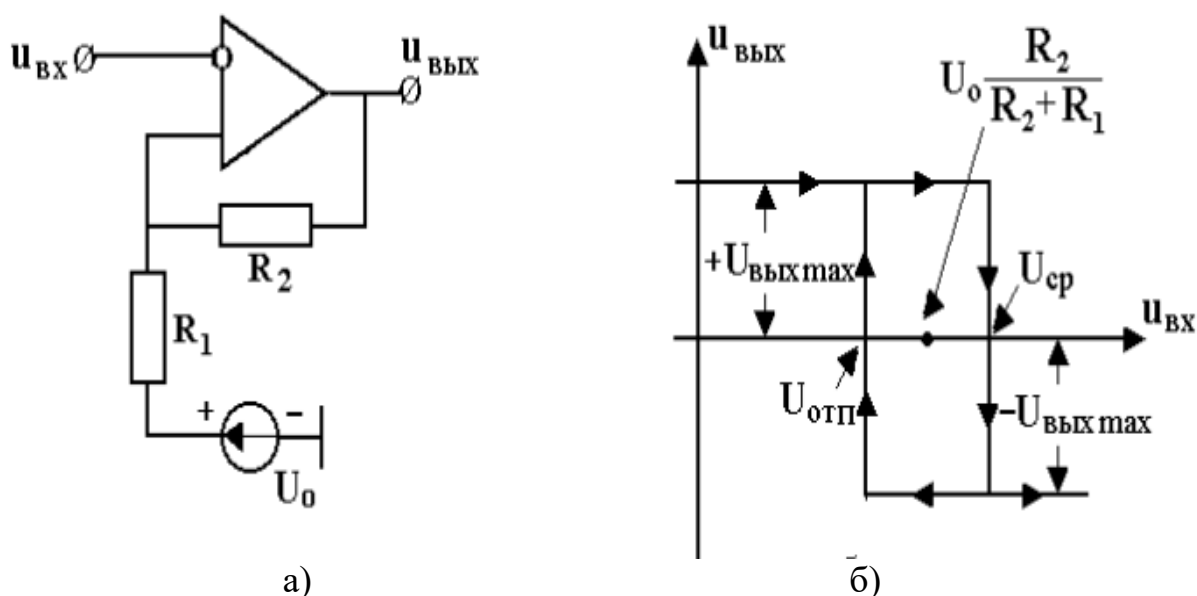


Рис.7.1. Схема (а) и передаточная характеристика (б) триггера Шмитта

В схеме, приведенной на рис.7.1,а, входное напряжение подается на инвертирующий вход ОУ. Опорным в этой схеме служит сумма напряжений, подаваемых на неинвертирующий вход с выхода ОУ через делительную цепочку резисторов  $R_1$  и  $R_2$  (по цепи положительной обратной связи) и от дополнительного источника  $U_0$ .

Величина опорного напряжения в схеме рис.7.1, а может быть определена с использованием принципа суперпозиции. Компонента этого напряжения, поступающая с выхода ОУ, определяется при условии, что напряжение дополнительного источника равно нулю ( $U_0=0$ ). Компонента напряжения, обусловленная источником  $U_0$ , определяется при условии заземления выходной клеммы ОУ. Тогда величина опорного напряжения

$$U_{оп} = u_{вых} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (7.1)$$

При напряжении на выходе ОУ, равном  $+U_{вых\max}$ , согласно соотношению (7.1) на неинвертирующий вход подается напряжение

$$U_{ср} = U^0 + \frac{U_{вых\max} - U_0}{R_1 + R_2} R_1, \quad (7.2)$$

которое называется напряжением срабатывания. При выходном напряжении, равном  $-U_{вых\max}$ , на неинвертирующем входе ОУ напряжение равно

$$U_{отп} = U^0 - \frac{U_{вых\max} - U_0}{R_1 + R_2} R_1, \quad (7.3)$$

которое называется напряжением отпускания. Напряжения срабатывания и отпускания – это значения, при которых происходит опрокидывание триггера Шмитта со схемой на рис. 7.1, а.

Передаточная характеристика триггера Шмитта со схемой рис.7.1, а представлена на рис.7.1, б. Ее ход может быть объяснен следующим образом. Пусть напряжение на выходе ОУ равно  $+U_{вых\max}$ , что обеспечивается при величине входного напряжения меньше напряжения срабатывания. При повышении входного напряжения положительное напряжение  $U_{вых\max}$  на выходе ОУ будет сохраняться до тех пор, пока напряжение  $U_{вх}$  не сравняется с напряжением срабатывания, после чего на выходе ОУ напряжение становится отрицательным и равным  $-U_{вых\max}$ . Эта величина выходного напряжения не изменяется при дальнейшем увеличении входного напряжения. При опрокидывании схемы напряжение на неинвертирующем входе также скачком изменится и станет равным напряжению отпускания  $U_{отп}$ .

При обратном изменении входного напряжения, т.е. при его уменьшении, напряжение на выходе ОУ будет положительным лишь после того, как  $U_{вх}$  сравняется с напряжением отпущения и произойдет опрокидывание схемы. Выходное напряжение, равное  $+U_{вых\ max}$ , сохраняется при дальнейшем уменьшении выходного сигнала.

Таким образом, передаточная характеристика триггера Шмитта имеет гистерезис, ширина которого при схеме рис. 7.1, а равна

$$U_{cp} - U_{отп} = \frac{2R_1}{R_1 + R_2} U_{вых.max}, \quad (7.4)$$

а напряжение, равноудаленное от напряжения срабатывания и напряжения отпущения, т.е. соответствующее центру петли гистерезиса

$$U_{центр} = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (7.5)$$

### Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд ЭС-23 позволяет исследовать характеристики самого операционного усилителя (ОУ), а также схемы применения ОУ. На лицевой панели стенда имеются: вольтметры постоянного тока для изменения входного и выходного сигналов. Два источника сигналов: “ист.1”, “ист.2”, с возможностью регулирования амплитуды сигнала и его знака, сменные платы со схемами применения ОУ, секундомер с цифровой индикацией.

Для каждой исследуемой схемы имеются возможности переключения (S1) коэффициентов передачи, величин емкостей (C1, C2), времени интегрирования. Для подачи сигналов от внешних устройств и для наблюдения выходных сигналов имеются специальные гнезда.

Для исследования той или иной схемы ОУ соответствующие платы крепятся двумя крепежными винтами. В случае подключения на вход ОУ источников ист.1, ист.2 – это указано непосредственно на плате. Вольтметр постоянного напряжения подключается к выходу исследуемых схем, автоматически указывая полярность измеряемых сигналов.

Секундомер с цифровой индикацией автоматически подключается только при исследовании схемы интегратора.

### Программа работ

#### I. Исследование ОУ в схеме триггера (рис.7.1)

1.1. Снять характеристику передачи  $U_{\text{ВЫХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$  триггера на ОУ при двух значениях  $R_{\text{ос}}(R_3-R_4)$  на постоянном сигнале по инвертирующему входу.

1.2. Снять характеристику передачи при двух значениях  $R_{\text{ос}}$  на постоянном сигнале по инвертирующему входу 2.

1.3. Замерить фронты выходного сигнала при передаче на вход 1 синусоидального сигнала для значения  $R_{\text{ос}}=R_4$ .

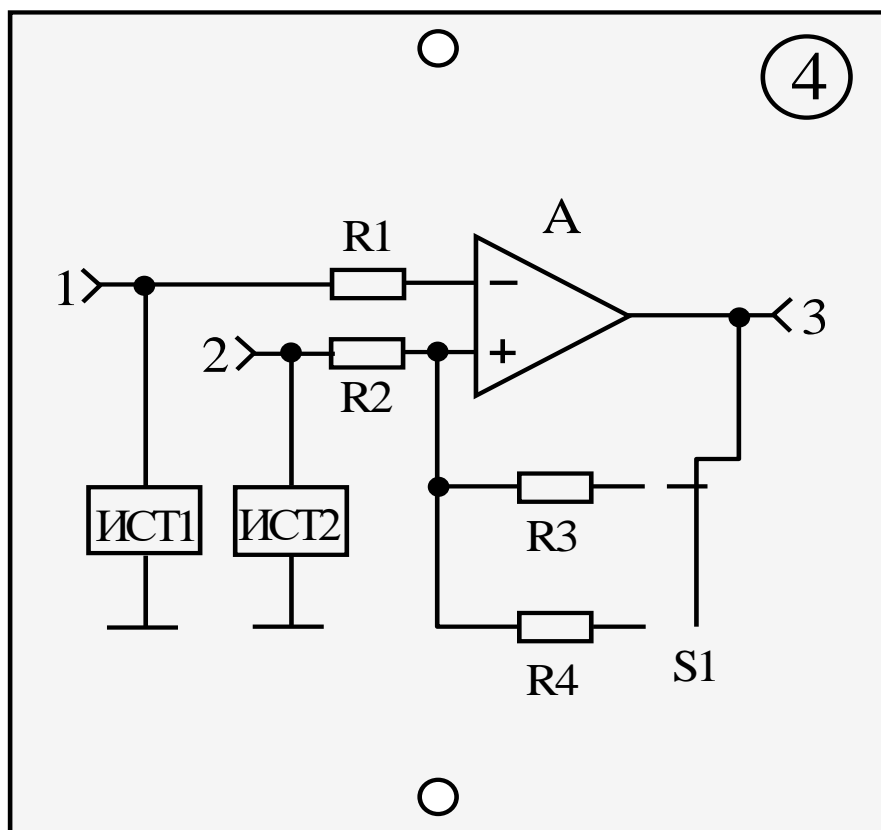


Рис.7.2. Панель триггера Шмитта

### Методические указания

К п.1.1. Установить плату 4 (рис.7.2). Включать стенд:

а) включив кнопкой S1 значение  $R_{\text{ос}}=R_4$ , подать постоянное напряжение ист.1 “\_\_\_”.  $U_{\text{вх}}$  менять от -3 В до +3 В и обратно, выходное напряжение регистрировать по выходному вольтметру стенда;  $U_{\text{ист2}} = 0$  В; 1В;

б) повторить те же самые операции при  $R_{\text{ос}}=R_3$ . Те же самые операции провести по входу 2.  $U_{\text{ист.1}} = 0$  В; 2 В.

К п.1.3. Входной синусоидальный сигнал подать от ист.1 “~”; амплитуду входного сигнала  $U_{\text{ист.2}}$  выставить  $U_{\text{вх2}}=0$  В;  $R_{\text{ос}} = R_4$ . Время фронта замерить на экране осциллографа, включив “метки” в ждущем режиме работы. Выключить стенд, снять плату 4.

## Контрольные вопросы

1. Что такое триггер? Что такое ОУ?
2. Нарисовать схему триггера на ОУ.
3. Объясните принцип работы схемы триггера Шмитта.
4. Объяснить принцип действия триггера на ОУ, его передаточную характеристику.
5. Дать расчетные формулы для вычисления периода выходных сигналов при  $Q=2$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ МУЛЬТИВИБРАТОРОВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

**Цель работы:** 1. Изучение принципа действия автоколебательного мультивибратора на ОУ; 2. Изучение принципа действия ждущего мультивибратора на ОУ.

### Теоретическая часть

Схема симметричного мультивибратора на О.У. приведена на рис. 8.1, а.

Её основой служит компаратор на О.У. Автоколебательный режим работы создается благодаря подключению к инвертирующему входу О.У. времязадающей цепи из конденсатора  $C$  и резистора  $R$ . Принцип действия схемы иллюстрируют временные диаграммы, приведенные на рис.8.1, б.

Предположим, что до момента времени  $t_1$  напряжение между входами О.У.  $U_0 > 0$ . Это определяет напряжение на выходе О.У.  $U_{вых} = -U_{выхмаx}^-$  и на его не инвертирующем входе  $U(t) = -\chi U_{выхмаx}^-$ , где  $\chi = R_1 / (R_1 + R_2)$  - коэффициент передачи цепи положительной обратной связи. Наличие на выходе схемы напряжения  $-U_{выхмаx}^-$  обуславливает процесс заряда конденсатора  $C$  через резистор  $R$ . В момент времени  $t_1$  экспоненциально изменяющееся напряжение на инвертирующем входе ОУ достигает напряжения на не инвертирующем входе  $-\chi U_{выхмаx}^-$ . Напряжение  $U_0$  становится равным нулю, что вызывает изменение полярности напряжения на выходе ОУ:  $U_{вых} = -U_{вых.маx}^+$ . Напряжение  $U(+)$  изменяет знак и становится равным  $-\chi U_{вых.маx}^+$ , что соответствует  $U_0 < 0$  и  $U_{вых} = U_{выхмаx}^+$ . С момента времени  $t_1$  начинается перезаряд конденсатора от уровня напряжения  $-\chi U_{выхмаx}^-$ . Конденсатор стремится

перезарядиться в цепи с резистором  $R$  до уровня  $+\chi U_{\text{вых.мах}}^+$ . В момент времени  $t_2$  напряжение на конденсаторе достигает значения  $\chi U_{\text{вых.мах}}^+$ . Напряжение  $U_0$  становится равным нулю, что вызывает переключение О.У. в противоположное состояние. Далее процессы в схеме протекают аналогично. Частота следования импульсов симметричного мультивибратора

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{u1} + t_{u2}} = \frac{1}{2t_u} \dots t_u = \tau \ln \frac{\chi U_{\text{вых.мах}}^- + U_{\text{вых.мах}}^+}{U_{\text{вых.мах}}^+ + \chi U_{\text{вых.мах}}^-}, \quad f = \frac{1}{2\tau \ln \frac{\chi U_{\text{вых.мах}}^- + U_{\text{вых.мах}}^+}{U_{\text{вых.мах}}^+ + \chi U_{\text{вых.мах}}^-}}$$

Если принять  $U_{\text{вых.мах}}^+ = U_{\text{вых.мах}}^-$ , то  $t_u = \tau \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$ ,  $f = \frac{1}{2\tau \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)}$

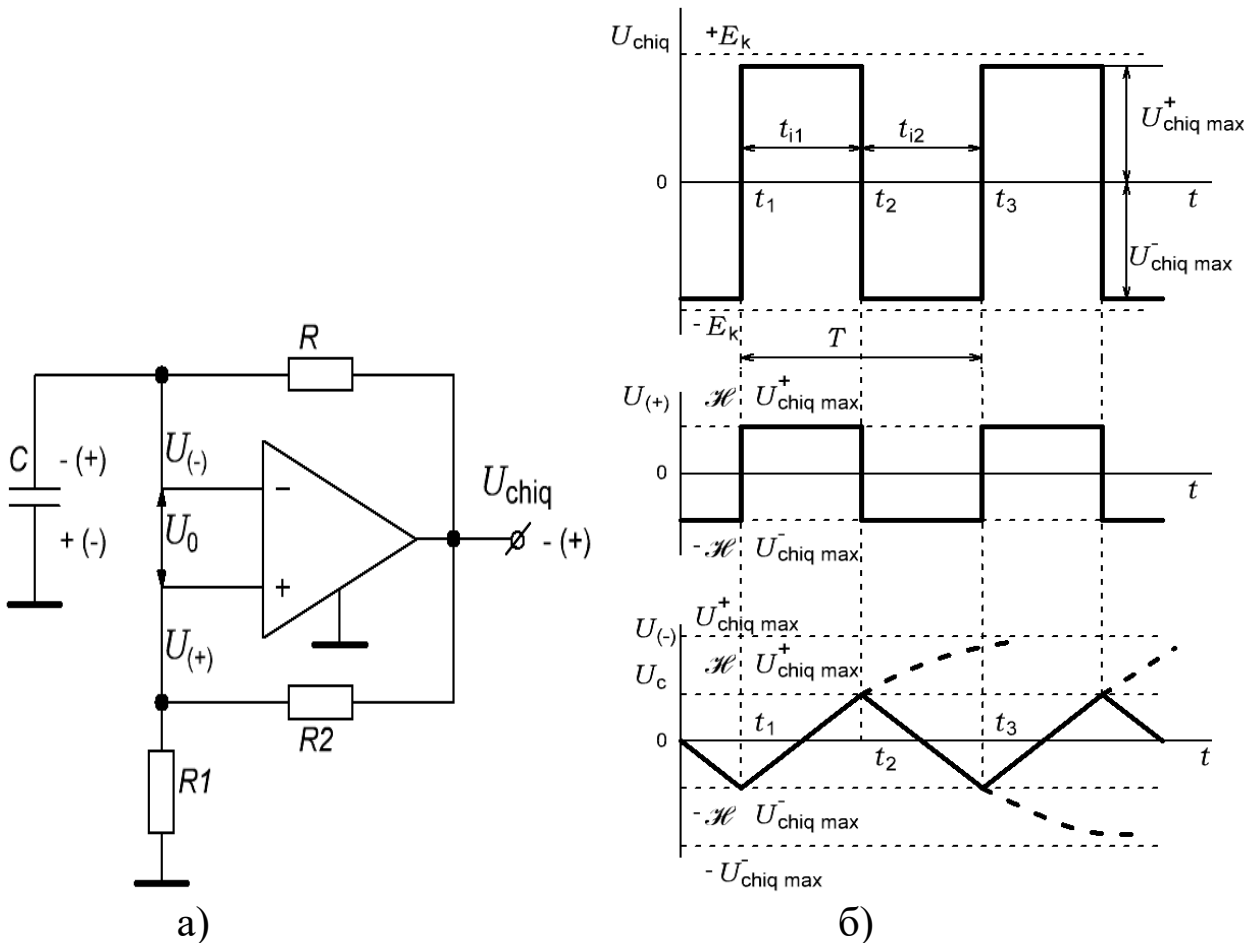


Рис.8.1. Схема симметричного мультивибратора на ОУ (а) и его временные диаграммы (б)

### Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд ЭС-23 позволяет исследовать характеристики самого операционного усилителя (ОУ), а также схемы применения ОУ. На лицевой панели стенда имеются: вольтметры постоянного

тока для изменения входного и выходного сигналов. Два источника сигналов: “ист.1”, “ист.2”, с возможностью регулирования амплитуды сигнала и его знака, сменные платы со схемами применения ОУ, секундомер с цифровой индикацией.

Для каждой исследуемой схемы имеются возможности переключения (S1) коэффициентов передачи, величин емкостей (C1, C2), времени интегрирования. Для подачи сигналов от внешних устройств и для наблюдения выходных сигналов имеются специальные гнезда.

Для исследования той или иной схемы ОУ соответствующие платы крепятся двумя крепежными винтами. В случае подключения на вход ОУ источников ист.1, ист.2 – это указано непосредственно на плате. Вольтметр постоянного напряжения подключается к выходу исследуемых схем, автоматически указывая полярность измеряемых сигналов.

Секундомер с цифровой индикацией автоматически подключается только при исследовании схемы интегратора.

### **Программа работ**

Исследование ОУ в схемах мультивибратора

1. Зарисовать форму выходных импульсов мультивибратора на ОУ в автоколебательном режиме (плата 2.2, рис.8.2)
2. Определить частоту выходных импульсов автоколебательного мультивибратора при двух значениях емкости C (C1, C2).
3. Определить длительность импульсов выходного сигнала в мультивибраторе на ОУ в ждущем режиме работы (плата 2.1) при двух значениях C (C1, C2).
4. Рассчитать значения периода выходных импульсов в автоколебательном мультивибраторе на ОУ.

### **Методические указания**

К п.1. Установить плату 2.2 (рис.8.4), включить стенд. Подключив к выходу 3 осциллограф, зарисовать выходной сигнал в точках 2 и 3. Кнопкой S1 включаем C1. По меткам измеряем длительности паузы и импульса, затем то же делаем при емкости C2. Выключить стенд, снять плату 2.2.

К п.2. Для определения частоты выходных импульсов с помощью осциллографа определяется период выходных сигналов.

К п.3. Установить плату 2.1 (рис.8.3), включить стенд. Подключив к выходу 3 осциллограф, замеряем с помощью меток длительность

импульсов (положительного и отрицательного) для двух значений  $C$ . (Кнопкой  $S1$ ). Кнопка  $S2$  служит для снятия запускающих импульсов от внутреннего генератора.

К п.4. Длительности положительного и отрицательного импульсов определяются по расчетной формуле:  $t_u = CR_{TB} \ln\left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)$ . Период генерирующих импульсов равен  $2T$ .

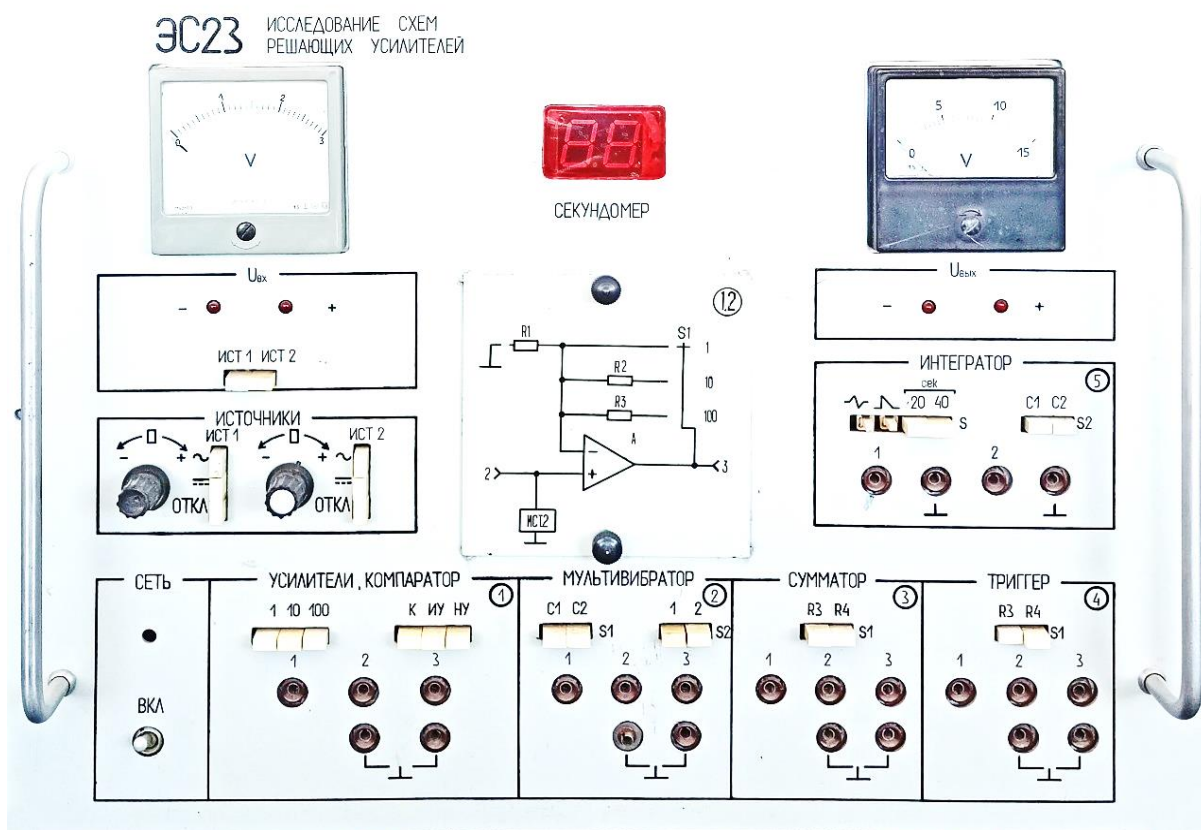


Рис.8.2. Лицевая панель стенда

### Содержание отчета

В отчете должны быть представлены результаты проведенных опытов, схемы исследований, расчетные данные.

1. Характеристики мультивибратора.
2. Таблица расчетных и экспериментальных значений периода выходных импульсов для двух значений емкости ОС мультивибратора.
3. Схемы мультивибраторов на ОУ.

### Контрольные вопросы

1. Что такое триггер? Что такое ОУ?
2. Нарисовать схему триггера на ОУ.
3. Что такое мультивибратор?



4. Нарисовать схему автоколебательного мультивибратора на ОУ.
5. Нарисовать схему ждущего мультивибратора на ОУ.
6. Чему равна частота следования импульсов симметричного мультивибратора?
7. Объяснить принцип действия триггера на ОУ, его передаточную характеристику.
8. Объяснить принцип действия автоколебательного мультивибратора на ОУ, привести схему и временные диаграммы работы.
9. Дать расчетные формулы для вычисления периода выходных сигналов при  $Q=2$ .
10. Как изменить скважность выходных импульсов мультивибратора?
11. Объяснить принцип действия ждущего мультивибратора, привести схему и диаграммы работы.
12. Назовите другие способы перевода автоколебательного мультивибратора в ждущий режим.

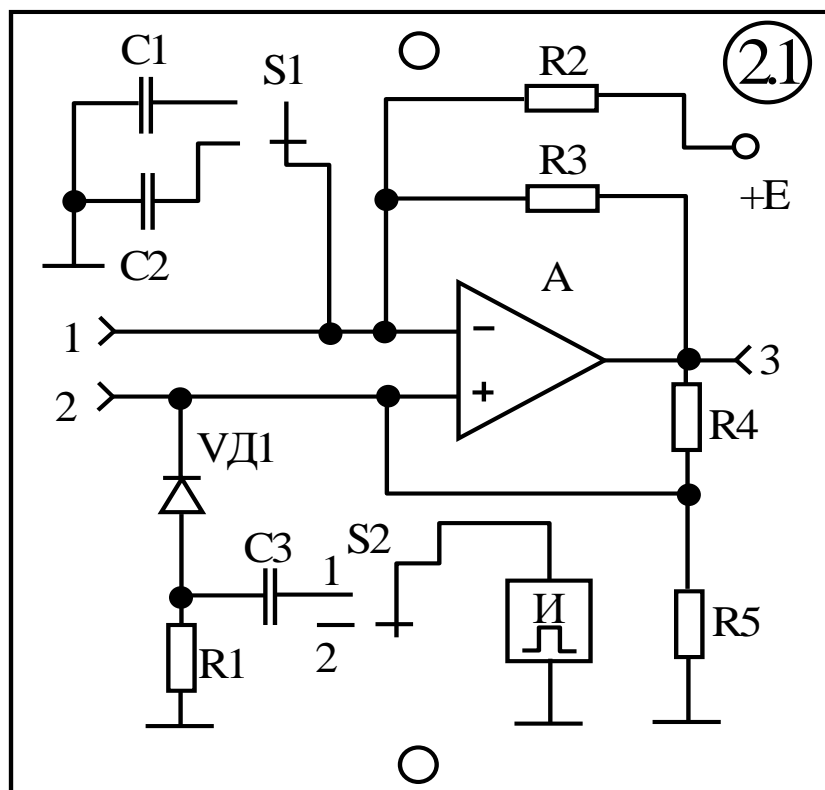


Рис.8.3. Панель схемы ждущего мультивибратора

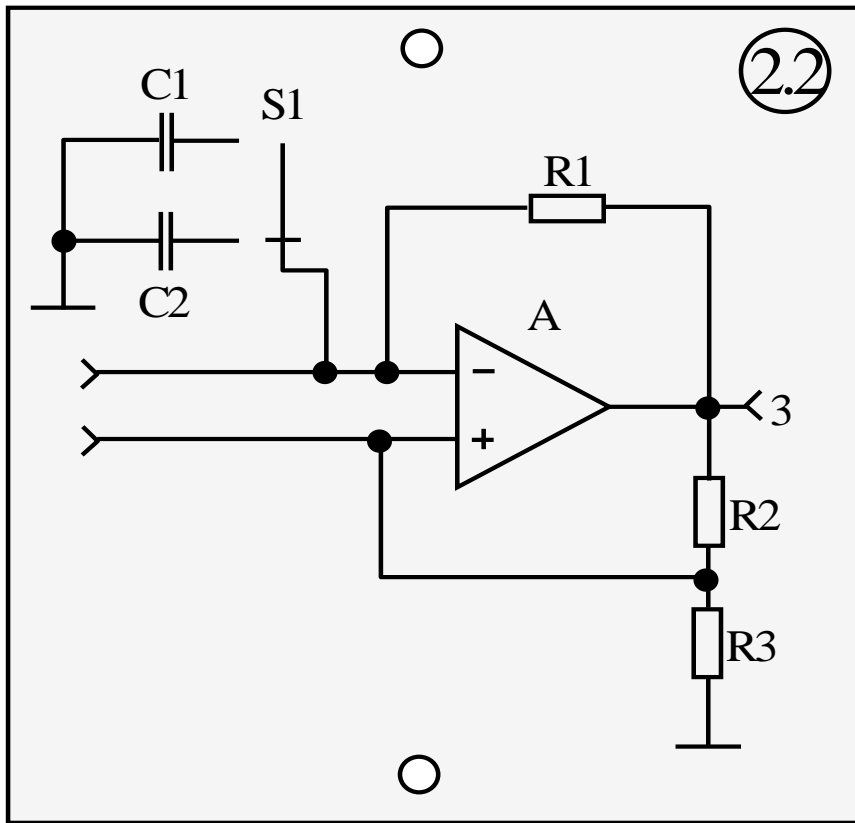


Рис.8.4. Панель схемы автоколебательного мультивибратора

## Литература

### 1. Основная литература

1. Paul Horowitz, Winfield Hill The art of electronics Third Edition Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-80926-9 Hardback, 2015 – 1225p
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники Издание 5-е, переработанное. -М: Мир 2001.- 608 с.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12- изд. Том I, II: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008.
4. Павлов, В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов. / В.Н. Павлов, В.Н. Ногин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 288 с.
5. Фролов В.А. Электронная техника. В двух частях. Часть 2. Схемотехника электронных схем. Учебное пособие – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015.

### 2. Дополнительная литература

1. Христич В.В. Лабораторный практикум по курсу “Электроника”. – Таганрог: ТТИ, 2009.
2. Панфилов Д.И. и др. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях (в 2-х томах). – 2001.
3. Шарапов А.В. Микроэлектроника: Учебное пособие. — Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2007. - 158 с.
4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов. 2-е издание. -М: Альянс, 2014.- 496 с.
5. Ларин А. Л. Аналоговая электроника. Учебное пособие. –М.: МФТИ, 2013. -268 с.
6. Уве Наундорф. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование. –М.: Техносфера, 2008.

### 3. Информационный источник

1. [www.gov.uz](http://www.gov.uz) – Правительственный портал Республики Узбекистан.
2. [www.lex.uz](http://www.lex.uz) – Национальная база данных законодательства Республики Узбекистан.
3. [www.ziyoucom.uz](http://www.ziyoucom.uz)
4. <http://www.Interactive.com>

## Содержание

Введение.....	3
<b>Лабораторная работа №1.</b> Исследование однокаскадного усилителя на основе биполярного транзистора.....	4
<b>Лабораторная работа №2.</b> Исследование однокаскадного усилителя на основе полевого транзистора .....	11
<b>Лабораторная работа №3.</b> Исследование инвертирующего и неинвертирующего усилителя на ОУ.....	16
<b>Лабораторная работа №4.</b> Исследование электронных ключей на транзисторах.....	28
<b>Лабораторная работа № 5.</b> Исследование схемы автоколебательного мультивибратора с коллекторно-базовыми связями.....	34
<b>Лабораторная работа №6.</b> Исследование схем интегратора и компаратора на операционном усилителе.....	43
<b>Лабораторная работа № 7.</b> Исследование схем триггеров на операционных усилителях.....	49
<b>Лабораторная работа №8.</b> Исследование схем мультивибраторов на операционных усилителях.....	53
Литература .....	59

Редактор Ахметжанова Г.М.