

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

*Цель работы:* изучить принцип работы и характеристики усилителя напряжения на биполярном транзисторе. Ознакомиться с методикой снятия амплитудной и частотной характеристик усилителя.

#### Основные теоретические сведения

*Усилителем* называется устройство, предназначенное для усиления входных электрических сигналов по мощности за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала.

Усилитель включает в себя нелинейный элемент, управляемый входным электрическим сигналом, источник питания и нагрузочное устройство с определенным сопротивлением.

#### 1. Классификация и характеристики усилителей

Классификация усилителей производится по различным признакам:

- *по виду усиливаемого сигнала* они делятся на усилители гармонических и импульсных сигналов;
- *по типу усиливаемого сигнала* усилители подразделяют на усилители напряжения, тока и мощности;
- *по диапазону усиливаемых частот* различают усилители постоянного тока и усилители переменного тока. В свою очередь усилители переменного тока в зависимости от диапазона усиливаемых частот делятся на усилители низкой частоты (УНЧ), высокой частоты (УВЧ), широкополосные и избирательные усилители. Последние обеспечивают усиление в узком диапазоне частот;
- *по виду нагрузки* различают усилители с активной, с активно-индуктивной и емкостной нагрузкой.

Усилители могут быть однокаскадными и многокаскадными с гальванической, емкостной и индуктивной связью. В зависимости от режима работы можно выделить два класса усилителей: усилители с линейным режимом работы и усилители с нелинейным режимом работы.

Основными характеристиками любого усилителя являются:

- *амплитудная характеристика*, которая представляет собой зависимость выходного напряжения усилителя от входного  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  (рис.6.1). Она позволяет определить динамический диапазон входного сигнала для обеспечения работы с минимальными нелинейными искажениями. Для линейных усилителей это прямая, проходящая через начало координат;

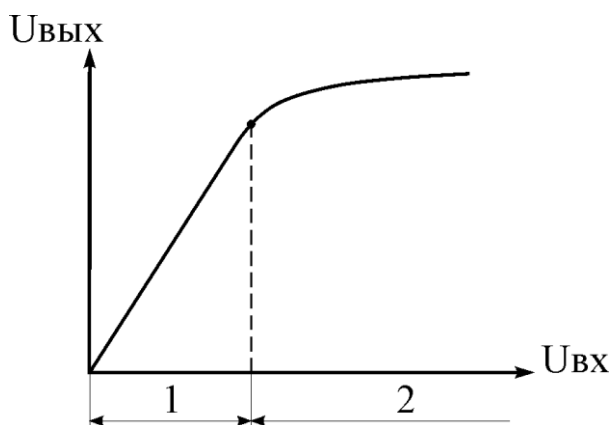


Рисунок 6.1 – Амплитудная характеристика усилителя

- *амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)* отражает зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты  $U_{\text{вых}} = f(\omega)$  (рис.6.2). В реальных усилителях из-за наличия паразитных емкостей и индуктивностей различные частоты усиливаются неодинаково;

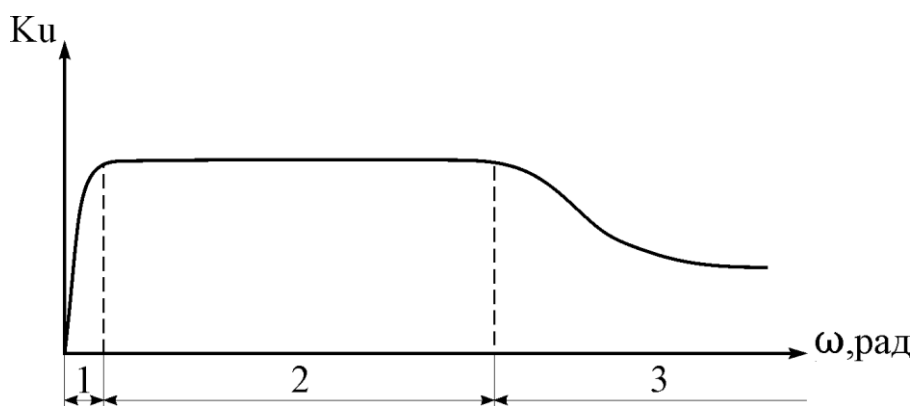


Рисунок 6.2 – Амплитудно-частотная характеристика усилителя

- *фазо-частотная характеристика (ФЧХ)* отражает зависимость

угла сдвига фазы, выходного сигнала по отношению к фазе входного сигнала, от частоты сигнала  $\varphi = f(\omega)$  (рис.6.3).

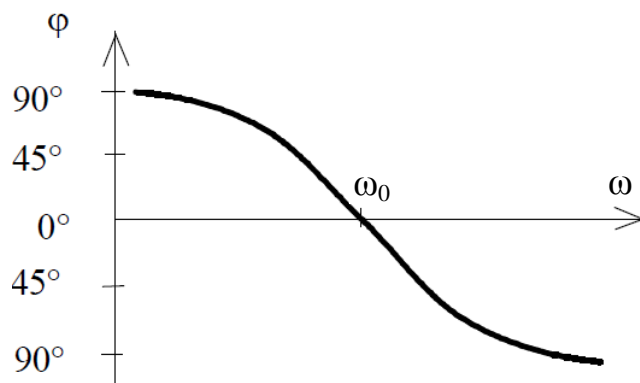


Рисунок 6.3 – Фазо-частотная характеристика усилителя

## 2. Принцип работы усилителя на биполярном транзисторе

Среди схем транзисторных усилительных каскадов наибольшее распространение получила схема с общим эмиттером (ОЭ) (рис.6.4) за счет ряда преимуществ:

- относительно большое входное сопротивление;
- возможность усиления сигнала как по току, так и по напряжению;
- возможность питания схемы от одного источника напряжения.

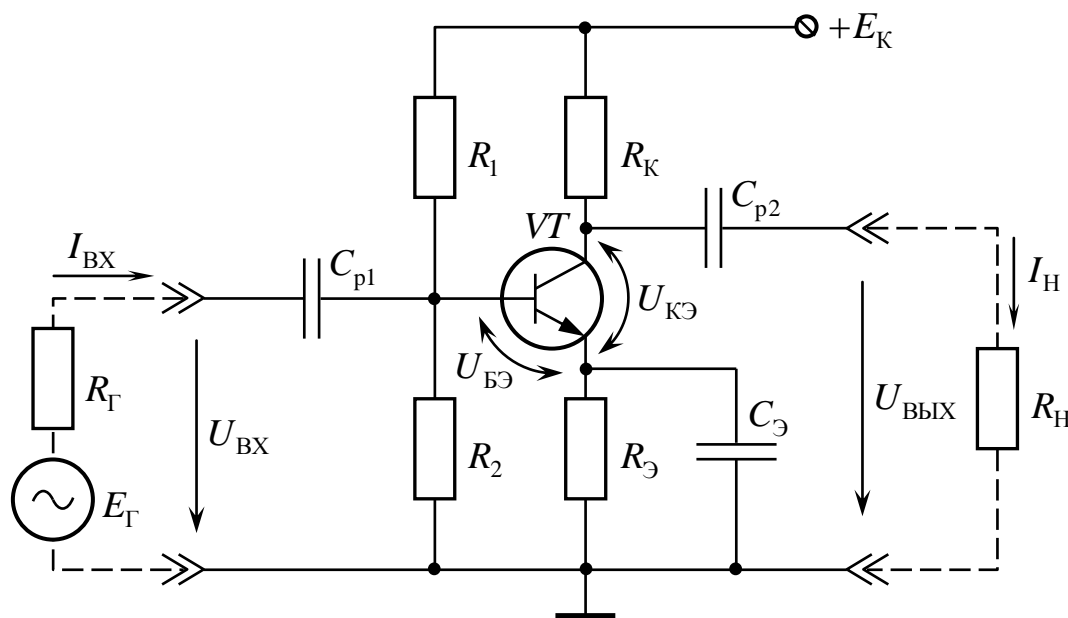


Рисунок 6.4 – Схема транзисторного усилителя с ОЭ

Резистивный делитель  $R_1, R_2$  задает напряжение на базе транзистора  $U_{Б0}$  (рис.6.5), если пренебречь малым током базы то можно записать

$$U_{Б0} = \frac{E_K}{R_1 + R_2} R_2.$$

При этом напряжение смещения  $U_{см}$ , которое обеспечивает работу транзистора в *режиме покоя* (в отсутствие входного сигнала) и определяет класс работы усилителя, определяется выражением

$$U_{см} = U_{БЭ0} = U_{Б0} - I_{Э0} R_{Э}.$$

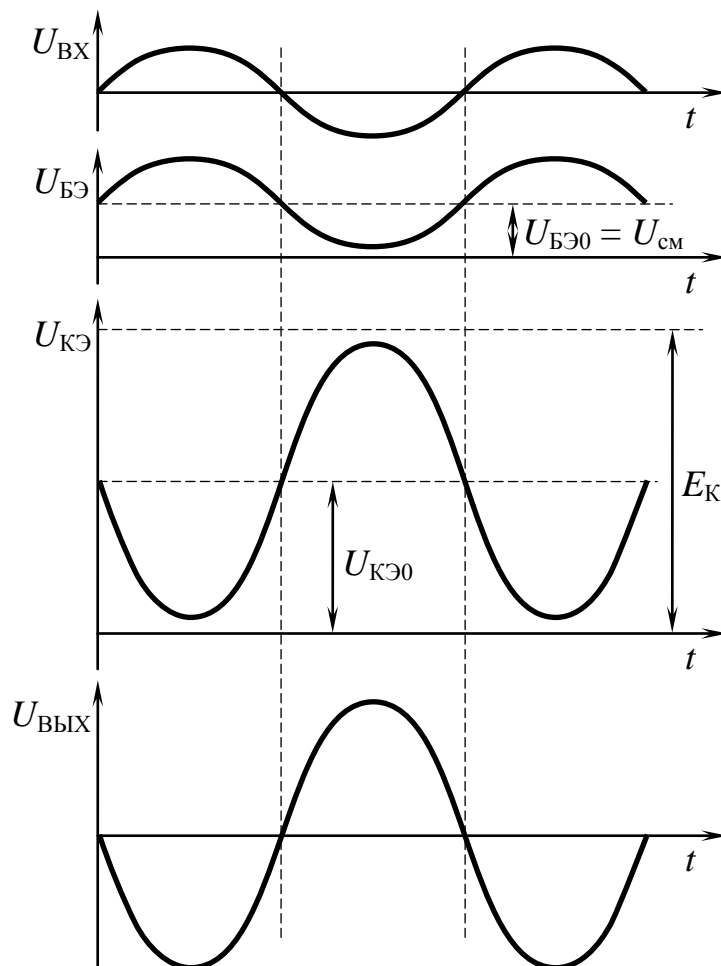


Рисунок 6.5 – Сигналы напряжений, действующих в усилителе

Элементы схемы  $R_1, R_2, R_{Э}, C_{Э}$  создают отрицательную обрат-

ную связь (ООС) по постоянному току, которая обеспечивает температурную стабилизацию рабочей точки. Если в результате нагрева транзистора ток коллектора  $I_{К0}$  получает некоторое положительное приращение, то такое же приращение получит и ток эмиттера, поскольку  $I_{Э0} = I_{К0} + I_{Б0} \approx I_{К0}$ . Падение напряжения на резисторе  $R_{Э}$  увеличится, в результате напряжение  $U_{БЭ0}$  уменьшится, что приводит к уменьшению  $I_{К0}$ .

Разделительный конденсатор  $C_{p1}$  предотвращает попадание в цепь базы транзистора  $VT$  постоянной составляющей входного сигнала, которая могла бы исказить режим работы транзистора по постоянному току. Кроме того этот конденсатор препятствует протеканию постоянного тока от источника питания  $E_K$  через цепи источника входного сигнала.

Конденсатор связи  $C_{p2}$  на выходе усилительного каскада обеспечивает выделение из коллекторного напряжения  $U_{КЭ}$  переменной составляющей (рис.6.5), которая подается в нагрузку  $R_H$  или последующий каскад усиления напряжения (в многокаскадном усилителе).

Выходное напряжение  $U_{КЭ}$  создается с помощью резистора в коллекторной цепи  $R_K$  при изменении коллекторного тока транзистора. Для коллекторной цепи усилительного каскада в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать следующее уравнение электрического состояния

$$E_K = U_{КЭ} + R_K \cdot I_K.$$

В данном случае подразумевается, что на частоте сигнала сопротивлением эмиттерной цепи можно пренебречь. Из уравнения видно, что увеличение тока коллектора при открытии транзистора приводит к возрастанию падения напряжения на  $R_K$  и, соответственно, к уменьшению выходного напряжения. Выходной сигнал находится в противофазе к входному, т.е. транзисторный усилитель с ОЭ *инвертирует* сигнал.

Расчет транзисторного усилительного каскада целесообразно производить графоаналитическим методом с использованием семейств входных и выходных характеристик выбранного транзистора (рис.6.6).

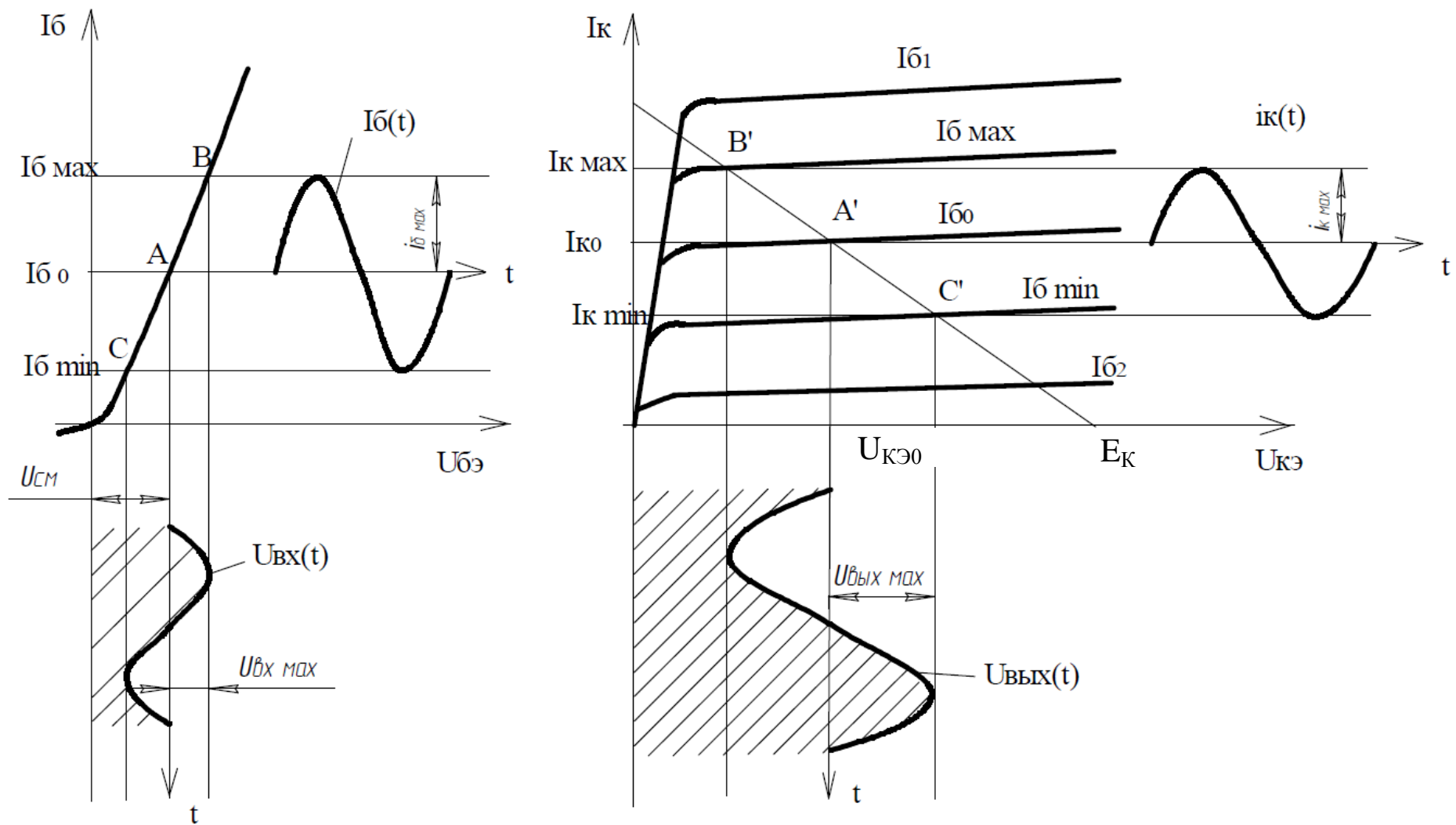


Рисунок 6.6 – Графический расчет транзисторного усилителя с ОЭ

Основными параметрами транзисторного усилителя являются:

- коэффициент усиления по напряжению  $K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$ ;
- коэффициент усиления по току  $K_I = \frac{I_{\text{Н}}}{I_{\text{ВХ}}}$ ;
- коэффициент усиления по мощности  $K_P = K_U K_I$ ;
- входное и выходное сопротивления.

### 3. Искажения сигнала в усилителе

В реальных схемах усилителей могут проявляться различные несоответствия формы выходного сигнала входному – искажения. При работе усилителей различают линейные и нелинейные искажения, в свою очередь линейные искажения делятся на частотные и фазовые.

*Линейные искажения* не нарушают амплитудных соотношений в усиливаемом сигнале, т.е. амплитудная характеристика не претерпевает никаких искажений. Линейные искажения связаны с неравномерностью амплитудно-частотной характеристики усилителя и нелинейностью его фазо-частотной характеристики. Поэтому линейные искажения еще называют частотными.

*Частотные искажения* вызваны изменением коэффициента усиления на различных частотах, их причиной являются реактивные элементы (конденсаторы, катушки индуктивности, ёмкость *p-n* переходов, ёмкость монтажа и т.д.). Частотные искажения можно оценить по АЧХ (рис.6.2). При средних частотах коэффициент усиления практически не зависит от частоты (рис.6.2 участок 2). В области низких частот наблюдается «завал» частотной характеристики (участок 1), обусловленный сопротивлением разделительных конденсаторов, включенных последовательно во входную и выходную цепи

$$X_C = \frac{1}{\omega C_p}$$

Разделительные конденсаторы с эквивалентными сопротивле-

ниями образуют  $RC$ -цепочки, известно, что на частоте  $\omega_c = \frac{1}{R_{\text{экв}} C_p}$

коэффициент пропускания  $RC$ -цепочки уменьшается до 0,707 от своего максимального значения. Для  $C_{p1}$  эквивалентное сопротивление определяется суммой входного сопротивления усилителя и сопротивлением источника сигнала ( $R_{\Gamma}$ ), для  $C_{p2}$  – суммой выходного сопротивления усилителя и сопротивления нагрузки ( $R_{\text{н}}$ ).

«Завал» АЧХ в области высоких частот (участок 3) обусловлен шунтирующим действием паразитных емкостей (ёмкость монтажа, резисторов и других элементов усилителя), сопротивление которых при высоких частотах уменьшается.

Считается допустимым уменьшение коэффициента усиления до  $0,707K_{\text{max}}$ . При этих значениях определяют граничную низшую  $f_{\text{н}}$  и высшую  $f_{\text{в}}$  частоты. Полоса пропускания усилителя определяется как разность этих частот  $f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$ .

*Фазовые искажения* также возникают из-за наличия реактивных элементов. Они обусловлены возникновением различных фазовых сдвигов при усилении сигналов различных частот. Оценивают фазовые искажения по ФЧХ (рис.6.3).

При больших входных напряжениях переменные составляющие токов выходят за пределы линейных участков вольтамперных характеристик транзистора, в результате чего форма кривой выходного напряжения претерпевает значительные искажения. Эти искажения носят название *нелинейных искажений*. В результате нелинейных искажений на выходе усилителя кроме полезного сигнала появляются высшие гармоники, т.е. совершенно новые колебания, которых не было на входе.

Для оценки диапазона изменения входных напряжений, усиливаемых без искажений, используют амплитудную характеристику (рис.6.1). Из рисунка видно, что при превышении входным сигналом определенного уровня характеристика перестает быть линейной (участок 2).

### **Порядок выполнения работы**

Перечень приборов:

- модуль для исследования транзисторного усилителя напряжения;
- универсальный источник питания;



- комбинированный измерительный прибор – 2 шт;
- генератор импульсов FG-32;
- осциллограф GOS-620.

## **1. Исследование амплитудной характеристики усилителя**

### **1.1 Подготовить источник питания к работе:**

- ручки регуляторов напряжения и тока 1 и 2 канала повернуть против часовой стрелки до упора;
- кнопки «СИНХРОНИЗАЦИЯ» установить в режим «НЕЗАВИСИМО»;
- включить источник питания (кнопка «POWER»);
- настроить ограничитель тока 1 канала источника питания:
  - соединить клеммы «+» и «-» 1-го канала проводником;
  - повернуть ручку «НАПРЯЖЕНИЕ» по часовой стрелке приблизительно на  $90^\circ$ ;
  - переключатель индикатора установить в положение «AMP»;
  - ручкой «ТОК» выставить ограничение тока 0,1 А;
  - снять проводник и вернуть переключатель индикатора в положение «VOLT»;
- ручкой «НАПРЯЖЕНИЕ» установить напряжение питания 15 В;
- выключить источник питания (кнопка «POWER»).

### **1.2 Подготовить генератор импульсов FG-32 к работе:**

- при помощи ручки «FUNCTION» установить синусоидальную форму импульса;
- при помощи ручек «RANGE» и «FREQUENCY» установить частоту 1000 Гц;
- установить минимальную амплитуду повернув ручку «AMPL» против часовой стрелки до упора (ручка «OFFSET» в нажатом положении).

### **1.3 Настроить осциллограф GOS-620 на двухканальный режим измерения с открытым входом.**

### **1.4 Собрать схему для исследования работы усилителя напряжения (рис.6.7). Выход генератора импульсов подключить к входу схемы $U_{ВХ}$ , 1й канал осциллографа подключить к входу схемы $U_{ВХ}$ , а 2й – к выходу $U_{ВЫХ}$ . Включить приборы.**

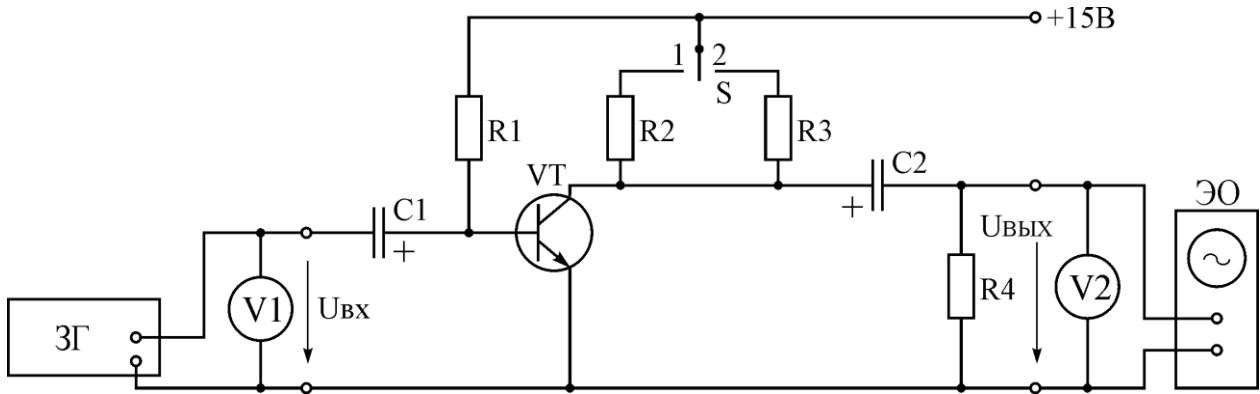


Рисунок 6.7 – Схема для исследования работы усилителя напряжения

- 1.5 Установить переключатель  $S$  в положение  $R2$ .
- 1.6 При помощи ручки «AMPL» генератора сигналов устанавливать амплитуду входного сигнала  $U_{вх}$  согласно таблицы 6.1. Измерить и занести в таблицу 6.1 соответствующие значения амплитуды сигнала на выходе усилителя  $U_{вых}$ .
- 1.7 Установить переключатель  $S$  в положение  $R3$ . Повторить измерения согласно пункта 1.6.

Таблица 6.1

**Результаты исследования амплитудной характеристики усилителя**

| $U_{вх}$ , мВ  | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | $R_K$ , кОм | $f_{вх}$ |
|----------------|---|----|----|----|----|----|-------------|----------|
| $U_{вых1}$ , В |   |    |    |    |    |    | $R_2 =$     | 1000Гц   |
| $U_{вых2}$ , В |   |    |    |    |    |    | $R_3 =$     |          |

- 1.8 По данным таблицы 6.1 на одной координатной плоскости построить амплитудные характеристики усилителя  $U_{вых} = f(U_{вх})$  при различных значениях сопротивления в цепи коллектора.
- 1.9 Для полученных характеристик определить диапазон изменения входного напряжения, в котором отсутствуют нелинейные искажения.

**2. Исследование амплитудно-частотной характеристики усилителя**

- 2.1 При помощи ручки «AMPL» генератора сигналов установить амплитуду входного сигнала  $U_{вх} = 35$  мВ.
- 2.2 Установить переключатель  $S$  в положение  $R2$ .

2.3 При помощи ручек «RANGE» и «FREQUENCY» генератора сигналов устанавливать частоту входного сигнала  $f_{вх}$  согласно таблицы 6.2. Измерить и занести в таблицу 6.2 соответствующие значения амплитуды сигнала на выходе усилителя  $U_{вых}$ . При изменении частоты необходимо контролировать и поддерживать амплитуду входного сигнала на заданном уровне.

2.4 Установить переключатель  $S$  в положение  $R3$ . Повторить измерения согласно пункта 2.3.

Таблица 6.2

Результаты исследования АЧХ усилителя

| $f_{вх}$ Гц    | 3М | 1М | 500к | 300к | 100к | 50к | 10к | 1к | 100 | 10 | $R_K$ , кОм | $U_{вх}$ , мВ |
|----------------|----|----|------|------|------|-----|-----|----|-----|----|-------------|---------------|
| $U_{вых1}$ , В |    |    |      |      |      |     |     |    |     |    | $R_2 =$     | 35            |
| $K_{U1}$       |    |    |      |      |      |     |     |    |     |    |             |               |
| $U_{вых2}$ , В |    |    |      |      |      |     |     |    |     |    | $R_3 =$     |               |
| $K_{U2}$       |    |    |      |      |      |     |     |    |     |    |             |               |

2.5 Для каждого измеренного значения  $U_{вых}$  определить коэффициент усиления по напряжению  $K_U$ . Полученные результаты занести в таблицу 6.2.

2.6 По данным таблицы 6.2 на одной координатной плоскости построить АЧХ усилителя  $K_U = f(f_{вх})$  при различных значениях сопротивления в цепи коллектора. Частоту сигнала откладывать в логарифмическом масштабе используя выражение  $X = \lg f_{вх}$ .

2.7 Для полученных характеристик определить полосу пропускания усилителя.

### Контрольные вопросы к работе

1. Пояснить принцип работы транзисторного усилителя с ОЭ.
2. Какова роль разделительных конденсатора во входной и выходной цепях усилителя?
3. Как зависит коэффициент усиления от величины сопротивления в цепи коллектора? Почему?
4. Чем обусловлены нелинейные искажения усилителя и в чем они проявляются?
5. Какова причина возникновения частотных искажений сигнала усилителя?