

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского  
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 16:45:04

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

## Методические указания

по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И  
ЭЛЕКТРОНИКА»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и  
электротехника Передача и распределение электрической энергии в системах  
электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

## Содержание

|     |                                                                                                      |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.  | Общие сведения по выполнению лабораторных работ по информационно-измерительной технике и электроники | 4  |
| 2.  | Основные правила техники безопасности в лаборатории электротехники и электроники                     | 4  |
| 3.  | Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ                                       | 5  |
| 4.  | Лабораторная работа № 1.<br>Параметрический стабилизатор напряжения                                  | 6  |
| 5.  | Лабораторная работа № 2.<br>Характеристики биполярного транзистора                                   | 11 |
| 6.  | Лабораторная работа № 3.<br>Характеристики полевого транзистора                                      | 15 |
| 7.  | Лабораторная работа № 4.<br>Неуправляемые выпрямители                                                | 19 |
| 8.  | Лабораторная работа № 5.<br>Каскад усилителя переменного тока на биполярном транзисторе              | 24 |
| 9.  | Лабораторная работа № 6.<br>Усилитель на полевом транзисторе                                         | 32 |
| 10. | Лабораторная работа № 7.<br>Тиристор                                                                 | 35 |
| 11. | Лабораторная работа № 8.<br>Тиристорный регулятор тока                                               | 38 |
| 12. | Лабораторная работа № 9.<br>Тиристорный регулятор напряжения                                         | 40 |
| 13. | Лабораторная работа № 10.<br>Операционный усилитель                                                  | 45 |
| 14. | Лабораторная работа № 11.<br>Генератор прямоугольных импульсов                                       | 51 |
| 15. | Лабораторная работа № 12.<br>Исследование переходных процессов в цепи с ёмкостью                     | 55 |
| 16. | Лабораторная работа №13<br>Триггеры                                                                  | 59 |
| 17. | Рекомендуемая литература                                                                             | 65 |

## **Общие сведения по выполнению лабораторных работ по информационно-измерительной технике и электронике**

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений, а также знакомство с электронными компонентами, оборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электронных схем и приборов, измерениям электрических величин. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях. В предлагаемом учебном пособии описано одиннадцать лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

### **Основные правила техники безопасности в лаборатории электротехники и электроники**

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

1. К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.
2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.

8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

### **Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ**

1. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование или приборы с других рабочих мест без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

2. Проверку наличия подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

3. При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в  $0,025\text{ А}$  уже является опасным для жизни.

## Лабораторная работа №1

### Параметрический стабилизатор напряжения

Цель работы: ознакомить студентов со схемой, принципом работы методом расчёта и возможностями параметрического стабилизатора напряжения.

#### 1.1 Основные теоретические положения

Основным элементом параметрического стабилизатора напряжения является стабилитрон, вид вольтамперной характеристики которого представлен на рис. 1.1.

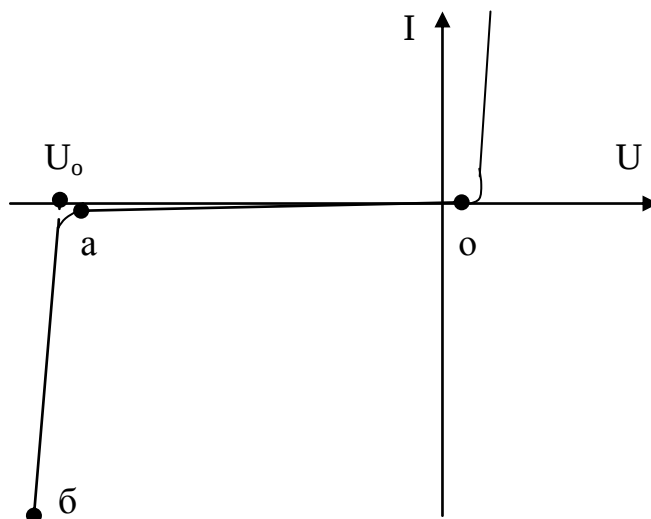


Рис. 1.1.

При включении напряжения в проводящем направлении характеристика стабилитрона ничем не отличается от характеристики обычных диодов, используемых в схемах выпрямителей. При обратном включении напряжения до некоторого его значения сопротивление стабилитрона остаётся очень высоким, ток через него практически отсутствует (участок характеристики «оа»). При дальнейшем увеличении напряжения наступает пробой диода, в результате которого

его сопротивление резко падает, вследствие чего незначительному увеличению напряжения соответствует значительное увеличение тока (участок «аб»). В схемах стабилизаторов напряжения стабилитроны используются в режиме пробоя.

Схема параметрического стабилизатора напряжения, изображенная на рис. 1.2, состоит из стабилизатора  $Cm$  и балластного сопротивления  $R_б$ . На вход стабилизатора подается напряжение от нестабилизированного источника питания  $U_п$ . Сопротивление нагрузки  $R_н$  включается параллельно со стабилитроном. Напряжение питания должно быть выше напряжения пробоя, тогда разность напряжений  $U_п - U_{ст}$  падает на балластном сопротивлении. Снижение напряжения питания приведет к небольшому снижению напряжения на стабилитроне, при этом ток через него, а следовательно, через  $R_б$  резко уменьшится, что приведет к уменьшению падения напряжения на  $R_б$ . Таким образом, снижение напряжения  $U_п$  приводит почти к такому же снижению напряжения на балластном сопротивлении и лишь к незначительному снижению стабилизируемого напряжения на нагрузке.

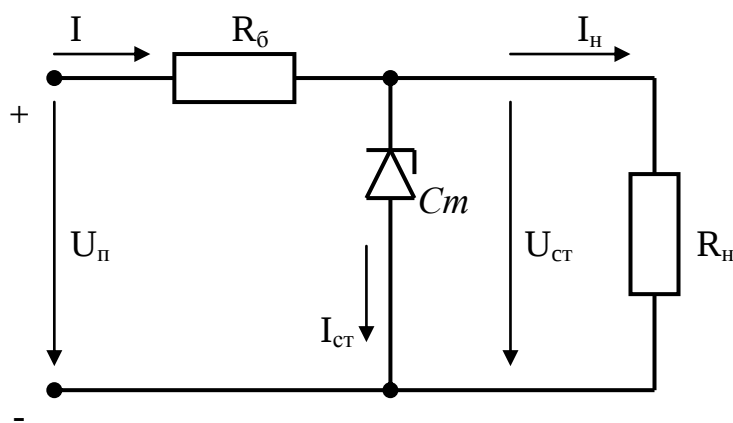


Рис.1.2.

При повышении  $U_п$  напряжение  $U_{ст}$  увеличится незначительно, вследствие чего токи  $I_{ст}$  и  $I$  возрастут настолько, что основная часть повышения напряжения распределится на  $R_б$ .

Для количественной оценки эффекта стабилизации характеристику стабилитрона в области рабочей полярности напряжения представим состоящей из двух прямых (рис. 1.1). До напряжения  $U_0$  будем считать сопротивление стабилитрона бесконечно большим; при напряжениях, больших  $U_0$ , наклон вольтамперной характеристики определяется динамическим сопротивлением

$$R_{ст} = \Delta U_{ст} / \Delta I_{ст},$$

на этом участке напряжение на стабилитроне

$$U_{ст} = U_0 + R_{ст} I_{ст}.$$

При  $U_{ст} < U_0$  стабилитрон закрыт, эффект стабилизации отсутствует и напряжение на нагрузке равно

$$U_н = U_п R_н / (R_б + R_н).$$

При  $U_{ст} > U_0$  для схемы рис. 1.2 справедлива система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_{ст} &= U_0 + R_{ст} I_{ст} \\ U_{п} &= I R_6 + U_{ст} \\ I &= I_{ст} + I_H \\ I_H &= U_{ст} / R_H \end{aligned} \right\} \quad (1).$$

При заданных напряжении источника питания, сопротивлении нагрузки и напряжении на стабилитроне (которое, конечно, должно быть в пределах рабочего участка его характеристики) система (1) позволяет найти выражение для вычисления необходимого балластного сопротивления:

$$R_6 = R_{ст} R_H (U_{п} - U_{ст}) / [U_{ст} R_{ст} + R_H (U_{ст} - U_0)] \quad (2)$$

Наименьшее напряжение питания, при котором будет сохраняться стабилизация, как следует из (1),

$$U_{п \min} = U_0 (R_6 / R_H + 1) \quad (3),$$

при этом  $U_{ст} = U_0$ ,  $I_{ст} = 0$ ,  $I = I_H = U_0 / R_H = U_{п} / (R_H + R_6)$ .

Из (3) следует, что  $R_6$  желательно иметь как можно меньше, чтобы расширить диапазон возможного снижения напряжения питания, поэтому при вычислении  $R_6$  в (2) необходимо принять  $U_{п} = U_{п \min}$ , а значение  $U_{ст}$ , учитывая нелинейность вольтамперной характеристики, принять несколько больше  $U_0$  (в начале линейной части рабочего участка характеристики).

Используя систему уравнений (1), можно также найти значение стабилизированного напряжения, соответствующее значению  $U_{п}$ , при принятом  $R_6$ :

$$U_{ст} = R_H (R_{ст} U_{п} + R_6 U_0) / [R_H R_6 + R_{ст} (R_H + R_6)] \quad (4).$$

Приращению  $U_{п}$  будет соответствовать приращение  $U_{ст}$ :

$$\Delta U_{ст} = \Delta U_{п} R_H R_{ст} / [R_H R_6 + R_{ст} (R_H + R_6)] \quad (5).$$

Эффект стабилизации напряжения определяется отношением:

$$\Delta U_{ст} / \Delta U_{п} = R_H R_{ст} / [R_H R_6 + R_{ст} (R_H + R_6)] \quad (6).$$

Чем меньше это отношение, тем выше эффект стабилизации. Из (6) следует, что  $\Delta U_{ст} / \Delta U_{п}$  тем меньше, чем больше  $R_6$ . Таким образом, при расширении нижнего диапазона изменения  $U_{п}$  за счёт уменьшения  $R_6$  эффект стабилизации уменьшается, поэтому величину балластного сопротивления необходимо выбирать таким образом, чтобы удовлетворить оба требования: и в отношении качества стабилизации, и в отношении нижнего порога напряжения питания. Кроме того, ток стабилитрона не должен превышать ток, допустимый по условиям нагрева. Из (1) следует:

$$I_{ст} = (U_{п} - U_0 - I_H R_6) / (R_6 + R_{ст}),$$

наибольшее значение  $I_{ст}$  принимает при отсутствии нагрузки и при максимальном ожидаемом напряжении питания:

$$I_{ст \max} = (U_{п \max} - U_0) / (R_6 + R_{ст}) < I_{ст \text{ доп}} \quad (7).$$

После расчёта балластного сопротивления по формуле (2) необходимо проверить выполнение условия (7). Если последнее условие не выполняется, то необходимо либо увеличить  $R_6$ , либо выбрать более мощный стабилитрон.

В некоторых случаях возникает необходимость стабилизации напряжения питания при изменении сопротивления нагрузки. При  $R_H=0$  всё приложенное напряжение падает на сопротивлении  $R_6$ . Минимальное сопротивление нагрузки, при котором начинается эффект стабилизации, может быть найден из выражения (3):

$$R_{H \min} = R_6 U_0 / (U_{\Pi} - U_0) \quad (8),$$

при этом  $R_H$  напряжение  $U_{CT} = U_0$ . С увеличением  $R_H$  напряжение на стабилитроне будет расти, и при отсутствии нагрузки ( $R_H = \infty$ ) примет наибольшее значение:

$$U_{CT \max} = (U_{\Pi} R_{CT} + U_0 R_6) / (R_{CT} + R_6) \quad (9).$$

## 1.2 Содержание практической части и порядок выполнения работы

В данной лабораторной работе необходимо выполнить следующее:

- снять вольтамперную характеристику стабилитрона;
- определить параметры рабочего участка характеристики:  $U_0$  и  $R_{CT}$ ;
- вычислить значение балластного сопротивления при заданных сопротивлении нагрузки и минимальном напряжении источника питания;
- определить зависимость стабилизируемого напряжения от напряжения источника питания при постоянном  $R_H$ ;
- определить зависимость стабилизируемого напряжения от сопротивления нагрузки при постоянном  $U_{\Pi}$ .

Порядок выполнения работы следующий:

1. Изучить основные теоретические положения.
2. Собрать схему, изображённую на рис. 1.3.
3. Не подключая сопротивления нагрузки и меняя напряжение питания в соответствии со значениями, записанными в таблице 1.1, снять вольтамперную характеристику стабилитрона при прямой и обратной полярности напряжения.

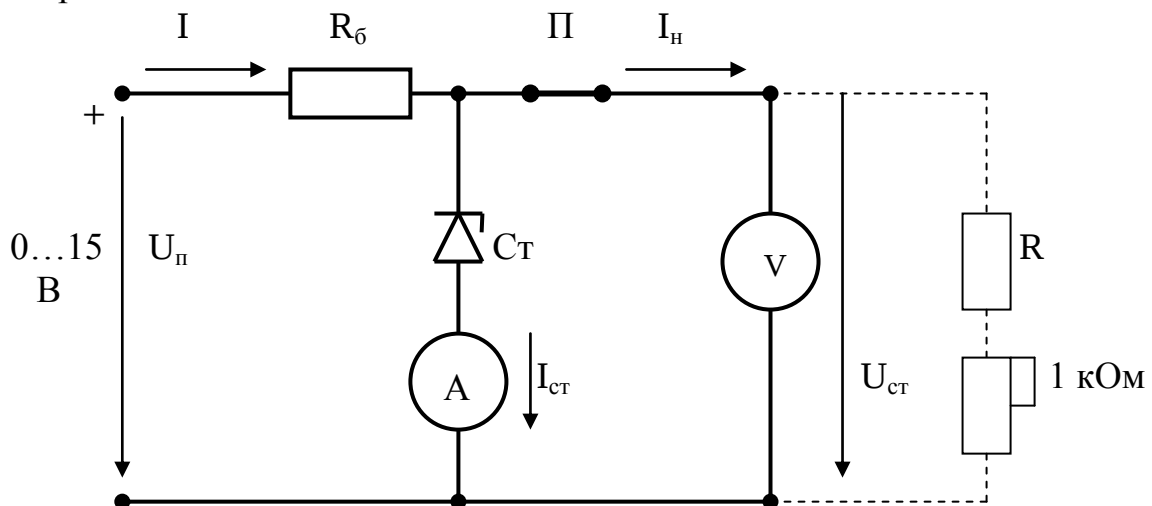


Рис. 1.3.

4. По данным таблицы 1.1 построить вольтамперную характеристику стабилитрона, определить значения  $U_0$  и  $R_{ст}$ .

Таблица 1.1.

| $U_{ст},$<br>В  | Положительная полярность |      |     |      |     |      |      | Отрицательная полярность |   |   |     |     |     |     |
|-----------------|--------------------------|------|-----|------|-----|------|------|--------------------------|---|---|-----|-----|-----|-----|
|                 | 0,48                     | 0,55 | 0,6 | 0,67 | 0,7 | 0,74 | 0,77 | 6                        | 8 | 9 | 9,5 | 9,6 | 9,7 | 9,8 |
| $I_{ст},$<br>мА |                          |      |     |      |     |      |      |                          |   |   |     |     |     |     |

5. Для  $U_{п\ min}$  и  $R_{н}$ , заданных преподавателем, вычислить  $R_6$  и выбрать из имеющихся ближайшее большее.
6. Установить в схеме заданное  $R_{н}$  и принятое  $R_6$ , проверить при заданном  $U_{п\ min}$  значение  $U_{ст}$ , записать его и сравнить со значением, принятым при вычислении  $R_6$ .
7. Задавая значения напряжения питания, указанные в таблице 1.2, при постоянном  $R_{н}$ , заданном преподавателем, записать в таблицу полученные значения стабилизированного напряжения.

Таблица 1.2.

|             |    |    |    |      |    |      |    |      |    |
|-------------|----|----|----|------|----|------|----|------|----|
| $U_{п},$ В  | 10 | 11 | 12 | 12,5 | 13 | 13,5 | 14 | 14,5 | 15 |
| $U_{ст},$ В |    |    |    |      |    |      |    |      |    |

8. Построить график зависимости  $U_{ст} = f(U_{п})$ .
9. По формуле (8) вычислить минимальное сопротивление нагрузки, при котором происходит стабилизация напряжения. В схеме рис. 1.3 ампер-метр и переключку «П» поменять местами. Плавное уменьшая переменным резистором 1 кОм сопротивление нагрузки, при  $U_{п} = 15В$  установить токи в цепи нагрузки, указанные в таблице 1.3, и записать соответствующие этим токам напряжения на нагрузке. Вычислить по записанным в таблице формулам напряжение на балластном сопротивлении, ток, потребляемый от источника питания, ток через стабилитрон и сопротивление нагрузки. Отметить сопротивление нагрузки, при котором стабилитрон запирается, сравнить его с вычисленным. По данным таблицы построить график зависимости  $U_{ст} = f(I_{н})$ .

Таблица 1.3.

|                          |   |   |   |   |    |    |    |    |
|--------------------------|---|---|---|---|----|----|----|----|
| $I_{н},$ мА              | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 18 |
| $U_{ст},$ В              |   |   |   |   |    |    |    |    |
| $U_6 = U_{п} - U_{ст}$   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| $I = U_6 / R_6$          |   |   |   |   |    |    |    |    |
| $I_{ст} = I - I_{н}$     |   |   |   |   |    |    |    |    |
| $R_{н} = U_{ст} / I_{н}$ |   |   |   |   |    |    |    |    |

### 1.3 Содержание отчёта

1. Основные теоретические положения.
2. Схема лабораторной установки.
3. Таблицы опытных данных.
4. График вольтамперной характеристики стабилитрона с вычислением значений  $U_o$  и  $R_{ст}$ .
5. Вычисление в соответствии с заданием сопротивления  $R_6$ .
6. График зависимости стабилизированного напряжения от напряжения питания.
7. График зависимости стабилизированного напряжения от сопротивления нагрузки.
8. Сравнение вычисленных и полученных опытным путём  $U_{п\ min}$  и  $R_{н\ min}$ .

### 1.4 Контрольные вопросы

1. Опишите вольтамперную характеристику стабилитрона.
2. Поясните принцип работы параметрического стабилизатора напряжения.
3. Как, пользуясь вольтамперной характеристикой стабилитрона, рассчитать его динамическое сопротивление?
4. От чего зависит нижний порог стабилизируемого напряжения?
5. Как величина балластного сопротивления влияет на качество стабилизации напряжения?
6. Чем ограничивается минимальное значение балластного сопротивления?
7. Как сопротивление нагрузки влияет на качество работы стабилизатора напряжения?

## Лабораторная работа №2

### Характеристики биполярного транзистора

Цель работы: освоить методику получения входных и выходных характеристик транзистора, а также определения его динамических параметров.

#### 2.1 Основные теоретические положения

При выполнении расчётов схем с биполярными транзисторами используют их входные и выходные характеристики.

Входными характеристиками называют зависимость тока базы  $i_b$  от напряжения эмиттер-база  $U_{эб}$  при постоянном напряжении коллектор-эмиттер  $U_{кэ}$ . Вид этих характеристик представлен на рис. 2.1.

Следует заметить, что входные характеристики, полученные при различных

напряжениях  $U_{кэ}$ , отличных от нуля, практически совпадают.

По входным характеристикам определяют такие динамические характеристики транзистора, как входное динамическое сопротивление

$$h_{11} = \Delta U_{эб} / \Delta i_б \quad (2.1),$$

представляющее собой отношение приращения напряжения  $U_{эб}$  к соответствующему приращению тока базы при постоянном напряжении коллектор-эмиттер, и коэффициент обратной связи по напряжению

$$h_{12} = \Delta U_{эб} / \Delta U_{кэ} \quad (2.2),$$

представляющий собой отношение соответствующих друг другу приращений напряжений эмиттер-база и коллектор-эмиттер при постоянном токе базы.

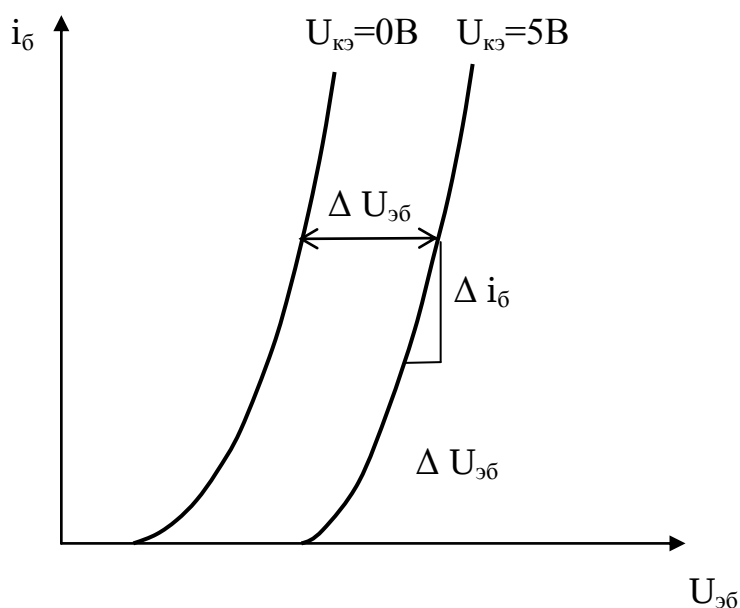


Рис.2.1.

Выходные характеристики отражают зависимость тока коллектора  $I_к$  от напряжения коллектор-эмиттер при различных токах базы, их вид представлен на рис. 2.2. По выходным характеристикам определяют такие параметры, как коэффициент усиления тока базы

$$h_{21} = \Delta I_к / \Delta i_б \quad (2.3),$$

представляющий собой отношение приращения тока коллектора к соответствующему приращению тока базы при постоянном напряжении коллектор-эмиттер, и выходная динамическая проводимость

$$h_{22} = \Delta I_к / \Delta U_{кэ} \quad (2.4),$$

представляющая собой отношение приращения тока коллектора к соответствующему приращению напряжения коллектор-эмиттер при постоянном токе базы.

Вследствие нелинейности как входных, так и выходных характеристик все перечисленные параметры имеют различные значения для различных рабочих точек.

Область выходных характеристик, в которой они практически линейны и в которой ток коллектора мало зависит от напряжения коллектор-эмиттер, а определяется током базы, называют активной зоной. При увеличении тока кол-

лктора и напряжения  $U_{кэ}$  растёт мощность тепловых потерь в транзисторе. Эти потери не должны превышать допустимого для данного транзистора значения  $p_{к доп}$ :

$$p_k = U_{кэ} I_k < p_{к доп}.$$

Линия допустимых потерь на рис. 2.2 проведена пунктиром.

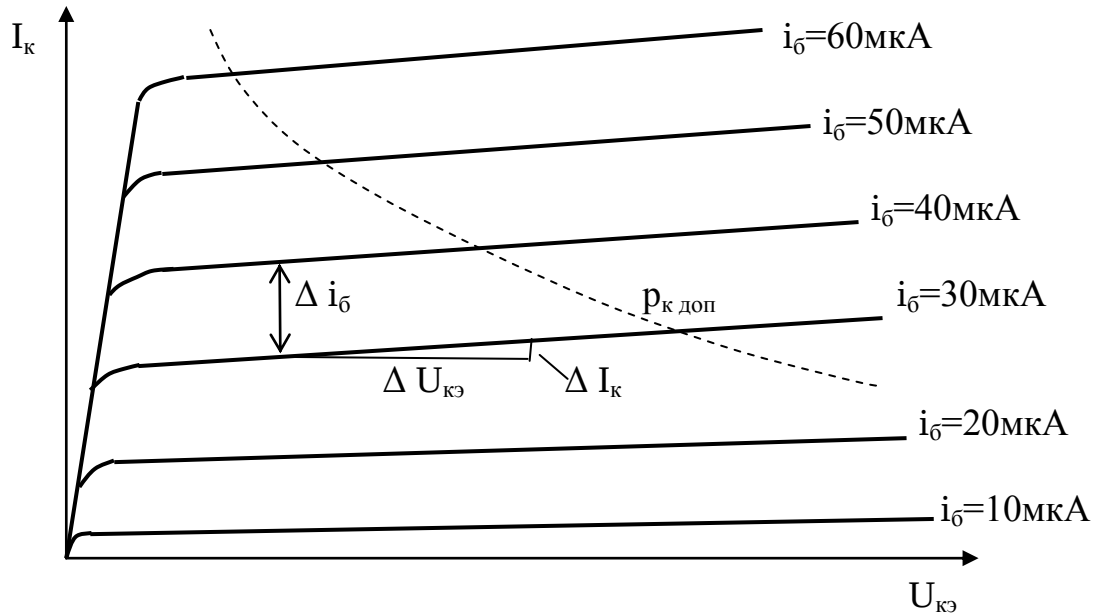


Рис.2.2.

## 2.2 Содержание практической части и порядок выполнения работы

В данной лабораторной работе необходимо получить входные и выходные характеристики транзистора и вычислить значения динамических параметров. Порядок выполнения работы следующий.

1. Изучить основные теоретические положения.

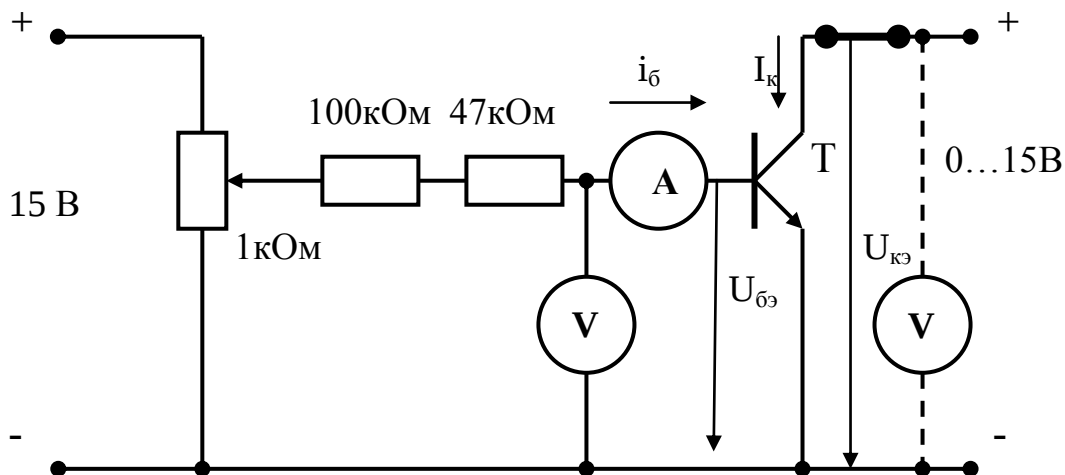


Рис. 2.3.

2. Собрать схему, изображённую на рис. 2.3. В схеме обязательно предусмотреть переключку «П», необходимую для изменения места включения миллиамперметра.

3. Установить напряжение  $U_{кэ}=0$ . При токах базы, указанных в таблице 2.1, измерить значения напряжения  $U_{бэ}$  и записать их в таблицу. Повторить опыт при  $U_{кэ} = 2,5$  В и 10 В.

Таблица 2.1.

| $i_b$ , мкА     |                    | 0 | 5 | 10 | 20 | 50 | 80 |
|-----------------|--------------------|---|---|----|----|----|----|
| $U_{бэ}$ ,<br>В | при $U_{кэ}=0$     |   |   |    |    |    |    |
|                 | при $U_{кэ}=2,5$ В |   |   |    |    |    |    |
|                 | при $U_{кэ}=10$ В  |   |   |    |    |    |    |

4. Установить ток базы 20 мкА. Переключить миллиамперметр в цепь коллектора, изменить предел измерения тока до 20 мА. Устанавливая значения напряжения в цепи коллектор-эмиттер, указанные в таблице 2.2, записать в таблицу соответствующие этим напряжениям значения тока коллектора. Измерения повторить при токах базы 40, 60 и 80 мкА.

Таблица 2.2.

| $U_{кэ}$ , В  |                  | 0 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
|---------------|------------------|---|-----|-----|---|---|---|----|----|
| $I_k$ ,<br>мА | при $i_b=20$ мкА |   |     |     |   |   |   |    |    |
|               | при $i_b=40$ мкА |   |     |     |   |   |   |    |    |
|               | при $i_b=60$ мкА |   |     |     |   |   |   |    |    |
|               | при $i_b=80$ мкА |   |     |     |   |   |   |    |    |

5. По данным таблиц 2.1 и 2.2 построить входные и выходные характеристики транзистора.

6. В рабочих точках, указанных преподавателем, определить динамические параметры транзистора.

## 2.3 Содержание отчёта

1. Принципиальная схема испытаний транзистора.
2. Таблицы опытных данных.
3. Графики входных и выходных характеристик.
4. Вычисления динамических параметров.

## 2.4 Контрольные вопросы

1. Что представляют собой входные и выходные характеристики транзистора?
2. Расскажите о порядке получения входных и выходных характеристик транзистора.

3. Перечислите динамические параметры биполярного транзистора. Как их получают?
4. Чем ограничена активная зона выходных характеристик транзистора?

## Лабораторная работа №3

### Характеристики полевого транзистора

Цель работы: изучение особенностей работы полевого транзистора с управляемым переходом, освоение методики получения его стокзатворной и выходных характеристик.

#### 3.1 Основные теоретические положения

В данной лабораторной работе рассматривается полевой транзистор с управляемым переходом. Транзисторы такого типа могут иметь  $n$ -канал, в котором носителями зарядов являются электроны, либо  $p$ -канал, в котором носителями зарядов являются дырки. Схема конструкции транзистора с  $n$ -каналом представлена на рис. 3.1.

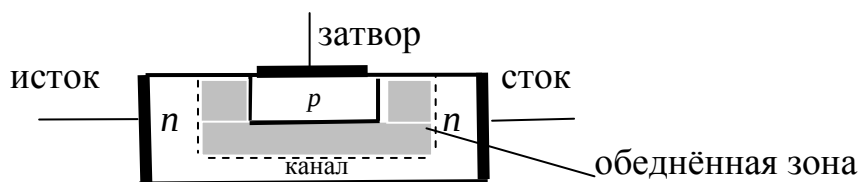


Рис. 3.1.

В кристалл полупроводника  $n$ -типа, имеющего малую концентрацию примеси, впаян кристалл  $p$ -типа с высокой концентрацией примеси. Вследствие диффузии электронов из  $n$ -полупроводника и дырок из  $p$ -полупроводника на границе кристаллов образуется обеднённая зона, лишённая носителей зарядов и поэтому имеющая очень высокое сопротивление. Из-за разности концентрации примесей обеднённая зона занимает почти весь объём  $n$ -полу-проводника, оставляя со стороны, противоположной  $p$ -полупроводнику, узкий канал. У транзистора имеется три металлических электрода, один из которых, называемый *затвором*, соединён с  $p$ -полупроводником, два других, называемых *истоком* и *стоком*, соединены с кристаллом  $n$ -типа с противоположных сторон, так что *канал* находится между этими электродами. Затвор является управляющим электродом. Если между стоком и истоком приложить разность потенциалов при отсутствии потенциала на затворе, то через канал потечёт ток. При подаче на затвор отрицательного относительно истока потенциала обеднённая зона расширится, толщина канала уменьшится, и сопротивление цепи сток-исток увеличится, вследствие чего ток стока уменьшится. При этом следует заметить, что ток через затвор будет отсутствовать, т.к. напряжение по цепи затвор-исток

подано в непроводящем направлении. При подаче положительного потенциала на затвор по цепи затвор-исток потечёт ток, толщина канала увеличится, и даже при небольшом токе затвора ток стока резко возрастет.

Графическое изображение транзисторов с управляемым переходом представлено на рис.3.2.



Рис. 3.2.

Для полевых транзисторов используют такие характеристики, как сток-затворная, представляющая собой зависимость тока стока от напряжения затвор-исток при постоянном напряжении сток-исток, и выходные, представляющие зависимость тока стока от напряжения сток-исток при фиксированных значениях напряжения затвор-исток.

Динамическими параметрами полевых транзисторов являются следующие:

- крутизна стокзатворной характеристики

$$S = di_c / du_{зи} \text{ при постоянном } u_{ис} \text{ и заданном } u_{зи};$$

- внутреннее дифференциальное сопротивление

$$R_{ис \text{ диф}} = du_{ис} / di_c ,$$

которые определяют по выходным характеристикам для заданных  $u_{ис}$  и  $u_{зи}$ ;

- коэффициент усиления напряжения

$$M = du_{ис} / du_{зи} \text{ при постоянном } i_c \text{ и заданном } u_{зи}.$$

### 3.2 Содержание практической части и порядок выполнения работы

При выполнении данной лабораторной работы необходимо получить сток-затворную и выходные характеристики полевого транзистора с каналом *n*-типа, определить крутизну стокзатворной характеристики и внутреннее дифференциальное сопротивление.

Порядок выполнения работы следующий:

1. Изучить основные теоретические положения.
2. Собрать схему рис.3.3 для снятия стокзатворной характеристики.

Изменяя напряжение  $u_{зи}$  от -2,5 В до нуля, убедиться, что ток в цепи затвора отсутствует. Записать в таблицу 3.1 значения тока затвора при указанных в таблице положительных напряжениях  $u_{зи}$ .

3. Амперметр и перемычку «П» поменять местами. При указанных в таблице 3.1 напряжениях затвор-исток записать в таблицу значения тока стока. Построить график стокзатворной характеристики.

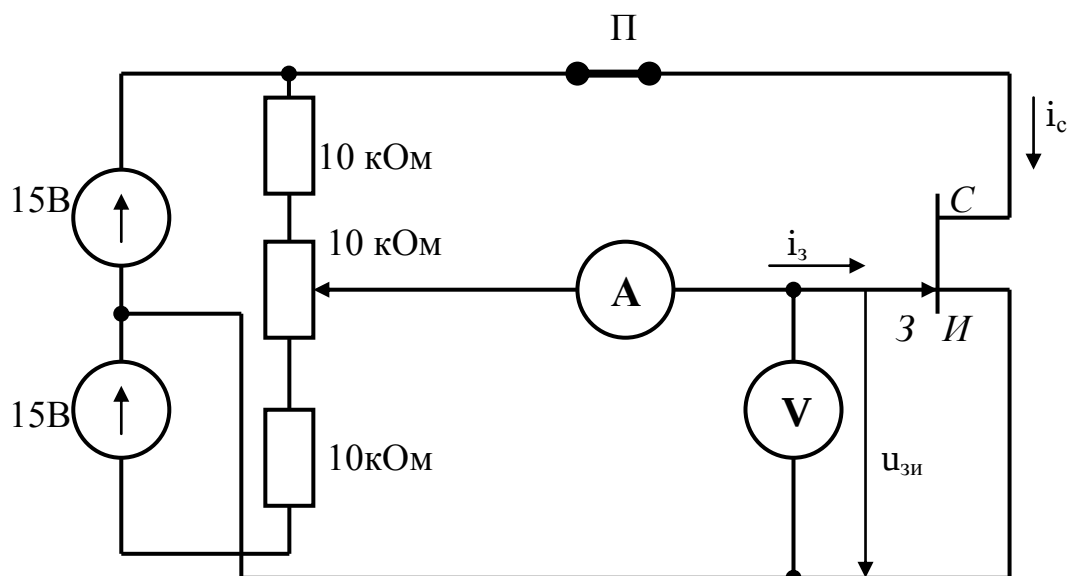


Рис.3.3.

Таблица 3.1.

|                    |      |    |      |    |      |   |      |      |      |
|--------------------|------|----|------|----|------|---|------|------|------|
| $u_{зи}, \text{В}$ | -2,5 | -2 | -1,5 | -1 | -0,5 | 0 | +0,2 | +0,4 | +0,6 |
| $i_c, \text{мА}$   |      |    |      |    |      |   |      |      |      |
| $i_3, \text{мА}$   |      |    |      |    |      |   |      |      |      |

4. Собрать схему рис. 3.4 для снятия выходных характеристик транзистора.

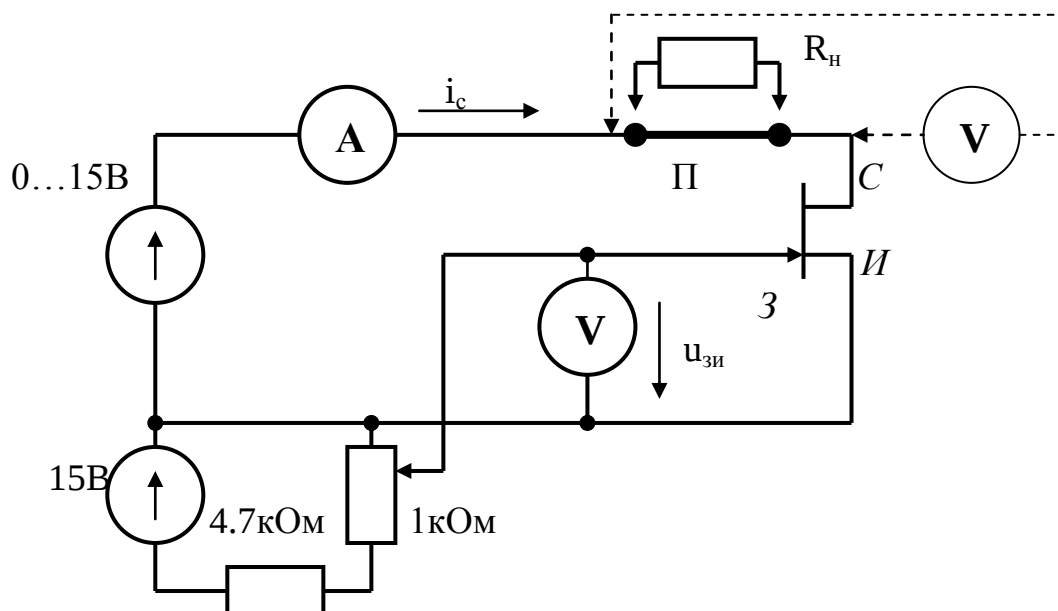


Рис.3.4.

Установить напряжение затвор-исток  $-1,5 \text{ В}$  с помощью потенциометра  $1\text{кОм}$ . Устанавливая напряжения сток-исток, указанные в таблице 3.2, замерить и записать в таблицу соответствующие значения тока стока. Повторить опыт при указанных в таблице напряжениях  $u_{зи}$ , для установки положитель-

ного значения которого изменить полярность напряжения, снимаемого с не-регулируемого источника питания 15В.

Таблица 3.2.

| $U_{си}, В$  |                       | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 15 |
|--------------|-----------------------|---|-----|---|-----|---|---|---|---|---|----|----|----|
| $i_c,$<br>мА | при $u_{зи} = -1,5 В$ |   |     |   |     |   |   |   |   |   |    |    |    |
|              | при $u_{зи} = -1 В$   |   |     |   |     |   |   |   |   |   |    |    |    |
|              | при $u_{зи} = -0,5 В$ |   |     |   |     |   |   |   |   |   |    |    |    |
|              | при $u_{зи} = 0 В$    |   |     |   |     |   |   |   |   |   |    |    |    |
|              | при $u_{зи} = +0,5 В$ |   |     |   |     |   |   |   |   |   |    |    |    |

5. Построить семейство выходных характеристик  $i_c = f(U_{си})$ .

6. Вычислить крутизну стокзатворной характеристики и внутреннее дифференциальное сопротивление для точек на характеристиках, указанных преподавателем.

### 3.3 Содержание отчёта

1. Основные теоретические положения.
2. Принципиальные электрические схемы испытания транзистора.
3. Таблицы опытных данных.
4. Графики стокзатворной и выходных характеристик.
5. Вычисления параметров транзистора.

### 3.4 Контрольные вопросы

1. Опишите конструкцию полевого транзистора с управляемым переходом.
2. Почему обеднённая зона  $p$ - $n$ -перехода располагается в основном в зоне истока-стока?
3. Что называют каналом полевого транзистора?
4. Какие носители зарядов имеются в канале полевого транзистора?
5. В результате чего изменяется сопротивление канала полевого транзистора?
6. В каких случаях при работе полевого транзистора отсутствует ток затвора?
7. Что представляет собой стокзатворная характеристика? Как её получают?
8. Что представляют собой выходные характеристики полевого транзистора? Как их получают?
9. Какие Вам известны динамические параметры полевого транзистора? Как их вычисляют?

## Лабораторная работа №4

### Неуправляемые выпрямители

Цель работы: изучение схем однофазных и трёхфазных выпрямителей, сравнение теоретических и экспериментальных значений выпрямленного напряжения, ознакомление с формами кривых выпрямленного напряжения.

#### 4.1 Основные теоретические положения

Основная часть электроэнергии вырабатывается и передаётся от генераторов к потребителям в виде энергии переменного тока. Для питания потребителей постоянного тока используют выпрямители, которые выполняют, в основном, с использованием полупроводниковых приборов. В схемах неуправляемых выпрямителей используют диоды. В зависимости от мощности нагрузки и требований к качеству выпрямленного напряжения применяют различные схемы выпрямления.

Наиболее простой является схема однофазного однополупериодного выпрямления (рис. 4.1), используемая для потребителей малой мощности, допускающих значительный уровень пульсаций выпрямленного напряжения. Форма кривой выпрямленного таким выпрямителем напряжения (жирная линия) представлена на рис. 4.2. Для сглаживания пульсаций напряжения параллельно нагрузке обычно включают электролитический конденсатор большой ёмкости.

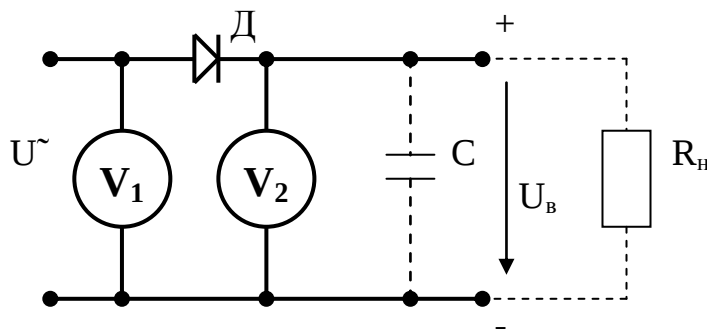


Рис. 4.1.

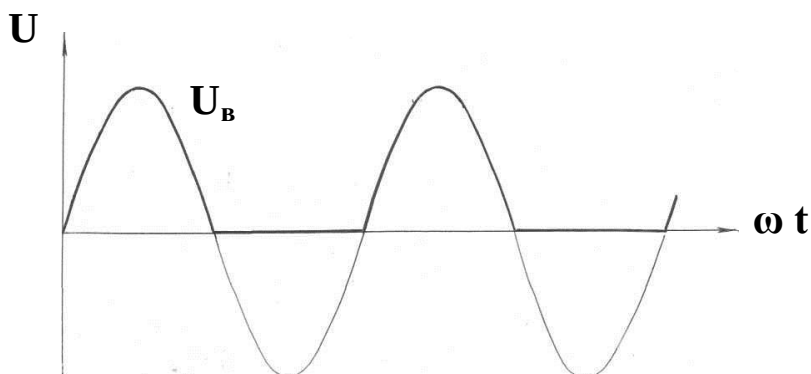


Рис. 4.2.

При питании от однофазной цепи чаще применяют схемы двухполупериодного выпрямления, имеющие значительно меньший уровень пульсаций выпрямленного напряжения. Существует два вида таких схем: со средней точкой (рис. 4.3) и мостовая (рис. 4.4). На схемах направление тока показано сплошными стрелками при одной полярности питающего напряжения и пунктирными – при противоположной. Достоинством мостовой схемы является отсутствие трансформатора со средней точкой вторичной обмотки. Вместе с тем, в этой схеме ток одновременно проходит через два диода, а не через один, как в схеме со средней точкой, поэтому падение напряжения на диодах в этой схеме будет в два раза больше. В связи с отмеченным обстоятельством схему со средней точкой предпочтительнее использовать при больших токах.

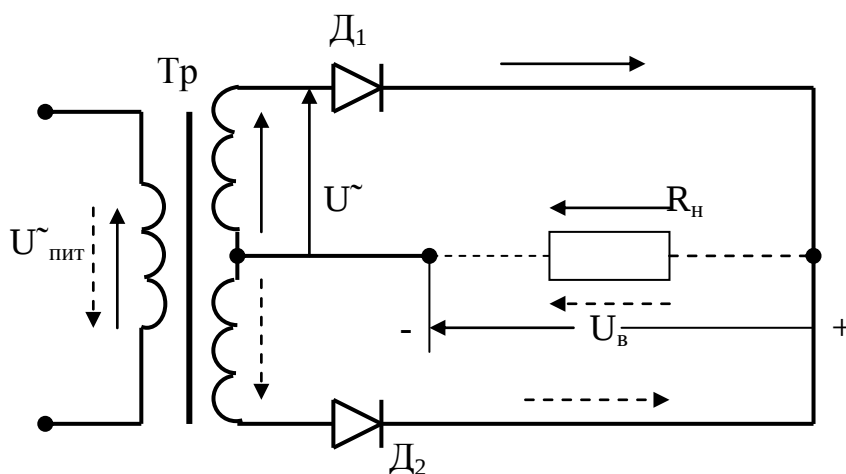


Рис. 4.3.

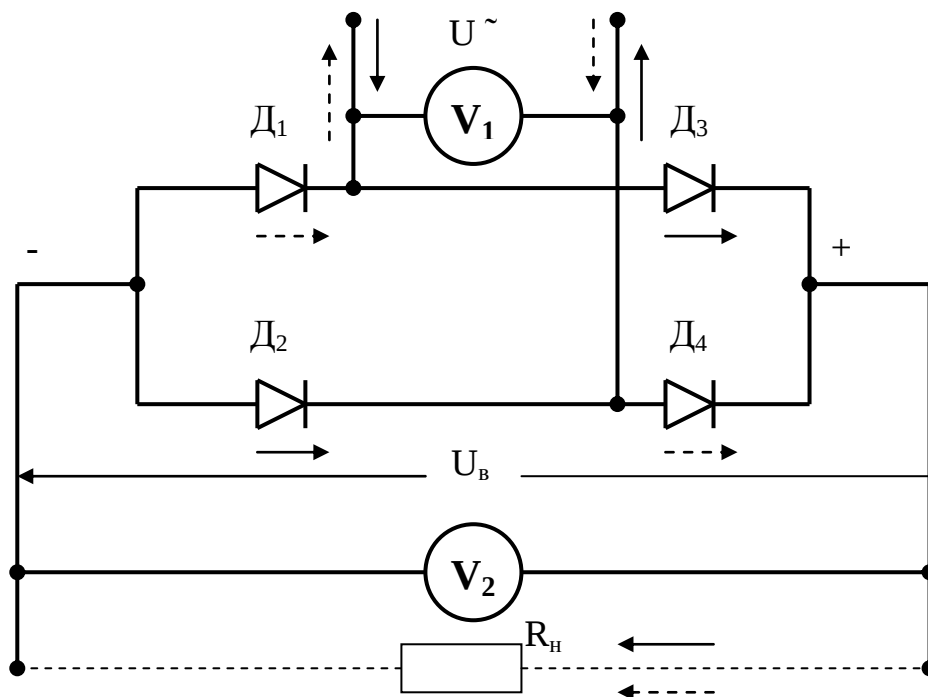


Рис. 4.4.

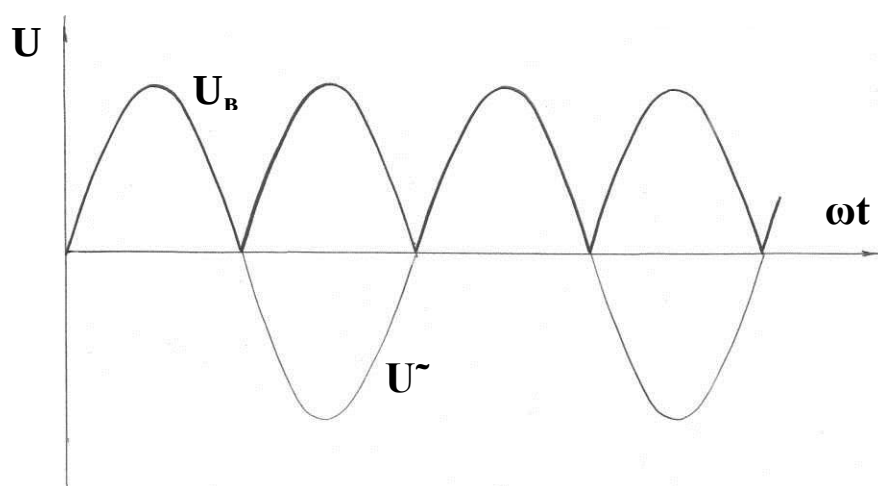


Рис. 4.5.

Кривая выпрямленного напряжения для обеих схем выглядит одинаково, она представлена на рис. 4.5.

Потребители постоянного тока большой мощности обычно питаются через выпрямители от трёхфазных цепей. Трёхфазные схемы выпрямления, как и однофазные, бывают однополупериодными (рис. 4.6) и двухполупериодными (рис. 4.8).

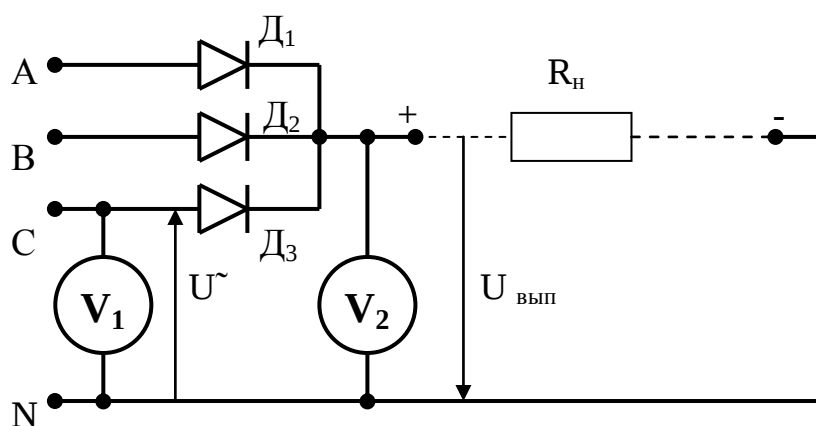


Рис.4.6

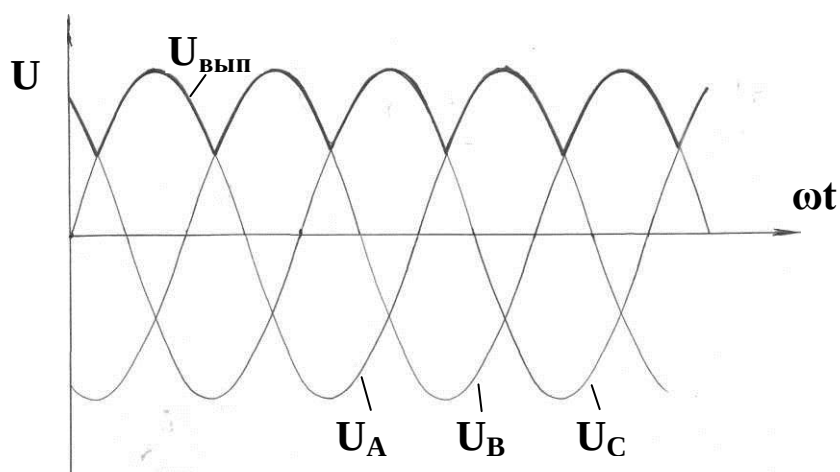


Рис.4.7.

Форма кривой выпрямленного напряжения при использовании этих схем представляет собой огибающую вершины синусоид трёхфазного напряжения. В схеме рис. 4.6 одновременно может быть открыт только один диод, на аноде которого в данный момент времени напряжение наибольшее, два другие на этом интервале времени будут закрыты, т.к. потенциал на их катодах будет выше потенциалов на анодах. Таким образом, диоды  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  открываются поочерёдно, и выпрямленный ток поочерёдно протекает по цепям фаз А, В, С. Кривая выпрямленного напряжения на рис. 4.7 изображена жирной линией.

В мостовой трёхфазной схеме (рис. 4.8) одновременно открыты два диода, расположенные между теми фазами, линейное напряжение между которыми в данный момент времени наибольшее. Остальные диоды будут закрыты, т.к. потенциалы на их катодах будут выше потенциалов анодов. На рис. 4.9 изображены синусоиды линейных напряжений трёхфазной системы.

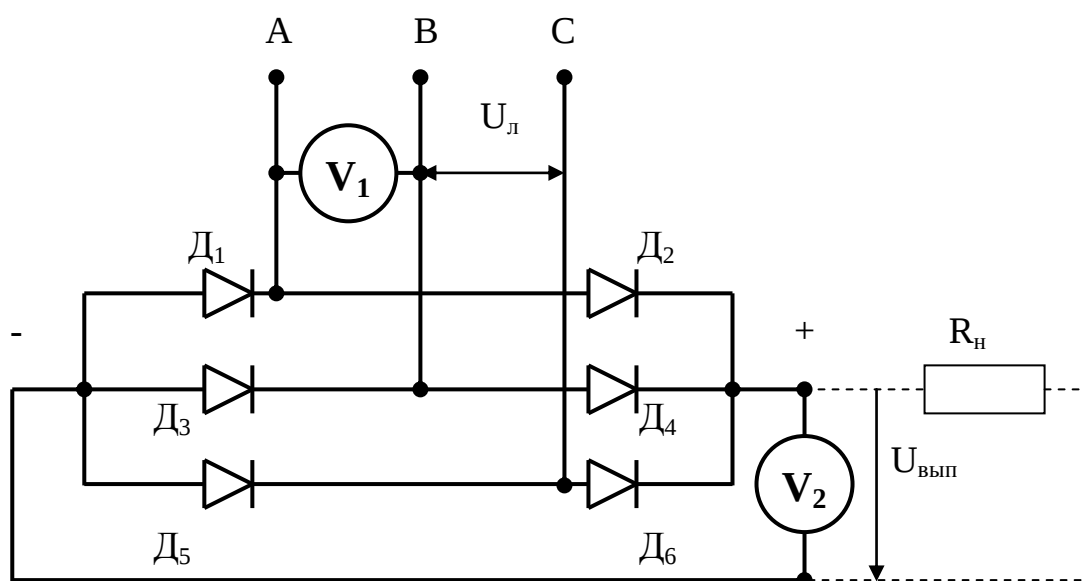


Рис. 4.8.

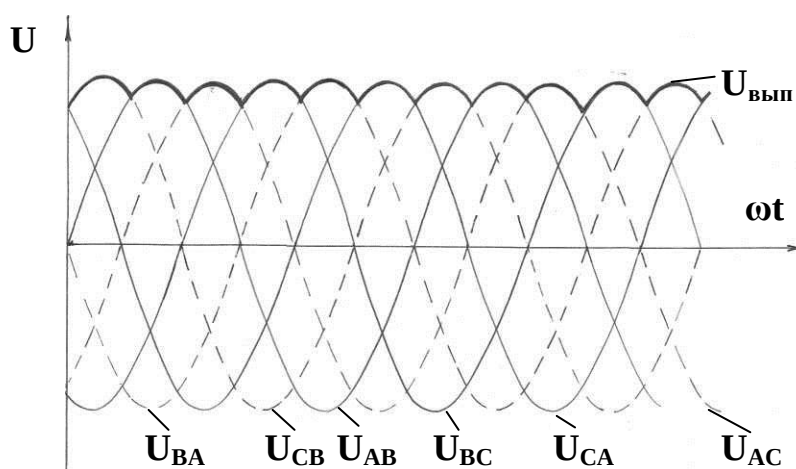


Рис. 4.9.

На промежутке  $0 < \omega t < 30^\circ$  наибольшая разность потенциалов между фазами С и В, поэтому открытыми будут диоды  $D_6$  и  $D_3$ ; на промежутке  $30^\circ < \omega t < 90^\circ$  потенциал фазы А станет больше потенциала фазы С, поэтому диод  $D_6$  закроется, а  $D_2$  – откроется. В последующие интервалы будут поочерёдно открыты:  $90^\circ < \omega t < 150^\circ$  –  $D_2, D_5$ ;  $150^\circ < \omega t < 210^\circ$  –  $D_4, D_5$ ;  $210^\circ < \omega t < 270^\circ$  –  $D_4, D_1$ ;  $270^\circ < \omega t < 330^\circ$  –  $D_6, D_1$ ;  $330^\circ < \omega t < 360^\circ$  – снова  $D_6, D_3$ , и т.д. Таким образом, между катодной и анодной группами диодов постоянно будет напряжение, равное наибольшему по абсолютному значению линейному напряжению. Кривая выпрямленного напряжения на рис. 4.9 показана жирной линией.

Среднее значение выпрямленного напряжения  $U_{cp}$  для схемы однофазного однополупериодного выпрямления определяется выражением:

$$U_{cp} = U_m / \pi = \sqrt{2} U / \pi \approx 0.45 U,$$

где  $U$  – действующее значение переменного синусоидального напряжения,

$U_m$  – амплитудное значение переменного напряжения.

Для остальных схем выпрямления

$$U_{cp} = (m / \pi) \sin(m / \pi) U_m = \sqrt{2} (m / \pi) \sin(m / \pi) U,$$

где  $m$  – число фаз выпрямляемого напряжения.

Для схемы рис. 4.3 и рис. 4.4  $m = 2$ ,  $U_{cp} = 0,637 U_m = 0,9 U$ ,

для схемы рис. 4.6  $m = 3$ ,  $U_{cp} = 0,827 U_m = 1,17 U_\phi$ ,

для схемы рис. 4.8  $m = 6$ ,  $U_{cp} = 0,955 U_m = 1,35 U_\Delta$ .

В записанных выше выражениях средние значения выпрямленного напряжения указаны без учёта падения напряжения на диодах, которое составляет от 0,5 до 2 В.

## 4.2 Содержание практической части и порядок выполнения работы

При выполнении данной лабораторной работы студенты должны собрать схемы однофазных и трёхфазных выпрямителей, сравнить действующие значения напряжения переменного тока со средними значениями выпрямленного напряжения, с помощью осциллографа снять кривые выпрямленного напряжения.

Порядок выполнения работы следующий.

1. Изучить основные теоретические положения.
2. Собрать схему рис. 4.1. Подать напряжение от источника переменного напряжения 7В. Измерить величину переменного и выпрямленного напряжений, вычислить величину падения напряжения на диоде. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 4.1.
3. Подать сигнал выпрямленного напряжения на осциллограф, зарисовать форму кривой напряжения.
4. Выполнить аналогичные замеры, вычисления, наблюдения и рисунки, собрав схемы, изображённые на рис. 4.3, 4.4, 4.6 и 4.8.

Таблица 4.1.

| Схема выпрямления            | $U$ , В | $U_{\text{ср}}$ ,<br>теоретическое | $U_{\text{ср}}$ ,<br>экспериментальное | Падение напряжения на диодах |
|------------------------------|---------|------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|
| Однофазная однополупериодная |         |                                    |                                        |                              |
| Однофазная со средней точкой |         |                                    |                                        |                              |
| Однофазная мостовая          |         |                                    |                                        |                              |
| Трёхфазная со средней точкой |         |                                    |                                        |                              |
| Трёхфазная мостовая          |         |                                    |                                        |                              |

### 4.3 Содержание отчёта

1. Основные теоретические положения.
2. Принципиальные электрические схемы выпрямителей.
3. Таблица опытных и вычисленных напряжений.
4. Рисунки кривых напряжений.

### 4.3 Контрольные вопросы

1. Нарисуйте схемы выпрямителей и укажите путь прохождения тока при изменении полярности питающего напряжения.
2. Объясните, почему при выпрямлении трёхфазного тока в схеме с нулевой точкой может быть открыт только один диод, а в мостовой схеме – только два диода.
3. Объясните последовательность открытия диодов в трёхфазной мостовой схеме.
4. По какой формуле можно вычислить значение среднего выпрямленного напряжения?
5. Почему фактическое выпрямленное напряжение несколько ниже теоретически вычисленного?

## Лабораторная работа №5

### Каскад усилителя переменного тока на биполярном транзисторе

Цель работы : изучить схему каскада усилителя переменного тока с общим эмиттером, практически освоить методику установки начальной рабочей точки транзистора в режиме А, методику получения амплитудной и частотной характеристик усилителя, определения его входного и выходного сопротивлений, проанализировать влияние на коэффициент усиления значений параметров отдельных элементов схемы.

## 5.1. Основные теоретические положения

Схема каскада усилителя переменного тока с общим эмиттером представлена на рис. 5.1.

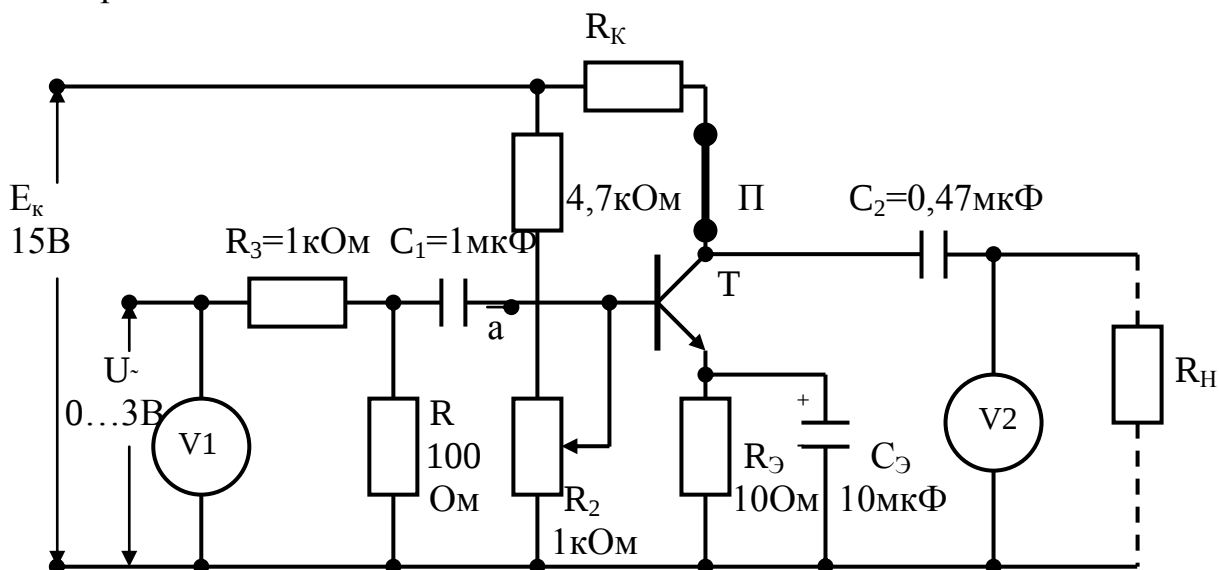


Рис. 5.1.

Питание усилителя осуществляется от источника постоянного напряжения 15В. Входной сигнал подаётся от источника синусоидального напряжения через делитель  $R_3R_4$ , который предназначен для более плавного изменения амплитуды входного сигнала и к схеме усилителя не относится.

Режим усилителя по постоянному току обеспечивается делителем напряжения  $R_1R_2$  и сопротивлением в цепи эмиттера  $R_3$ . Делителем  $R_1R_2$  настраивается положение начальной рабочей точки (НРТ), т.е. напряжение на коллекторе и ток коллектора при отсутствии входного сигнала. Положение НРТ показано на семействе выходных характеристик транзистора (рис. 5.2), оно определяет режим работы транзистора. Если НРТ находится в центре активной зоны выходных характеристик, то транзистор работает в режиме А, усиливая как положительные, так и отрицательные полуволны входного сигнала. Если положительное смещение на базе отсутствует, то транзистор работает в режиме В (точка В на рис. 5.2), усиливая только положительные волны входного сигнала. Для уменьшения нелинейных искажений, которые особенно заметны при малых токах базы, на базу транзистора подают небольшое положительное смещение (точка АВ на рис. 5.2), в этом случае транзистор усиливает положительные полуволны входного сигнала и частично – отрицательные. Режимы В и АВ используют в схемах двухтактных усилителей, в которых отрицательные и положительные полуволны усиливаются двумя разными транзисторами. В усилителе, используемом в данной лабораторной работе, транзистор работает в режиме А.. Небольшое сопротивление в цепи эмиттера  $R_3$  предназначено для стабилизации положения начальной рабочей точки, которая осуществляется следующим образом.

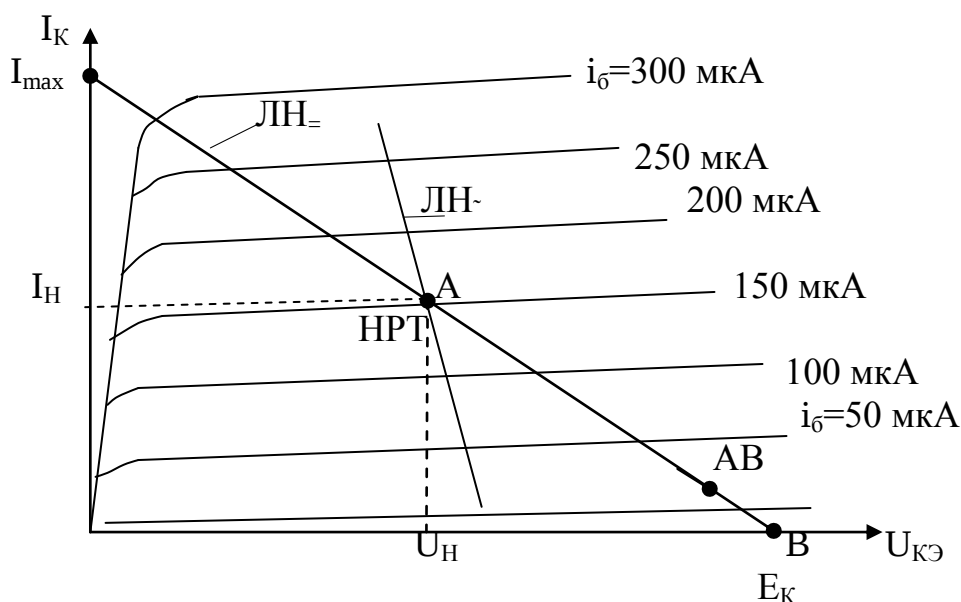


Рис. 5.2.

Ток в цепи базы определяется разностью потенциалов между базой и эмиттером, которая равна (см. рис. 5.1) :

$$U_{бэ} = U_{вх} + U_{см} - U_{ос},$$

Где  $U_{ос}$  равно произведению постоянной составляющей тока эмиттера на сопротивление  $R_э$ . Переменная составляющая тока эмиттера на величину  $U_{ос}$  влияния не оказывает, т.к. она протекает в основном через конденсатор  $C_э$ , сопротивление которого для переменной составляющей намного меньше  $R_э$ . Если по каким-либо причинам постоянная составляющая тока в цепи коллектор – эмиттер возрастёт, то соответственно возрастёт напряжение  $U_{ос}$ , а напряжение  $U_{бэ}$  понизится, что приведёт к снижению тока базы и стабилизации НРТ. При снижении постоянной составляющей тока цепи коллектор – эмиттер происходит обратный процесс.

Наличие конденсатора  $C_э$  исключает отрицательную обратную связь по переменной составляющей и тем самым исключает уменьшение коэффициента усиления усилителя, которое имело бы место при наличии этой связи.

Выходное напряжение усилителя в цепь нагрузки  $R_H$  снимается с коллектора транзистора. При положительной полуволне входного напряжения сопротивление транзистора уменьшается и потенциал на коллекторе снижается. При отрицательной полуволне входного усиливаемого сигнала сопротивление транзистора увеличивается и потенциал на базе повышается. Таким образом, фаза напряжения на выходе усилителя противоположна фазе входного сигнала.

Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  являются разделительными, препятствующими протеканию постоянного тока от источника питания во входной цепи и в цепи нагрузки, их сопротивление для токов усиливаемых частот должно быть незначительным.

Итак, режим работы транзистора по постоянному току определяется напряжением источника питания, величиной сопротивления цепи коллектор – эмит-

тер и током базы. При отсутствии тока базы транзистор полностью закрыт, т.е. ток коллектора близок к нулю и всё напряжение питания падает на сопротивлении транзистора (точка В на рис. 5.2). Если предположить, что транзистор полностью открыт (т.е. его сопротивление равно нулю), то всё напряжение источника питания будет падать на сопротивлениях  $R_K$  и  $R_{Э}$ , а ток в цепи коллектора будет:

$$I_K = I_{\max} = E_K / (R_K + R_{Э}).$$

При изменении постоянной составляющей тока базы режим работы по постоянному току будет определяться линией, соединяющей точки В и  $I_{\max}$ . Эту линию называют линией нагрузки по постоянному току (см. рис. 5.2).

Цепь, по которой в усилителе замыкается переменный ток, отличается от цепи постоянного тока. Во-первых, из цепи переменного тока практически исключается сопротивление  $R_{Э}$ , т.к. оно шунтировано конденсатором  $C_{Э}$ ; во-вторых, ёмкости конденсаторов  $C_{Э}$  и  $C_2$  принимают настолько большими, что их сопротивления оказываются пренебрежимо малыми по сравнению с сопротивлениями  $R_K$  и  $R_H$ . Сопротивление источника питания обычно также на 2 – 3 порядка ниже последних двух сопротивлений. В связи с отмеченными обстоятельствами схема замещения цепи переменного тока выглядит так, как представлено на рис. 5.3а.

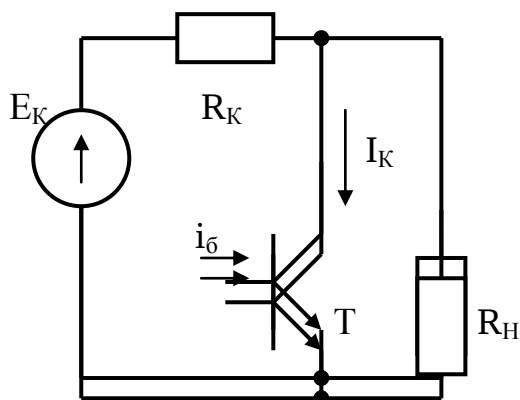


Рис. 5.3а.

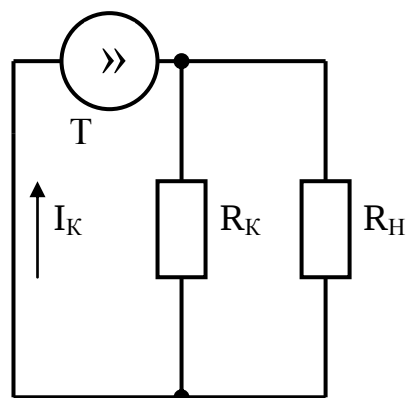


Рис. 5.3б.

Обратим внимание на то, что выходные характеристики транзистора в активной зоне практически горизонтальны, т.е. ток через транзистор не зависит от напряжения коллектор – эмиттер, а определяется только током базы, поэтому транзистор в этой зоне можно рассматривать как источник тока, управляемый током базы  $I_K = \beta \cdot i_6$ , где  $\beta$  – коэффициент усиления базового тока. В этом случае, с учётом того, что сопротивлением источника питания можно пренебречь, схема замещения примет вид, изображённый на рис. 5.3б. В этой схеме сопротивления  $R_K$  и  $R_H$  включены параллельно, поэтому переменная составляющая тока коллектора и, соответственно, наклон линии нагрузки по переменному току определяются сопротивлением

$$R_K R_H / (R_K + R_H).$$

Т.к. это сопротивление всегда меньше, чем сопротивление  $R_K + R_H$ , то и линия нагрузки по переменному току для данного усилителя имеет больший наклон, чем по постоянному.

Одними из основных параметров усилителей являются коэффициенты усиления. Каскад по схеме с общим эмиттером усиливает как напряжение, так и ток. Под коэффициентом усиления по напряжению понимают отношение амплитуды напряжения на нагрузке к амплитуде напряжения входного сигнала:

$$K_U = U_{Hm} / U_{Bx m}.$$

Амплитуда напряжения на нагрузке (см. рис. 5.3б):

$$U_{Hm} = I_{Km} R_K R_H / (R_K + R_H) = \beta I_{bm} R_K R_H / (R_K + R_H).$$

Амплитуда напряжения входного сигнала также может быть выражена через амплитуду тока базы  $I_{bm}$ :

$$U_{Bx m} = I_{bm} r_b + I_{эм} r_э,$$

где  $r_b$  и  $r_э$  - , соответственно, сопротивления базы и эмиттера транзистора,

$I_{эм}$  – амплитуда тока эмиттера.

Но  $I_{эм} = I_{bm}(1 + \beta)$ , поэтому

$$U_{Bx m} = I_{bm} r_b + I_{bm} r_э (1 + \beta) = I_{bm} [r_b + r_э (1 + \beta)] = I_{bm} h_{11},$$

где  $h_{11} = r_b + r_э (1 + \beta)$  – динамическое входное сопротивление транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером.

Таким образом, коэффициент усиления каскада по напряжению

$$K_U = U_{Hm} / U_{Bx m} = (\beta / h_{11}) [R_K R_H / (R_K + R_H)].$$

Как следует из полученного выражения, коэффициент усиления зависит как от параметров транзистора, так и от сопротивлений  $R_K$  и  $R_H$ .

Коэффициент усиления по току определяется как отношение амплитуд тока в цепи нагрузки и в цепи базы:

$$K_i = I_{Hm} / I_{bm}.$$

$$I_{Hm} = U_{Hm} / R_H = \beta I_{bm} R_K / (R_K + R_H),$$

$$K_i = \beta R_K / (R_K + R_H).$$

Качество работы усилителей и область их применения определяются такими характеристиками, как амплитудная, амплитудно-частотная и фазо-частотная.

Амплитудная характеристика отражает зависимость выходного сигнала (напряжения или тока) от амплитуды входного. Вид амплитудной характеристики представлен на рис. 5.4. Точка 1 соответствует напряжению шумов, измеряемому при  $U_{Bx} = 0$ . Точка 2 характеризует минимальное значение входного сигнала, различимое на фоне шумов. Между точками 2 и 3 расположен рабочий диапазон усилителя. После точки 3 происходят существенные нелинейные искажения входного сигнала. Величина  $D = U_{Bx max} / U_{Bx min}$  носит название динамического диапазона усилителя.

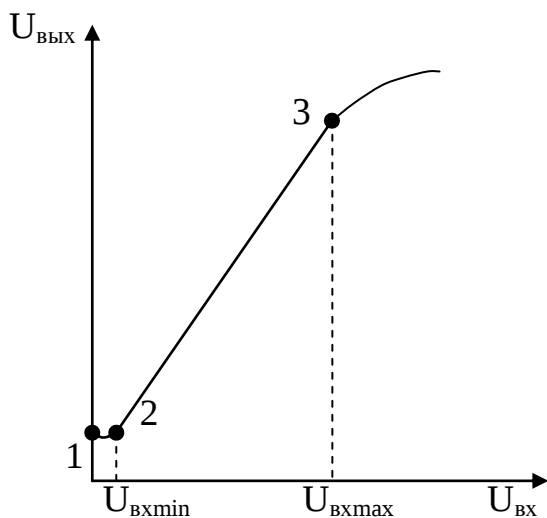


Рис. 5.4.

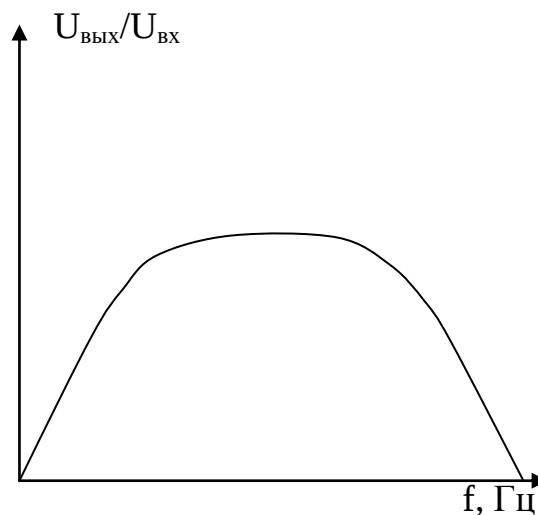


Рис. 5.5.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) представляет зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигналов от частоты усиливаемого сигнала. Для рассматриваемой схемы усилительного каскада она имеет вид, изображённый на рис. 5.5. Фазо-частотная характеристика отражает зависимость фазового сдвига между выходным и входным синусоидальными сигналами от частоты.

В ряде случаев важное значение имеют такие параметры усилителя, как входное  $R_{ВХ}$  и выходное  $R_{ВЫХ}$  сопротивления. Эти сопротивления для собранного каскада нетрудно определить опытным путём.

Напряжение на выходе усилителя определяется через напряжение на входе и коэффициент усиления:

$$U_{ВЫХ1} = K_U U_{ВХ} \quad (5.1),$$

при этом

$$I_6 = U_{ВХ} / R_{ВХ}.$$

Если, не изменяя входного напряжения, в цепь базы включить добавочное сопротивление  $R_{доб}$ , то ток базы будет:

$$I_6 = U_{ВХ} / (R_{ВХ} + R_{доб}),$$

а напряжение в цепи эмиттер – база (исключая добавочное сопротивление) будет равно:

$$I_6 R_{ВХ} = U_{ВХ} R_{ВХ} / (R_{ВХ} + R_{доб}),$$

при этом напряжение на выходе усилителя уменьшится и станет равным

$$U_{ВЫХ2} = K_U U_{ВХ} R_{ВХ} / (R_{ВХ} + R_{доб}) \quad (5.2).$$

Разделив (5.1) на (5.2), получим:

$$U_{ВЫХ1} / U_{ВЫХ2} = (R_{ВХ} + R_{доб}) / R_{ВХ}, \text{ откуда}$$

$$R_{ВХ} = R_{доб} U_{ВЫХ2} / (U_{ВЫХ1} - U_{ВЫХ2}) \quad (5.3).$$

Таким образом, включив в разрыв цепи входного сигнала (точка «а» на рис.5.1) добавочное сопротивление и измерив напряжения на выходе усилителя до и после его включения при неизменном входном сигнале, входное сопротивление можно вычислить по формуле (3).

Для определения выходного сопротивления необходимо при некотором входном сигнале измерить напряжение  $U_{\text{вых1}}$  при отсутствии нагрузки. Это напряжение:

$$U_{\text{вых1}} = K_U U_{\text{вх}} \quad (5.4).$$

Затем, не изменяя входного сигнала, на выход усилителя включить сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$ . При этом напряжение на выходе уменьшится и станет равным  $U_{\text{вых2}} = K_U U_{\text{вх}} - I_{\text{вых}} R_{\text{вых}}$ , но  $I_{\text{вых}} = U_{\text{вых2}} / R_{\text{н}}$ , поэтому

$$U_{\text{вых2}} = K_U U_{\text{вх}} - U_{\text{вых2}} R_{\text{вых}} / R_{\text{н}}, \text{ далее, используя (5.4), имеем:}$$

$$U_{\text{вых2}} = U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}} R_{\text{вых}} / R_{\text{н}}, \text{ откуда}$$

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{н}} (U_{\text{вых1}} / U_{\text{вых2}} - 1) \quad (5.5).$$

## 5.2 Содержание практической части и порядок выполнения работы

В данной лабораторной работе необходимо выполнить следующее:

- собрать схему усилителя, установить начальную рабочую точку;
- снять амплитудную характеристику каскада, определить его коэффициент усиления по напряжению и динамический диапазон;
- проанализировать влияние на амплитудную характеристику и, соответственно, на коэффициент усиления по напряжению наличия конденсатора в цепи эмиттера и величины сопротивления в цепи коллектора при неизменном сопротивлении нагрузки;
- определить входное и выходное сопротивления каскада;
- снять амплитудно-частотную характеристику каскада.

Порядок выполнения работы следующий:

1. Изучить основные теоретические положения.
2. Собрать схему, изображенную на рис. 5.1, приняв  $R_{\text{к}} = 470 \text{ Ом}$ .
3. На выходе генератора синусоидального напряжения установить частоту 2...5 кГц (по указанию преподавателя) и напряжение 2 В, при этом напряжение на входе усилителя будет 0,2 В. Потенциометром смещения напряжения на базе установить максимальное выходное напряжение усилителя. Сигнал выходного напряжения подать на осциллограф и дополнительной настройкой смещения добиться формы выходного сигнала, наиболее близкой к синусоидальной. В дальнейшем, при выполнении лабораторной работы положение потенциометра смещения не изменять.

4. Отключить напряжение входного сигнала. Одним из мультиметров измерить постоянное напряжение между коллектором и эмиттером и ток в цепи коллектора, включив амперметр вместо перемычки «П». Координаты полученной рабочей точки нанести на график выходных характеристик транзистора, полученный при выполнении предыдущей лабораторной работы и провести

линию нагрузки по постоянному току.

5. В цепь нагрузки включить сопротивление 470 Ом. Не подавая входного сигнала, измерить напряжение на нагрузке. Подать входной сигнал, и при постоянной частоте, изменяя его амплитуду, записать в таблицу 5.1 значения выходного напряжения. Вычислить значения коэффициента усиления по напряжению.

Таблица 5.1.

| $U_{\text{вх}}, \text{В}$ |                            | 0 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 |
|---------------------------|----------------------------|---|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| С конденсатором $C_3$     | $U_{\text{вых}}, \text{В}$ |   |      |     |      |     |      |     |      |
|                           | $K_U$                      |   |      |     |      |     |      |     |      |
| Без конденсатора $C_3$    | $U_{\text{вых}}, \text{В}$ |   |      |     |      |     |      |     |      |
|                           | $K_U$                      |   |      |     |      |     |      |     |      |

По результатам замеров построить амплитудную характеристику и определить динамический диапазон усиления.

6. Убрать из схемы конденсатор  $C_3$  и повторить испытания аналогично п.5.

7. Конденсатор  $C_3$  установить на прежнее место, на вход усилителя подать напряжение 0.2 В. Устанавливая значения сопротивления  $R_k$ , указанные в таблице 5.2, записать в таблицу значения выходного напряжения, вычислить и также записать в таблицу значения  $K_U$ .

Таблица 5.2.

| $R_k, \text{Ом}$           | 150 | 220 | 330 | 470 | 660 | 1000 |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $U_{\text{вых}}, \text{В}$ |     |     |     |     |     |      |
| $K_U$                      |     |     |     |     |     |      |

8. Установить входное напряжение 0.2 В. Устанавливая значения частоты входного сигнала, указанные в таблице 5.3, и не меняя амплитуду входного напряжения, записать в таблицу значения выходного напряжения. По результатам замеров построить АЧХ.

Таблица 5.3.

| $f, \text{кГц}$                  | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 1,6 | 3,2 | 6,8 | 12 | 15 | 20 |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|
| $U_{\text{вых}}, \text{В}$       |     |     |     |     |     |     |    |    |    |
| $U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$ |     |     |     |     |     |     |    |    |    |

9. При  $R_H = 0$  и входном напряжении 0,2 В замерить напряжение  $U_{\text{вых1}}$ . В цепь базы (точка «а» на рис. 5.1) включить добавочное сопротивление 330 Ом, при том же значении входного напряжения замерить  $U_{\text{вых2}}$ . По формуле (3) вычислить входное сопротивление усилителя.

10. Исключить добавочное сопротивление из цепи базы. Замерить выходное напряжение усилителя  $U_{\text{вых1}}$  при отсутствии нагрузки на его выходе. Включив сопротивление нагрузки 470 Ом при  $R_k = 470$  Ом и при прежнем входном сигнале измерить  $U_{\text{вых2}}$ . По формуле (5) вычислить входное сопротивление усилителя.

### 5.3 Содержание отчёта

1. Схема каскада усилителя с описанием назначения элементов схемы.
2. Таблицы опытных данных.
3. Амплитудные характеристики, соответствующие таблице 5.1.
4. График зависимости коэффициента усиления по напряжению от сопротивления в цепи коллектора, построенный по данным таблицы 5.2.
5. График АЧХ, построенный по данным таблицы 5.3.
6. Вычисления значений входного и выходного сопротивлений.

### 5.4 Контрольные вопросы

1. Что понимают под начальной рабочей точкой усилителя?
2. Как зависит режим работы усилителя от положения НРТ ?
3. Чем обеспечивается положение НРТ в рассматриваемом усилителе?
4. Какую роль выполняет сопротивление в цепи эмиттера?
5. Для чего сопротивление в цепи эмиттера шунтируют конденсатором?
6. Какую роль выполняют конденсаторы в цепи базы и на выходе усилителя?
7. Как построить линию нагрузки усилителя по постоянному току?
8. Объясните схему замещения усилителя по переменному току.
9. Каким сопротивлением определяется наклон линии нагрузки усилителя по переменному току?
10. Что понимают под амплитудной характеристикой усилителя?
11. Что представляют собой амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики усилителя?
12. Что называют динамическим диапазоном усилителя?
13. От чего зависит величина коэффициентов усиления усилителя?
14. Как опытным путём определить величину входного и выходного сопротивлений усилителя?
15. Как изменится коэффициент усиления усилителя, если сопротивление в цепи эмиттера не шунтировать конденсатором?
16. Как коэффициент усиления усилителя зависит от сопротивления в цепи коллектора?
17. Объясните, почему выходной сигнал усилителя отличается от входного по фазе на  $180^\circ$ ?

## Лабораторная работа №6

### Усилитель на полевом транзисторе

Цель работы: исследовать работу усилительного каскада на полевом транзисторе с общим истоком, снять его амплитудную и амплитудно-частотную характеристики, определить входное и выходное сопротивления.

## 6.1 Основные теоретические положения

Схема каскада усилителя с общим истоком изображена на рис. 6.1.

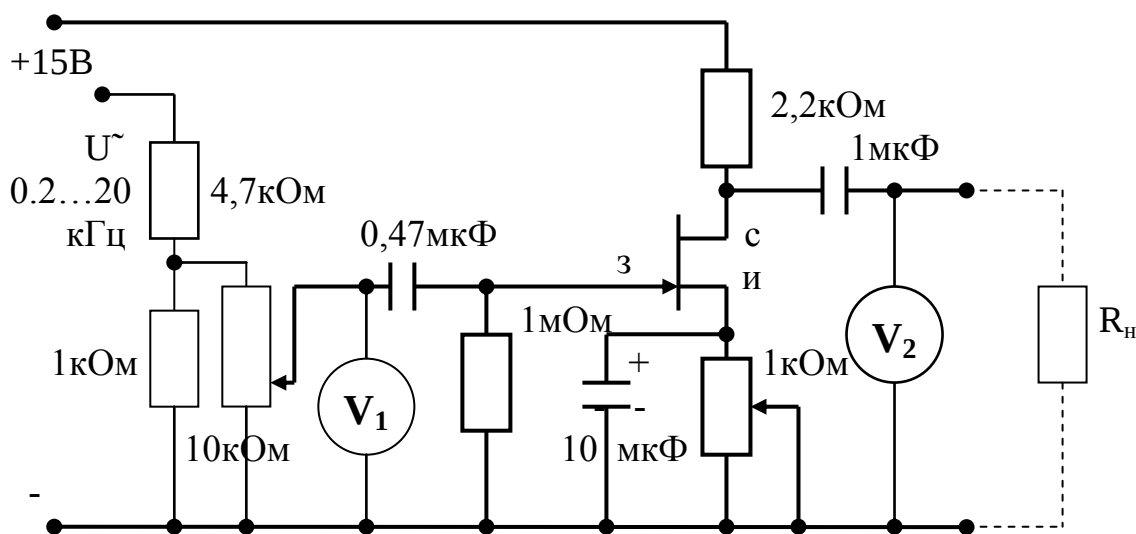


Рис.6.1.

Питание усилителя осуществляется от источника постоянного напряжения 15В. Входной усиливаемый сигнал подаётся от генератора синусоидального напряжения переменной частоты. Для более плавного изменения амплитуды входного сигнала служит делитель напряжения, состоящий из постоянных резисторов 4,7 и 1 кОм и переменного резистора 10 кОм. Разделительные конденсаторы 0,47 мкФ и 1 мкФ препятствуют прохождению постоянного тока в цепь источника входного сигнала и в цепь нагрузки, в качестве которой в лабораторной работе используется резистор  $R_n$ . Для установки начальной рабочей точки транзистора служит сопротивление, включённое в цепь истока, напряжение с которого подаётся на затвор через резистор 1 мОм. Начальная рабочая точка устанавливается в средней части линейного участка стокзатворной характеристики, в этом случае усиливаются как положительные, так и отрицательные полуволны входного сигнала при минимальных нелинейных искажениях. Конденсатор в цепи истока исключает отрицательную обратную связь по переменной составляющей сигнала.

Основными характеристиками усилителя с полевым транзистором, как и с биполярным, являются амплитудная, амплитудно-частотная и фазо-частотная. Ввиду того, что во входной цепи полевого транзистора ток практически отсутствует, коэффициенты усиления по току и по мощности каскада с полевым транзистором обычно не используются, а используется только коэффициент усиления по напряжению. Из параметров усилителя используются также входное и выходное сопротивления, которые определяют опытным путём по той же методике, что и для усилителей с биполярными транзисторами.

## 6.2 Содержание практической части и порядок выполнения работы

При выполнении данной лабораторной работы студенты должны собрать схему каскада усилителя на полевом транзисторе с общим истоком, снять амплитудную характеристику в режиме холостого хода и под нагрузкой, вычислить коэффициент усиления по напряжению, снять амплитудно-частотную характеристику, определить входное и выходное сопротивления усилителя.

Порядок выполнения работы следующий.

1. Собрать схему усилителя (рис. 6.1).
2. На выход усилителя включить осциллограф. При частоте входного сигнала 2 кГц и напряжении 0,5 В изменением сопротивления в цепи истока добиться минимального искажения выходного сигнала.
3. При частоте входного сигнала, заданной преподавателем, снять амплитудную характеристику в режиме холостого хода. При значениях входного напряжения, указанных в таблице 6.1, измерить и внести в таблицу величину выходного напряжения и вычисленные значения коэффициента усиления по напряжению.
4. То же проделать, включив на выход усилителя сопротивление нагрузки, заданное преподавателем.

Таблица 6.1.

| $U_{вх}, В$ | 0,01      | 0,02 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
|-------------|-----------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| При $R_H=0$ | $U_{вых}$ |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |
|             | $K_U$     |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |
| При $R_H=$  | $U_{вых}$ |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |
|             | $K_U$     |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |

5. Снять амплитудно-частотную характеристику при напряжении входного сигнала 0,5 В и при частотах, указанных в таблице 6.2, измеренные значения выходного напряжения и вычисленные значения коэффициента усиления занести в таблицу.

Таблица 6.2.

| $f, кГц$     | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 1 | 2 | 4 | 8 | 12 | 15 | 18 | 20 |
|--------------|-----|-----|-----|---|---|---|---|----|----|----|----|
| $U_{вых}, В$ |     |     |     |   |   |   |   |    |    |    |    |
| $K_U$        |     |     |     |   |   |   |   |    |    |    |    |

6. Для определения входного сопротивления измерить выходное напряжение  $U_1$  в режиме холостого хода при заданной преподавателем частоте и при напряжении входного сигнала 0,5 В. Во входную цепь последовательно с раз-делительным конденсатором включить сопротивление  $R_{доб}=10 кОм$  и измерить напряжение на выходе  $U_2$ . Входное сопротивление вычислить по формуле:

$$R_{вх} = R_{доб} / (U_1 / U_2 - 1).$$

7. Исключить из схемы добавочное сопротивление. Включить сопротивление нагрузки 10 кОм, и при тех же значениях частоты и входного напряжения измерить напряжение  $U_3$  на выходе усилителя. Выходное сопротивление усилителя вычислить по формуле:

$$R_{\text{вых}} = R_n(U_1/U_3 - 1).$$

8. Построить графики амплитудных и амплитудно-частотной характеристик.

### 6.3 Содержание отчёта

1. Принципиальная схема усилительного каскада.
2. Описание назначения элементов схемы.
3. Таблицы опытных данных.
4. Графики амплитудных и амплитудно-частотной характеристик.
5. Описание порядка определения входного и выходного сопротивлений усилителя.

### 6.4 Контрольные вопросы

1. Объясните назначение элементов каскада усилителя.
2. Как установить положение начальной рабочей точки, чтобы получить минимальные нелинейные искажения усиливаемого сигнала?
3. Что представляет собой амплитудная характеристика усилителя? Как её получить?
4. Как амплитудная характеристика усилителя зависит от нагрузки?
5. Что представляет собой амплитудно-частотная характеристика усилителя? Как её получить?
6. Как определяют входное сопротивление усилителя?
7. Как определяют выходное сопротивление усилителя?

## Лабораторная работа №7

### Тиристор

Цель работы: исследовать процессы отпирания и запираания тиристора, снять статические вольтамперные характеристики цепи управления и анодной цепи.

#### 7.1 Основные теоретические положения.

Тиристор – это полупроводниковый прибор, имеющий четырёхслойную структуру и три *pn*-перехода. У тиристора имеется три электрода, два из которых подсоединены к крайним слоям – это *анод* и *катод*, третий электрод подсоединён к одному из средних слоёв – это *управляющий электрод*.

Если при отключённом управляющем электроде между анодом и катодом

подать напряжение и его постепенно увеличивать, то до некоторого его значения сопротивление тиристора будет оставаться очень высоким и ток через него будет практически отсутствовать, затем сопротивление тиристора резко упадёт, и падение напряжения на нём составит не более двух вольт, тиристор откроется. Однако открывания тиристора повышением анодного напряжения следует избегать, т.к. при этом может произойти его разрушение. Открывают тиристор подачей напряжения на управляющий электрод. После снятия напряжения с управляющего электрода тиристор остаётся в открытом состоянии. Чтобы тиристор закрылся, анодное напряжение необходимо кратковременно снять, либо, увеличивая сопротивление в цепи анод-катод, снизить ток ниже так называемого тока удержания.

Описанные свойства тиристора используют в таких устройствах, как управляемые выпрямители, инверторы, частотные преобразователи, пусковые аппараты и др.

## 7.2 Содержание практической части и порядок выполнения работы

Данная лабораторная работа включает в себя снятие вольтамперной характеристики цепи управления, определение тока удержания тиристора и испытание способа отключения тиристора шунтированием цепи анод-катод ёмкостью.

Порядок выполнения работы следующий.

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями.
2. Собрать схему, изображённую на рис. 7.1.
3. На мультиметрах установить предел измерения тока 2 мА и напряжения 20 В. Увеличивая потенциометром напряжение  $U_{ук}$ , измерить и занести в таблицу 7.1 значения тока управления  $I_y$ . Заметить ток, при котором тиристор открывается (при открывании тиристора загорается лампочка).
4. Постепенно снижая напряжение  $U_{ук}$  до нуля, измерить и занести в таблицу значения тока  $I_y$ . Убедиться, что при снижении тока управления до нуля тиристор остаётся открытым.

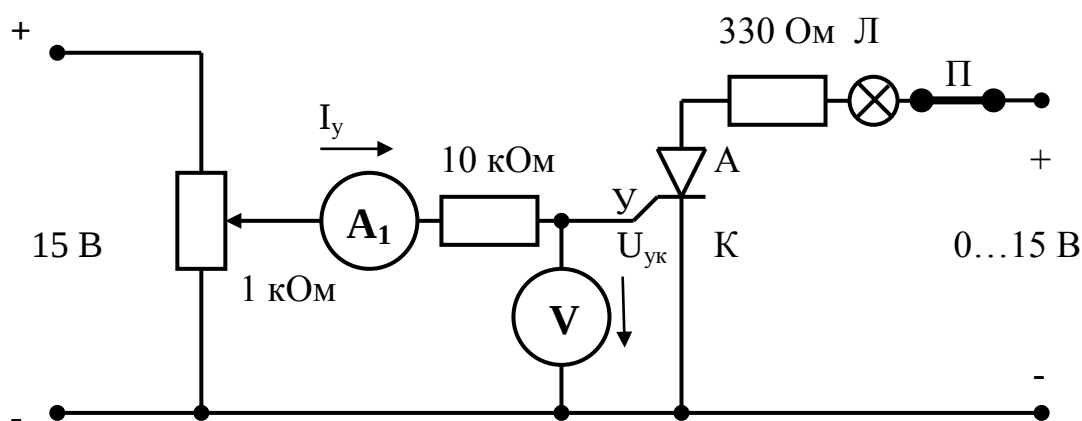


Рис. 7.1.

Таблица 7.1.

|                      |     |   |     |   |     |   |   |     |
|----------------------|-----|---|-----|---|-----|---|---|-----|
| $U_{ук}, В$          | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | ? | 3,5 |
| $I_y \uparrow, мА$   |     |   |     |   |     |   |   |     |
| $I_y \downarrow, мА$ |     |   |     |   |     |   |   |     |

5. Построить график зависимости  $I_y = f(U_{ук})$ .
6. Для определения тока удержания переключку П и амперметр поменять местами, переключить шкалу амперметра на 200 мА. Увеличив ток управления, открыть тиристор. Плавно уменьшать напряжение в анодной цепи до тех пор, пока ток скачком не упадёт до нуля. Последнее наименьшее значение тока и есть ток удержания. Запишите его значение.
7. Отключить источники питания, собранную схему дополнить схемой, изображённой на рис. 7.2 жирными линиями.

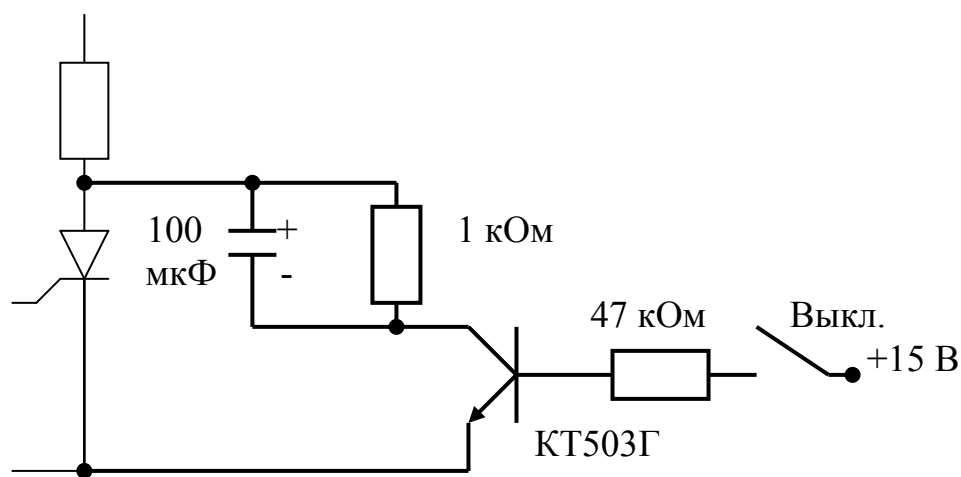


Рис.7.2.

8. Подать на схему напряжение питания, в анодной цепи тиристора установить наибольшее напряжение, увеличивая ток управления, открыть тиристор. Уменьшить ток управления до нуля, при этом тиристор останется открытым. Кратковременно замкнуть выключатель, убедиться в том, что при включении выключателя тиристор отключается. Описанные действия повторить 2 – 3 раза. При замыкании выключателя сопротивление транзистора уменьшается до незначительной величины, в результате чего тиристор оказывается шунтированным конденсатором, напряжение на котором (а следовательно и на тиристоре) согласно законам коммутации в первый момент после замыкания цепи равно нулю. Этого кратковременного падения напряжения на тиристоре достаточно для его запираения.

### 7.3 Содержание отчёта

1. Основные теоретические положения.

2. Принципиальная схема испытаний тиристора.
3. Таблица опытных данных.
4. График вольтамперной характеристики цепи управления.
5. Измеренное значение тока удержания.

## **7.4 Контрольные вопросы**

1. Опишите в общих чертах конструкцию тиристора.
2. Какими способами можно открыть тиристор?
3. Что произойдёт с режимом работы тиристора, если после его открывания ток управления уменьшить до нуля?
4. Какими способами можно закрыть тиристор?
5. Что понимают под током удержания тиристора?
6. Поясните работу схемы запираания тиристора путём его шунтирования конденсатором.

## **Лабораторная работа №8**

### **Тиристорный регулятор тока**

Цель работы: исследовать работу тиристорного регулятора выпрямленного тока с фазным управлением.

### **8.1 Основные теоретические положения**

Схема тиристорного регулятора выпрямленного тока с фазным способом управления представлена на рис. 8.1.

Переменное напряжение частотой 50 Гц, выпрямленное диодным мостиком Д1 – Д4, подаётся на зажимы цепи, состоящей из лампочки Л, нагрузочного сопротивления 220 Ом и тиристора Т. Остальные элементы представляют схему генератора импульсов, предназначенного для фазового управления тиристором. При фазовом способе управления на управляющий электрод тиристора подаются короткие импульсы напряжения, отпирающие тиристор в определённой точке приложенного напряжения. Запирается тиристор при снижении полуволны выпрямленного напряжения до нуля. Среднее значение тока, протекающего через нагрузочное сопротивление, определяется положением отпирающего импульса относительно начала полуволны выпрямленного напряжения, иначе – углом фазового сдвига отпирающего импульса.

Генератор импульсов выполнен на однопереходном транзисторе ТО. При подаче полуволны напряжения на анод запёртого тиристора Т конденсатор заряжается через сопротивления  $R_1$ ,  $R_n$  и  $R_2$ . Как только напряжение заряда достигнет величины, достаточной для отпираания транзистора ТО, транзистор отпирается и конденсатор разряжается по цепи эмиттер – база – управляющий электрод тиристора.

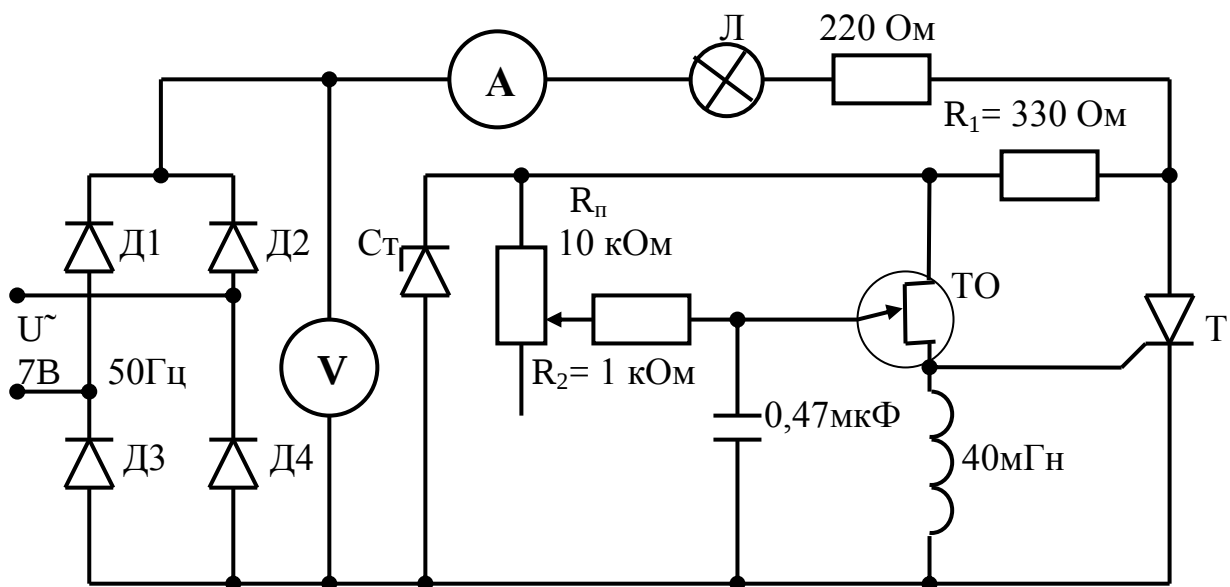


Рис. 8.1.

Тиристор отпирается, создаёт цепь для протекания тока через нагрузку и одновременно шунтирует генератор импульсов. Таким образом, пока тиристор открыт, конденсатор остаётся разряженным. В конце полуволны выпрямленного напряжения тиристор закрывается. Скорость заряда конденсатора и, следовательно, задержка подачи отпирающего импульса по отношению к моменту подачи положительного напряжения на анод тиристора регулируется потенциометром  $R_{\text{п}}$ . Индуктивность в цепи базы транзистора предназначена для более чёткого его запираения.

## 8.2. Содержание практической части и порядок выполнения работы

В процессе выполнения данной лабораторной работы необходимо собрать схему тиристорного регулятора тока, опробовать её работу при разных углах отпирания, пронаблюдать на осциллографе кривую изменения напряжения на сопротивлении нагрузки.

Порядок выполнения работы следующий.

1. Соберите схему, изображённую на рис. 8.1. Установите на мультиметрах предел изменения напряжения 20 В и предел тока – 200 мА, род тока – постоянный. Подайте напряжение питания 7 В, 50 Гц.
2. Вращая рукоятку потенциометра, зафиксируйте минимальное и максимальное значения тока в цепи нагрузки.
3. Замените конденсатор ёмкостью 0,47 мкФ на конденсатор 0,1 мкФ. Зафиксируйте новые значения минимального и максимального напряжений.
4. Подключите на зажимы сопротивления нагрузки осциллограф, пронаблюдайте и зарисуйте кривые изменения напряжения на нагрузке при разных углах отпирания тиристора.

### 8.3 Содержание отчёта

1. Описание фазового способа управления тиристором.
2. Принципиальная электрическая схема тиристорного регулятора тока.
3. Значения напряжений на сопротивлении нагрузки при разных ёмкостях конденсатора.
4. Кривые напряжений на нагрузке при разных углах отпирания тиристора.

### 8.4 Контрольные вопросы

1. Как выглядит фазовый способ управления тиристором?
2. В результате чего запирается тиристор в схеме регулирования величины выпрямленного тока?
3. От чего зависит время задержки управляющего импульса?
4. Опишите работу генератора импульсов.
5. Что называют углом отпирания тиристора?
6. Как изменяется ток в цепи нагрузки при увеличении угла отпирания тиристора?

## Лабораторная работа №9

### Тиристорный регулятор напряжения

*Цель работы:* изучить принципы регулирования напряжения с использованием полупроводниковых приборов; снять регулировочную и нагрузочную характеристики регулятора напряжения.

#### 9.1. Основные теоретические положения

Для управления многими технологическими процессами требуется изменять величину напряжения, подводимого к электроустановке. Такими электроустановками могут быть электронагреватели, двигатели и др. Для регулирования величины напряжения широко применяют тиристоры и симисторы, к.п.д. которых очень высок благодаря тому, что в процессе работы они находятся либо в полностью открытом, либо в полностью закрытом состоянии. Регулирование величины напряжения переменного тока с помощью тириستоров или симисторов можно производить двумя методами. Первый метод – метод фазового управления, при котором величина управляющего сигнала определяет фазу открытия полупроводникового прибора (см. рис. 1). Второй метод – метод, при котором величина управляющего сигнала определяет число пропускаемых в единицу времени к нагрузке целых полупериодов напряжения (рис. 2).

$U_{\text{вип}}$

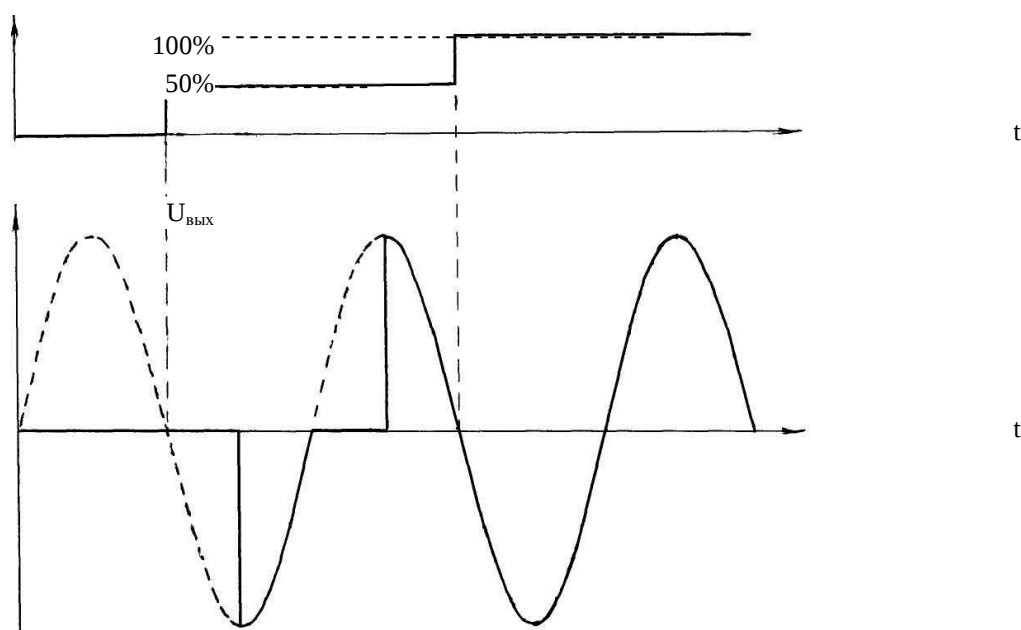


Рис. 1.

В данной лабораторной работе используется блок управления, позволяющий осуществлять оба метода изменения напряжения.

При использовании обоих методов действующее и среднее значения выходного напряжения пропорциональны управляющему сигналу.

При использовании фазного метода пульсации напряжения на выходе преобразователя значительно ниже, чем при втором методе. Вместе с тем, при фазном методе управления регулятор напряжения является источником высших гармоник тока, которые отрицательно сказываются на работе систем электропитания. В связи с этим при значительных мощностях желательно, там где это возможно, использовать метод регулирования напряжения изменением числа проводящих полупериодов в единицу времени.

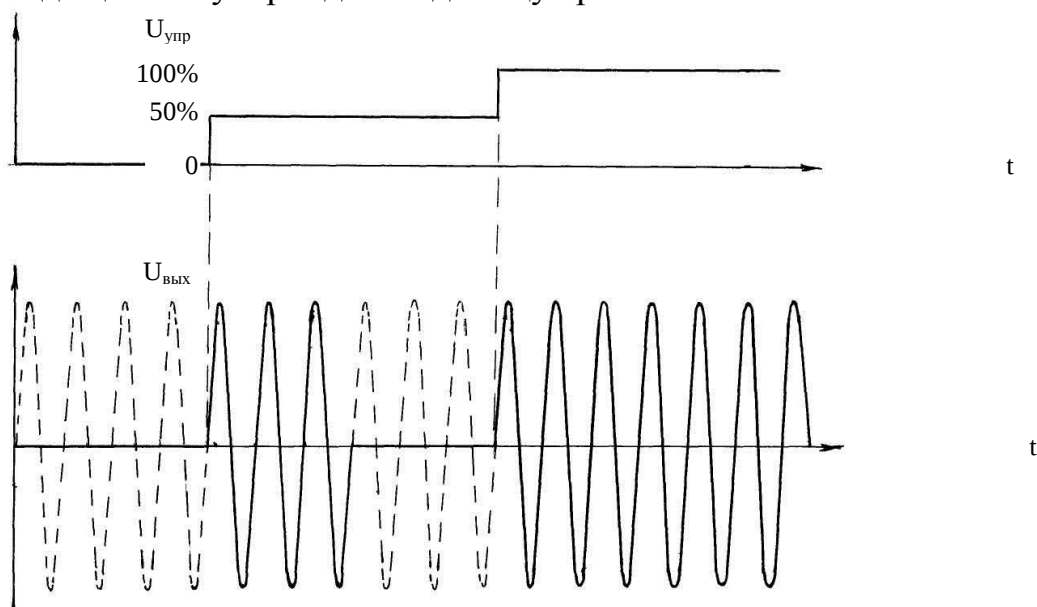


Рис. 2.

В лабораторной работе необходимо снять две характеристики:

- регулировочную, представляющую собой зависимость выходного напряжения регулятора от управляющего напряжения при постоянной нагрузке;
- нагрузочную, представляющую собой зависимость напряжения на нагрузке от тока нагрузки при постоянном управляющем сигнале.

## 9.2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из блока управления тиристорами (БУСТ), тиристоров, включенных встречно-параллельно в цепь нагрузки каждой фазы, нагрузочного устройства, состоящего из ламп накаливания и задающего потенциометра. Схема лабораторной установки представлена на рис. 3.

Напряжение управления  $U_y$  устанавливается с помощью потенциометра 10кОм, подключенного к клеммам 13, 14 и 16 клеммника X1. Трехфазное напряжение 380/220В через автоматический выключатель АВ подается на клеммы 1, 3, 5 клеммника X1, 10, 6, 2 клеммника X2 и на тиристоры. Нагрузкой фазы А является группа ламп накаливания. В цепи фаз В и С в данной лабораторной работе нагрузка отсутствует. Отсутствуют также трансформаторы тока ТТА, ТТВ и ТТС, которые включают при использовании ограничения токовой нагрузки, величина ограничения тока устанавливается резистором 100кОм. Режим работы БУСТ устанавливают с помощью перемычек S1...S6.

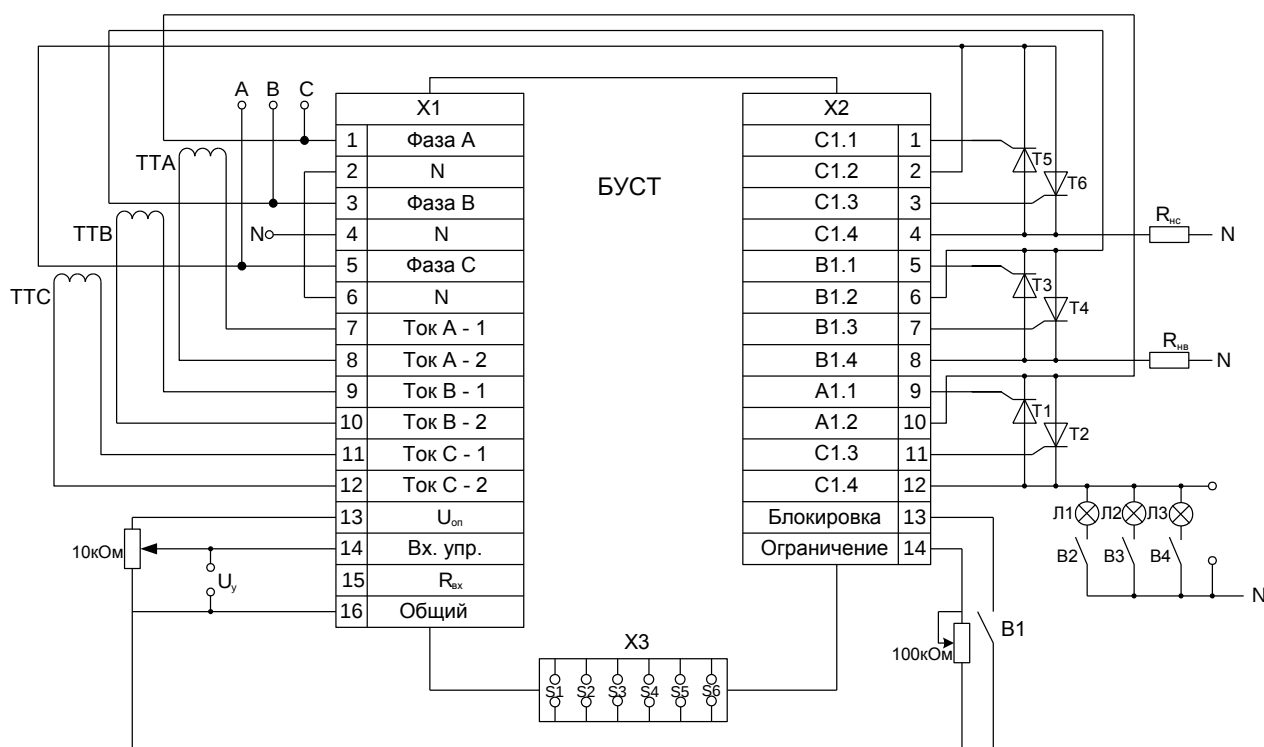


Рис. 3. Схема лабораторной установки

При установленной перемычке S1 регулирование осуществляется по числу полупериодов, при снятой – фазный способ управления.

Переключку S2 устанавливают при наличии контроля тока с помощью трансформаторов тока.

Переключку S3 устанавливают при использовании блока управления в режиме «работа».

Переключки S4 и S5 устанавливают при использовании фаз В и С.

Переключку S6 устанавливают при использовании входного управляющего сигнала 4...20мА, при остальных управляющих сигналах ее необходимо снять.

Схемы подключения управляющих сигналов представлены на рис. 4.

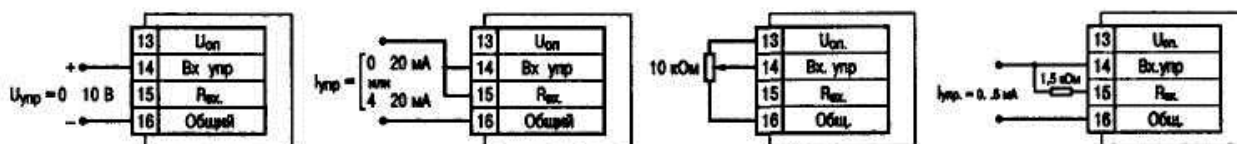


Рис. 4.

Для индикации уровня управляющего сигнала в приборе имеется десять светодиодов.

Блок управления обеспечивает плавный выход на заданный уровень мощности примерно за 5 секунд.

Уровень токовой защиты настраивается переменным резистором 100кОм, включенным между клеммами 16Х1 и 14Х2.

Выключателем В1 запрещают запуск формирователя импульсов, при его замкнутом состоянии напряжение на выходе регулятора отсутствует.

### 9.3. Порядок выполнения работы

1. На клеммы задающего потенциометра 10кОм подключить вольтметр постоянного тока, установив предел изменения 20В.
2. В цепь нагрузки (фаза А на выходе регулятора – лампы накаливания) включить амперметр переменного тока с пределом измерения 2А.
3. На клеммы нагрузки (фаза А на выходе регулятора – клемма нейтрального провода N) подключить вольтметр переменного тока с верхним пределом измерения не менее 300В.
4. Снять переключку S1. Подключить часть или всю нагрузку. После проверки подключения приборов преподавателем подать напряжение, включив автоматический выключатель по фазе А.
5. Устанавливая задающим потенциометром 5 – 6 значений напряжения на входе регулятора, снять показания вольтметра, подключенного на выход регулятора напряжения. Значения напряжений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

|                             |                      |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------------|----------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| $U_{\text{вх}}, \text{ В}$  |                      |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{\text{вых}}, \text{ В}$ | без переключки $S_1$ |  |  |  |  |  |  |  |
|                             | с переключкой $S_1$  |  |  |  |  |  |  |  |

6. Установить перемычку S1. Повторить испытания п.5.
7. При снятой перемычке S1 и при отсутствии нагрузки задающим потенциометром установить напряжение на выходе в пределах 100...200В. Не изменяя задающего напряжения, включением ламп установить несколько значений нагрузки вплоть до максимальной. При каждом значении нагрузки показания амперметра и вольтметра, подключенного к лампам, занести в таблицу 2.

Таблица 2.

|                   |                     |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------|---------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| $I_H, A$          |                     |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{\text{вых}},$ | без перемычки $S_1$ |  |  |  |  |  |  |  |
| в                 | с перемычкой $S_1$  |  |  |  |  |  |  |  |

8. Испытания, описанные в п.7, повторить при установленной перемычке S1.
9. Снять напряжение, отключив автоматический выключатель. После проверки преподавателем результатов измерения отключить измерительные приборы.

#### 9.4. Содержание отчета

1. Описание назначения блока управления тиристорами и симисторами, способов регулирования напряжения и схемы подключения к БУСТ внешних устройств.
2. Описание порядка проведения испытаний БУСТ, таблицы опытных данных.
3. Графики регулировочных  $U_{\text{вых}} = f(U_y)$  и нагрузочных  $U_{\text{вых}} = f(I_H)$  характеристик при двух способах управления напряжением.

#### 9.5. Контрольные вопросы

1. Чем объясняются малые потери мощности при регулировании напряжения с помощью тириستоров и симисторов?
2. Опишите два способа регулирования напряжения с помощью тиристоров.
3. Каковы достоинства и недостатки фазового способа регулирования напряжения?
4. Каковы достоинства и недостатки регулирования напряжения числом открываемых периодов?
5. Что понимают под регулировочной характеристикой регулятора напряжения?
6. Что понимают под нагрузочной характеристикой регулятора напряжения?

7. Как изменить способ регулирования напряжения на БУСТ?
8. Какие изменения в схеме БУСТ необходимо выполнить при подключении трехфазной нагрузки?
9. Какие входные устройства и сигналы можно использовать для регулирования напряжения с помощью БУСТ?

Литература

Блок управления тиристорами и симисторами. Руководство по эксплуатации. Фирма ОВЕН

## Лабораторная работа № 10

### Операционный усилитель

Цель работы: изучить основные свойства операционного усилителя, познакомиться с некоторыми функциями, выполняемыми с помощью операционных усилителей и соответствующими схемами их включения.

#### 10.1 Основные теоретические положения

Операционный усилитель (ОУ) – это дифференциальный усилитель постоянного тока с коэффициентом усиления по напряжению  $K_U = 10^4 \dots 10^6$ . Отличительной особенностью операционных усилителей является их очень высокое входное сопротивление, в связи с чем входной ток усилителей в расчётах обычно принимают равным нулю. Выходное сопротивление операционных усилителей мало, поэтому напряжение на их выходе практически не зависит от нагрузки. В качестве источников питания ОУ используют источники постоянного напряжения обычно со средней точкой. В настоящей лабораторной работе ОУ подключается к источнику питания  $\pm 15\text{В}$ . Дифференциальный усилитель имеет два входа: прямой, напряжение на котором будем обозначать  $U^+$ , и инверсный, напряжение на котором будем обозначать  $U^-$ . Напряжение на выходе ОУ определяется напряжениями на его входах:

$$U_{\text{вых}} = K_U (U^+ - U^-).$$

Ввиду того, что коэффициент усиления имеет очень большую величину, при разности напряжений на входах, составляющей даже десятые и сотые доли вольта ОУ находится в режиме насыщения, т.е. на его выходе устанавливается максимально возможное напряжение, близкое к напряжению источника питания. Если же усилитель не находится в состоянии насыщения, то разность  $U^+ - U^- = U_{\text{вых}} / K_U$  близка к нулю, и в этом случае в расчётах обычно принимают  $U^+ = U^-$ .

ОУ используют для выполнения целого ряда функций: как компаратор, как усилитель, имеющий строго постоянный коэффициент усиления, не зависящий

от нагрузки, как алгебраический сумматор с одинаковыми или разными весовыми коэффициентами, как интегратор и т.д..

В качестве компаратора ОУ работает при отсутствии обратных связей. В этом случае происходит сравнение напряжений на его входах, и выходное напряжение принимает знак «+», если  $U^+ > U^-$ , и знак «-», если  $U^+ < U^-$ . Такое сравнение напряжений используют в схемах стабилизаторов напряжения и тока, в усилителях переменного тока для существенного снижения нелинейных искажений и в ряде других случаев. Схема компаратора представлена на рис.9.1.

Чтобы ОУ работал как усилитель с заданным постоянным коэффициентом усиления, необходимо использовать отрицательную обратную связь по напряжению, т.е. часть напряжения с выхода усилителя подать на его инверсный вход. При этом в зависимости от способа подключения входного усиливаемого сигнала усилитель может быть неинвертирующим или инвертирующим.

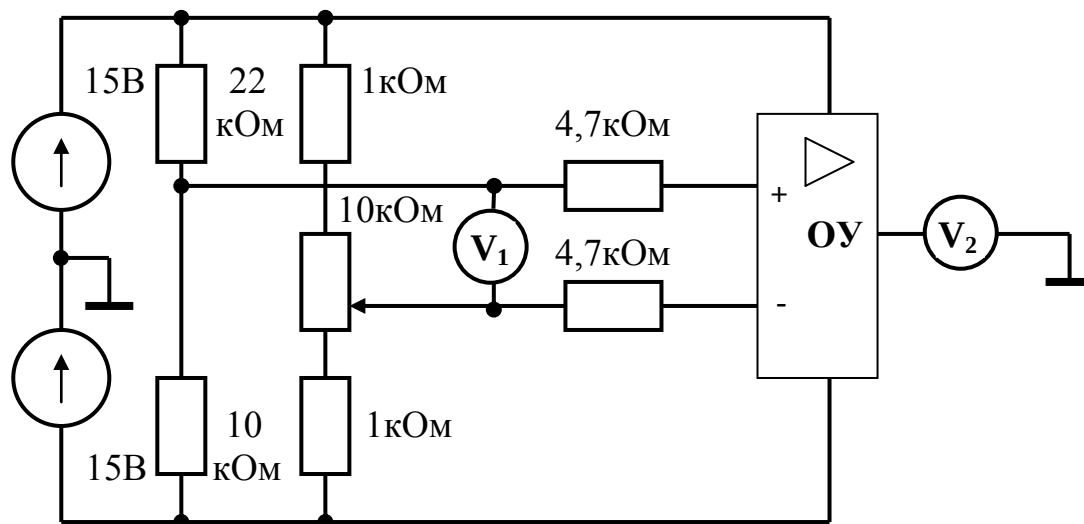


Рис.9.1.

Схема неинвертирующего усилителя представлена на рис. 9.2.

Для данной схемы  $U^- = U_{\text{вых}} R_{\text{вх}} / (R_{\text{вх}} + R_{\text{ос}})$ , но т.к.  $U^+ = U^-$  и токи на входах ОУ пренебрежимо малы, а поэтому и падение напряжения на сопротивлении, подключённом на вход «+» пренебрежимо мало, то  $U_{\text{вх}} = U^+ = U^-$  и

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} (1 + R_{\text{ос}} / R_{\text{вх}}) \quad (9.1).$$

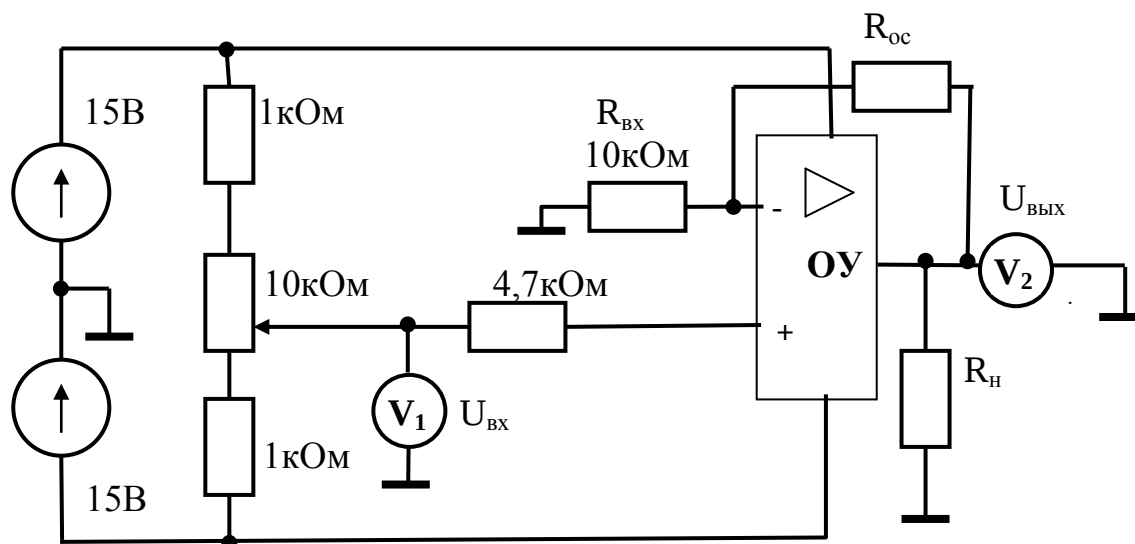


Рис.9.2.

Схема инвертирующего усилителя представлена на рис. 9.3. Этот усилитель преобразует входное напряжение в напряжение противоположной полярности на выходе ОУ. Если на вход усилителя подать синусоидальный сигнал, то напряжение на выходе по отношению к входному будет сдвинуто по фазе на  $180^\circ$ . В данной схеме на неинверсный вход ОУ подан нулевой потенциал. Сигнал усиливаемого напряжения через сопротивление  $R_{ВХ}$  подаётся на инверсный вход, на этот же вход через сопротивление  $R_{ОС}$  подаётся напряжение с выхода ОУ, таким образом, на этом входе суммируются токи.

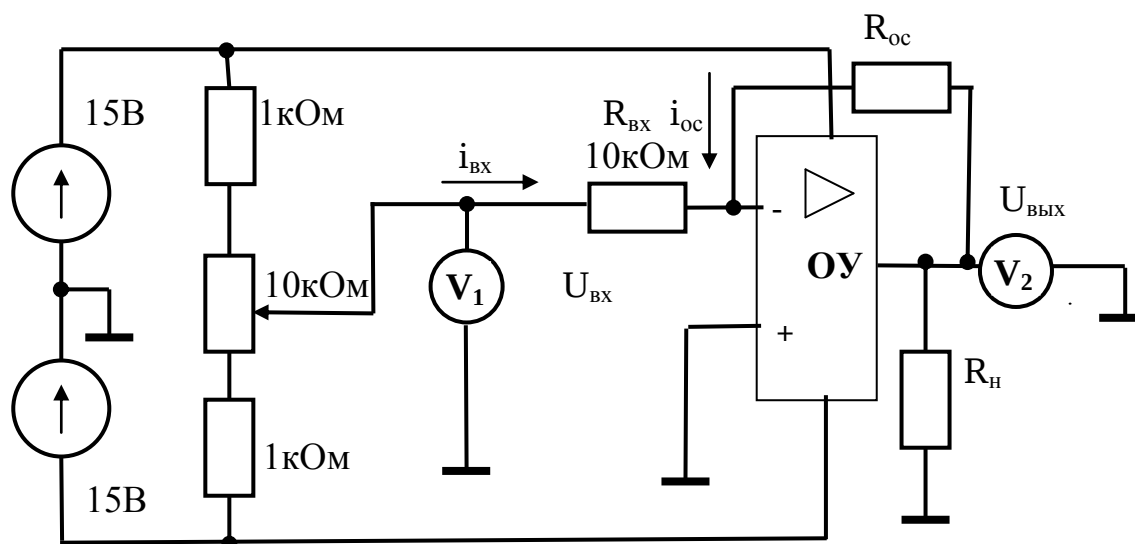


Рис.9.3.

Как было отмечено выше, входной ток ОУ пренебрежимо мал, поэтому

$$i_{ВХ} + i_{ОС} = 0,$$

но  $i_{ВХ} = U_{ВХ} / R_{ВХ}$  и  $i_{ОС} = U_{ВЫХ} / R_{ОС}$ , поэтому  $U_{ВЫХ} / R_{ОС} = - U_{ВХ} / R_{ВХ}$ , откуда

$$U_{ВЫХ} = - (R_{ОС} / R_{ВХ}) U_{ВХ} \quad (9.2).$$

Как следует из (9.1) и (9.2), коэффициент усиления как неинвертирующего, так и инвертирующего усилителя не зависит от коэффициента усиления ОУ (который при изменении температуры и величины питающего напряжения меняется в широких пределах, оставаясь очень высоким), а определяется сопротивлениями резисторов, включённых во входной цепи и в цепи обратной связи. Резисторы же обладают достаточно стабильными параметрами, поэтому коэффициенты усиления рассмотренных усилителей также достаточно стабильны. Следует также заметить, что выражения (9.1) и (9.2) справедливы, пока  $U_{\text{ВЫХ}}$  меньше напряжения насыщения.

Если в схеме, изображённой на рис. 9.3 на инверсный вход ОУ подать через сопротивления не одно, а несколько напряжений, причём, любой полярности, то будет выполнена операция алгебраического суммирования этих напряжений с умножением на коэффициенты, равные отношению сопротивления обратной связи к входным сопротивлениям. В этом случае

$$i_{\text{ВХ1}} + i_{\text{ВХ2}} + \dots + i_{\text{ВХп}} + i_{\text{ОС}} = 0, \text{ или}$$

$$U_{\text{ВХ1}}/R_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}}/R_{\text{ВХ2}} + \dots + U_{\text{ВХп}}/R_{\text{ВХп}} + U_{\text{ВЫХ}}/R_{\text{ОС}} = 0, \text{ откуда}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -[(R_{\text{ОС}}/R_{\text{ВХ1}}) U_{\text{ВХ1}} + (R_{\text{ОС}}/R_{\text{ВХ2}}) U_{\text{ВХ2}} + \dots + (R_{\text{ОС}}/R_{\text{ВХп}}) U_{\text{ВХп}}] \quad (9.3)$$

Схема алгебраического суммирования двух напряжений с инверсией изображена на рис. 9.4. В этой схеме суммирование осуществляется с одинаковыми весовыми коэффициентами; одно из суммируемых напряжений подаётся от регулируемого источника 0...15 В, его полярность остаётся постоянной, второе – с делителя напряжения, его можно изменять как по величине, так и по знаку.

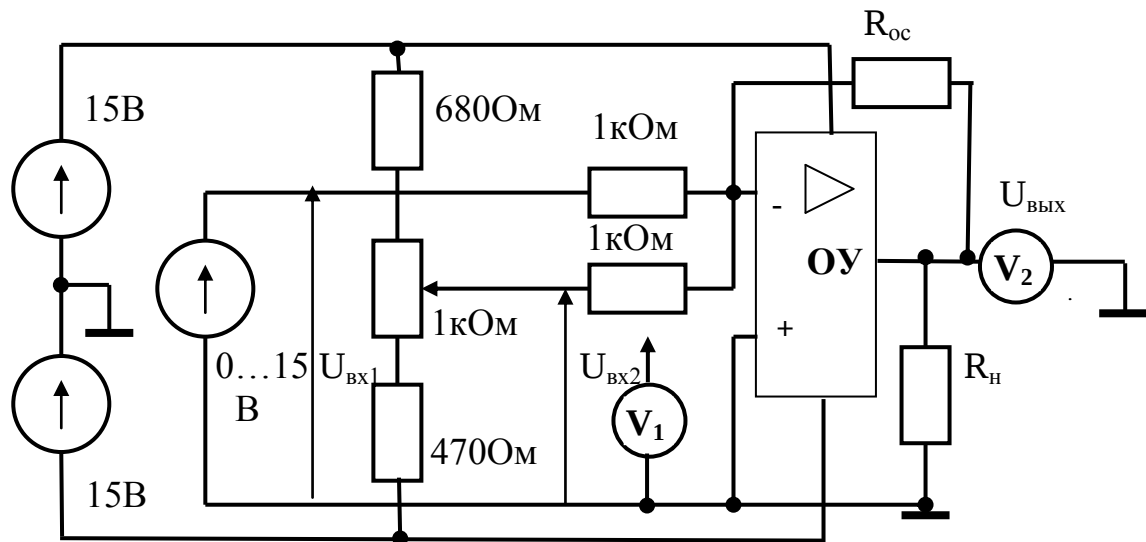


Рис.9.4.

Чтобы ОУ выполнял операцию интегрирования, в цепь отрицательной обратной связи необходимо включить конденсатор, а входное напряжение подать через сопротивление на инверсный вход; второй вход, как и в предыдущей схеме, необходимо подключить к средней точке источника питания. Схема интегрирующего усилителя представлена на рис. 9.5.

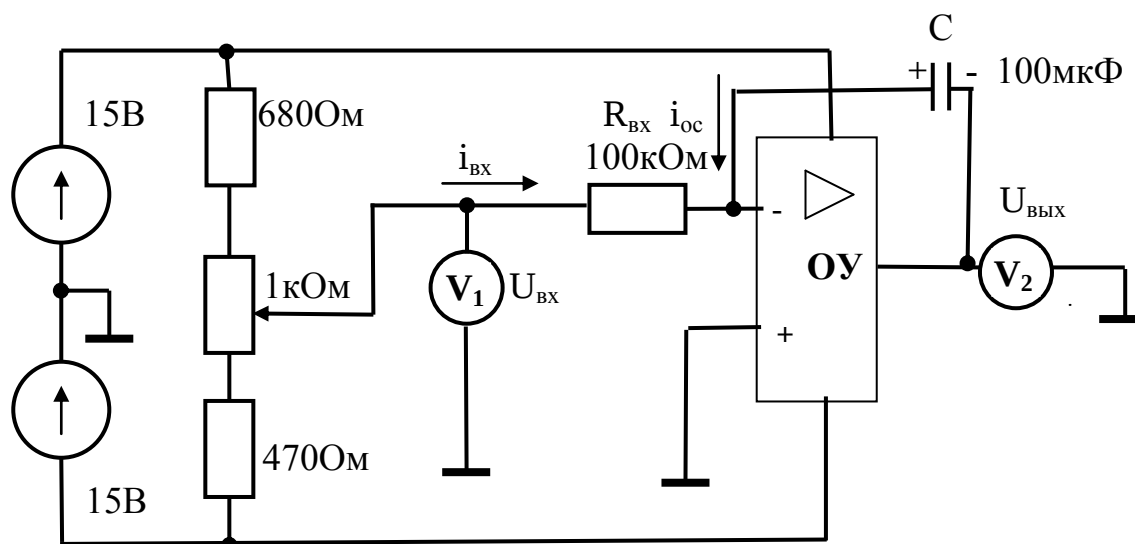


Рис.9.5.

Усилитель, собранный по схеме рис. 9.5, может выполнять и другие математические операции, вид которых определяется комплексными сопротивлениями входной цепи  $Z_{\text{ВХ}}(p)$  и цепи обратной связи  $Z_{\text{ОС}}(p)$ . В общем случае входное и выходное напряжения в данной схеме связаны зависимостью:

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = -[Z_{\text{ОС}}(p)/Z_{\text{ВХ}}(p)] U_{\text{ВХ}}(p) \quad (9.4).$$

В частном случае, при интегрировании,  $Z_{\text{ВХ}}(p) = R_{\text{ВХ}}$ ,  $Z_{\text{ОС}}(p) = 1/(Cp)$ ,

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = -U_{\text{ВХ}}(p)/(C R_{\text{ВХ}} p),$$

или, если перейти от операторной формы записи к классической,

$$U_{\text{ВЫХ}} = -1/(C R_{\text{ВХ}}) \int U_{\text{ВХ}} dt \quad (9.5).$$

Из последнего выражения следует, что скорость интегрирования определяется произведением  $CR_{\text{ВХ}}$ , которое называют постоянной времени интегрирования и обозначают обычно буквой  $\tau$ . Если в данном произведении ёмкость выразить в фарадах, а сопротивление в Омах, то постоянная времени получится в секундах.

## 10.2. Содержание практической части и порядок выполнения работы

При выполнении лабораторной работы необходимо опробовать работу операционного усилителя в следующих режимах: компаратора, неинвертирующего или инвертирующего усилителя, сумматора и интегратора; проверить зависимость коэффициента усиления усилителя от нагрузки, снять амплитудную характеристику усилителя.

Порядок выполнения работы следующий.

1. Изучить основные теоретические положения.
2. Собрать схему компаратора (рис. 9.1). Подать напряжение питания, изменением положения рукоятки потенциометра установить нулевое напряжение между входами ОУ. Подавая незначительное напряжение между

входами ОУ перемещением рукоятки потенциометра, убедиться, что при изменении его знака напряжение на выходе усилителя тоже меняет знак, принимая при этом максимально возможные значения, близкие к напряжению питания.

3. Собрать по указанию преподавателя схему инвертирующего или неинвертирующего усилителя (рис. 9.2 или рис. 9.3). Снять амплитудные характеристики усилителя при двух значениях сопротивления в цепи обратной связи. Значения сопротивлений и напряжений на входе усилителя указаны в таблице 9.1, в эту же таблицу внести значения выходного напряжения.

Таблица 9.1.

|                        |              |      |    |      |      |      |   |     |     |     |   |     |
|------------------------|--------------|------|----|------|------|------|---|-----|-----|-----|---|-----|
| $R_{oc}$<br>22<br>кОм  | $U_{вх}, В$  | -5   | -4 | -3   | -2   | -1   | 0 | 1   | 2   | 3   | 4 | 5   |
|                        | $U_{вых}, В$ |      |    |      |      |      |   |     |     |     |   |     |
| $R_{oc}$<br>100<br>кОм | $U_{вх}, В$  | -1,2 | -1 | -0,8 | -0,6 | -0,4 | 0 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,2 |
|                        | $U_{вых}, В$ |      |    |      |      |      |   |     |     |     |   |     |

Вычислить коэффициенты усиления и сравнить их с теоретическими значениями, вычисленными в соответствии с формулами (9.1) или (9.2). Включить и выключить на выходе усилителя нагрузку 3.3 или 4.7 кОм, убедиться, что при этом напряжение на выходе усилителя не меняется.

4. Собрать схему алгебраического суммирования двух напряжений (рис.9.4). Устанавливая напряжения на входах, указанные в таблице 9.2, записать в таблицу напряжения на выходе усилителя.

Таблица 9.2.

|              |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |
|--------------|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|
| $U_{вх1}, В$ | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $U_{вх2}, В$ | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $U_{вых}, В$ |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |

5. Собрать схему рис. 9.5. Вычислить постоянную времени интегрирования. Подать напряжение питания, установить на входе усилителя напряжение +1В, убедиться в том, что выходное напряжение изменяется со скоростью, соответствующей вычисленному значению постоянной времени. Поворотом рукоятки потенциометра изменить полярность входного напряжения, убедиться в том, что выходное напряжение после этого уменьшается с постоянной скоростью. Сняв напряжение, заменить конденсатор ёмкостью 100 мкФ на конденсатор 10 мкФ, подав напряжение, убедиться, что напряжение на выходе стало меняться в 10 раз быстрее. При испытаниях интегратора следить за тем, чтобы напряжение на выходе усилителя было всё время отрицательным, это необходимо потому, что в схеме используются электролитические конденсаторы.
6. Закончив эксперименты, построить амплитудные характеристики усилителя.

### 10.3 Содержание отчёта

1. Основные теоретические положения.
2. Схемы компаратора, инвертирующего и неинвертирующего усилителей, сумматора, интегратора.
3. Таблицы опытных данных.
4. Амплитудные характеристики усилителя при двух значениях сопротивления в цепи обратной связи.
5. Вычисленные и экспериментальные значения коэффициентов усиления усилителя.

### 10.4 Контрольные вопросы

1. Опишите основные свойства операционных усилителей.
2. Опишите работу компаратора.
3. Поясните работу инвертирующего и неинвертирующего усилителей.
4. Чем определяются коэффициенты усиления усилителей, собранных на базе операционного усилителя?
5. Как с помощью ОУ осуществляют суммирование напряжений?
6. Как построить схему интегратора на базе ОУ? Чем определяется скорость интегрирования?
7. Чем в общем случае определяется динамический режим ОУ с отрицательной обратной связью?
8. Как напряжение на выходе ОУ зависит от нагрузки?

## Лабораторная работа №11

### Генератор прямоугольных импульсов

Цель работы: изучить принципиальную схему, назначение отдельных её элементов и работу генератора прямоугольных импульсов на базе операционного усилителя.

#### 11.1 Основные теоретические положения

Генераторы прямоугольных импульсов широко используются в различных устройствах электронной техники: в электронно-вычислительных машинах, системах связи, системах автоматизации производственных процессов, в бытовой технике и т.д. Существует ряд схем генераторов, которые собирают, используя в качестве базовых элементов либо логические элементы, либо триггеры, либо операционные усилители, либо отдельные транзисторы. Промышленность выпускает генераторы в виде микросхем, они также входят как составные элементы в целый ряд больших интегральных схем.

В настоящей лабораторной работе рассматривается схема автогенератора прямоугольных импульсов, построенная на базе операционного усилителя. Достоинствами такого генератора являются: крутой фронт импульсов, простота регулирования частоты и скважности, отсутствие обратных выбросов. Принципиальная электрическая схема генератора представлена на рис.10.1.

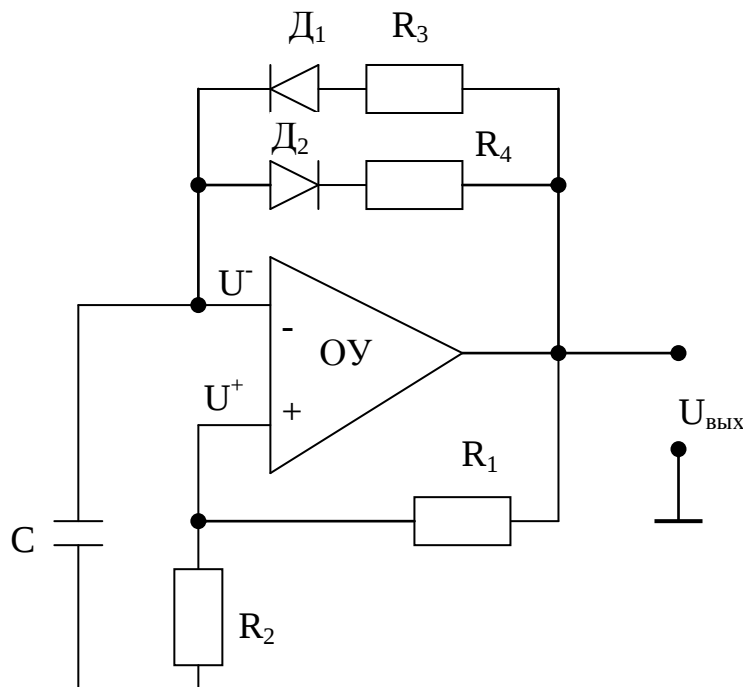


Рис. 10.1.

Операционный усилитель имеет безынерционную положительную обратную связь, которая обеспечивается делителем  $R_1R_2$  и инерционную отрицательную, выполненную резисторами  $R_3$  и  $R_4$  и конденсатором  $C$ .

Рассмотрим режим автоколебаний этого генератора, приняв  $R_3 = R_4$ .

Пусть в момент времени  $t = 0$  (рис. 10.2) включается источник питания ОУ и выходное напряжение начинает возрастать, тогда через делитель  $R_1R_2$  увеличивается напряжение  $U^+$ , напряжение  $U^-$  вследствие наличия конденсатора в цепи обратной связи растет постепенно. Вследствие увеличения  $U^+$  нарастание напряжения  $U$  протекает лавинообразно, оно скачкообразно возрастает до напряжения насыщения  $E$ , а входное  $U^+$  до

$$U_R = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \gamma E.$$

Напряжение  $U^-$  в процессе заряда конденсатора растет по экспоненте, стремясь к значению  $E$ , но как только оно незначительно превысит  $U_R$ , напряжение на выходе ОУ скачкообразно изменится до значения  $-E$ , после чего конденсатор начнет перезаряжаться, то есть напряжение  $U^-$  станет уменьшаться по экспоненте, стремясь к значению  $-E$ , а напряжение  $U^+$  в процессе перезаряда конденсатора будет оставаться постоянным, равным  $-\gamma E$ . Как только  $U^-$  станет

по абсолютному значению больше  $U^+$ , напряжение на выходе ОУ скачком изменится до  $+E$ . Далее процесс будет периодически повторяться.

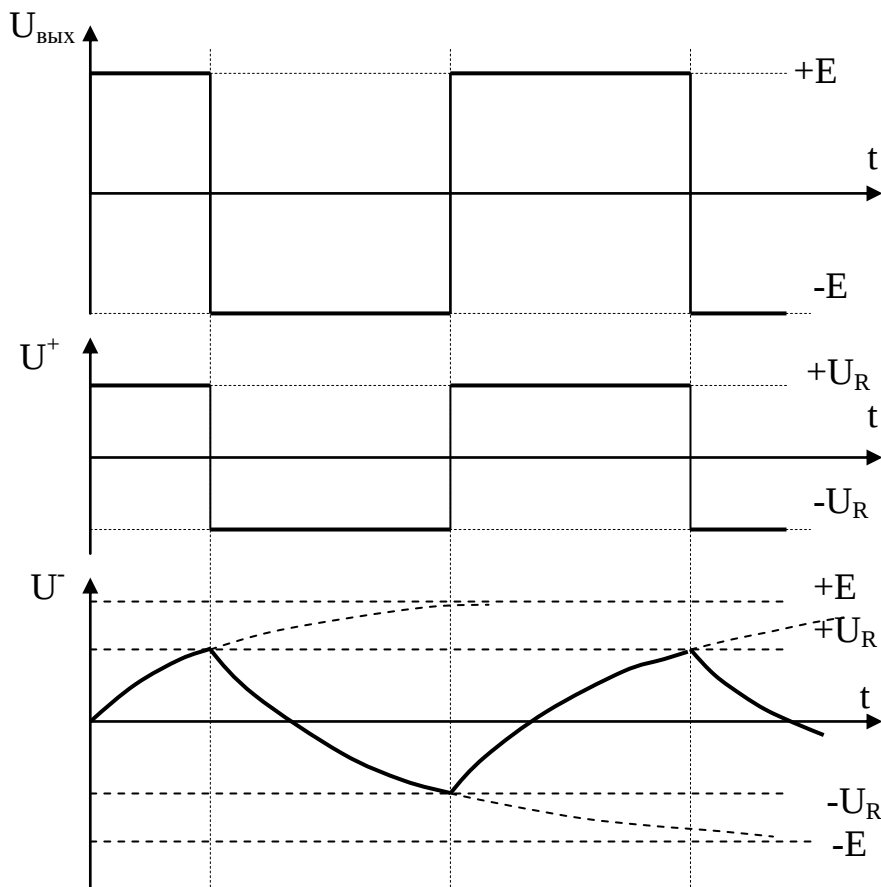


Рис. 10.2.

Первый импульс будет иметь меньшую длительность, поскольку он формируется при заряде конденсатора от 0 до  $U_R$ .

$$U^-(t) = E(1 - e^{-t/\tau}),$$

где  $\tau = R_3C$ , в момент переключения  $U^-(t) = U_R = \gamma E$ , то есть при  $t = t_1$ .

$$\gamma E = E(1 - e^{-t_{н1}/\tau}), \text{ откуда длительность первого импульса}$$

$$t_{н1} = \tau \ln \frac{1}{1 - \gamma}.$$

При генерации последующих импульсов конденсатор перезаряжается от напряжения  $U_R = \gamma E$  одной полярности, стремясь зарядиться до напряжения  $E$  противоположной полярности, то есть процесс перезарядки протекает по закону:

$$U^-(t) = (E + \gamma E)(1 - e^{-t/\tau}) - \gamma E,$$

процесс перезарядки прекращается при  $U(t) = \gamma E$ , откуда длительность последующих импульсов будет

$$t_{\text{и}} = \tau \ln \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma},$$

период следования импульсов  $T = 2t_{\text{и}}$ . Скважность сигнала  $\frac{T}{t_{\text{и}}} = 2$ .

Для получения скважности  $q$ , отличной от 2, необходимо принять соответствующие различные значения  $R_3$  и  $R_4$ :

$$R_4 = R_3 (q - 1).$$

## 11.2 Порядок выполнения работы

1. Собрать схему генератора, изображенную на рис. 10.1, приняв следующие значения параметров элементов:

$$R_1 = 4,7 \text{ кОм}, R_2 = 1 \text{ кОм}, R_3 = R_4 = 1 \text{ Мом}, C = 0,01 \text{ мкФ}.$$

(Преподавателем могут быть заданы другие значения параметров).

Для питания операционного усилителя использовать два источника постоянного тока 15В, включив их так, как показано на рис. 10.3.

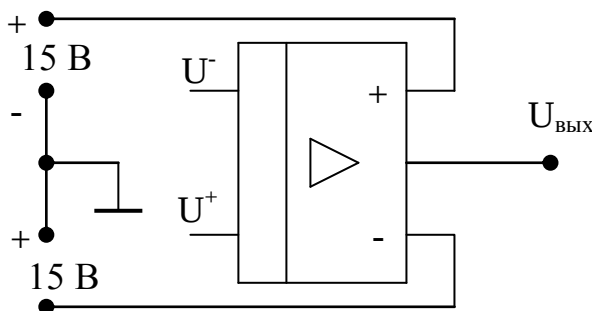


Рис. 10.3.

Выходное напряжение генератора подать на вход осциллографа.

2. После проверки собранной схемы преподавателем подать напряжение на осциллограф и на источники питания. Наблюдая на экране осциллографа форму выходного напряжения генератора, убедиться, что она имеет прямоугольную форму, причём, длительность положительного импульса равна длительности отрицательного.

3. В цепи отрицательной обратной связи резистор  $R_3$  сопротивлением 1 Мом заменить резистором 100 кОм. Убедиться, что длительность положительного импульса стала в 10 раз короче длительности отрицательного.

4. В цепи положительной обратной связи параллельно резистору  $R_2$  сопротивлением 1 кОм включить второй такой же резистор. При этом коэффициент делителя напряжения уменьшится и станет равным

$$\gamma_1 = 0,5 / (4,7 + 0,5) = 0,0961,$$

до включения второго резистора его значение было

$$\gamma = 1 / (4,7 + 1) = 0,175.$$

Частота периодического сигнала изменилась в  $n$  раз, где

$$n = [\ln(1 + \gamma) / (1 - \gamma)] / [\ln(1 + \gamma_1) / (1 - \gamma_1)] = 1.834.$$

Наблюдая сигнал выходного напряжения на экране осциллографа, убедиться в увеличении его частоты.

5. С помощью осциллографа пронаблюдать форму напряжения  $U$ .

### 11.3 Содержание отчёта

1. Принципиальная схема генератора.
2. Описание работы генератора.
3. Вычисление длительности импульсов и частоты сигнала при заданных значениях параметров элементов схемы.
4. Графики изменения напряжений на входе и выходе операционного усилителя.

### 11.4 Контрольные вопросы

1. Какое электронное устройство называют автогенератором?
2. Опишите работу автогенератора прямоугольных импульсов на базе операционного усилителя.
3. Какими способами можно изменить частоту сигнала рассматриваемого в данной работе генератора?
4. Как изменить скважность сигнала генератора?
5. Объясните роль положительной обратной связи в формировании фронта сигналов генератора.
6. Как изменится частота сигнала генератора при увеличении сопротивления  $R_1$  делителя напряжения?

## Лабораторная работа №12

### Исследование переходных процессов в цепи с ёмкостью

Цель работы: закрепление методики расчёта переходных процессов классическим методом в цепях, содержащих ёмкость, практическая проверка результатов расчёта.

#### 12.1 Основные теоретические положения

Электрическая цепь с одним конденсатором и сопротивлениями описывается дифференциальным уравнением первого порядка, поэтому свободные состав-

ляющие токов в ветвях и напряжений имеют одно слагаемое вида  $Ae^{pt}$ , где  $p$  – корень характеристического уравнения,  $A$  – постоянная интегрирования.

Характеристическое уравнение может быть представлено в виде:

$$Z(p)=0,$$

где  $Z(p)$  – входное операторное сопротивление цепи.

Постоянные интегрирования  $A$  определяются для каждого тока и напряжения из начальных условий. Значение  $A$  равно начальному значению функции в первый момент времени после коммутации. Начальное значение напряжения на конденсаторе определяется в соответствии с законом коммутации  $u_c(0_-)=u_c(0_+)$ . В свою очередь,  $u_c(0_-)$  определяется из расчёта цепи до коммутации. Начальные значения других величин, называемые зависимыми начальными условиями, (значения токов и напряжений, которые могут изменяться скачком) рассчитываются по законам Кирхгофа и Ома в момент коммутации  $t=0_+$ .

В электрической цепи с одним конденсатором в результате коммутации свободные составляющие всех токов и напряжений изменяются по экспоненциальному закону с одной постоянной времени  $\tau=1/|p|$ .

В данной работе коммутация (замыкание и размыкание цепи) осуществляется транзистором, работающим в ключевом режиме. Отпирающие импульсы тока на базу транзистора подаются от источника синусоидального напряжения с частотой 50 Гц. Таким образом, процесс замыкания и размыкания цепи периодически повторяется и его можно наблюдать на осциллографе. Длительность каждого включения и отключения составляет 0,01с.

## 12.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с электрической схемой (рис.11.1) и выполнить расчёт докоммутационных и послекоммутационных начальных условий, а также вынужденных (установившихся) значений токов и напряжений при замыкании и размыкании электрической цепи. Составить характеристическое уравнение для замкнутой и разомкнутой (в ветви с сопротивлением  $R_2$ ) цепи и найти постоянные времени. Результаты расчётов занести в таблицу 11.1.

2. Собрать схему (рис.11.1), обратив внимание на полярность электролитического конденсатора. Подать напряжение 15 В. Из схемы убрать транзистор, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при замыкании ключа, а также  $t = \infty$  при размыкании ключа; значения напряжения  $u_c$  и токов занести в таблицу.

3. Вместо цепи транзистора коллектор-эмиттер установить перемычку, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при размыкании ключа и  $t = \infty$  при замыкании ключа; значения величин измерить и занести в таблицу.

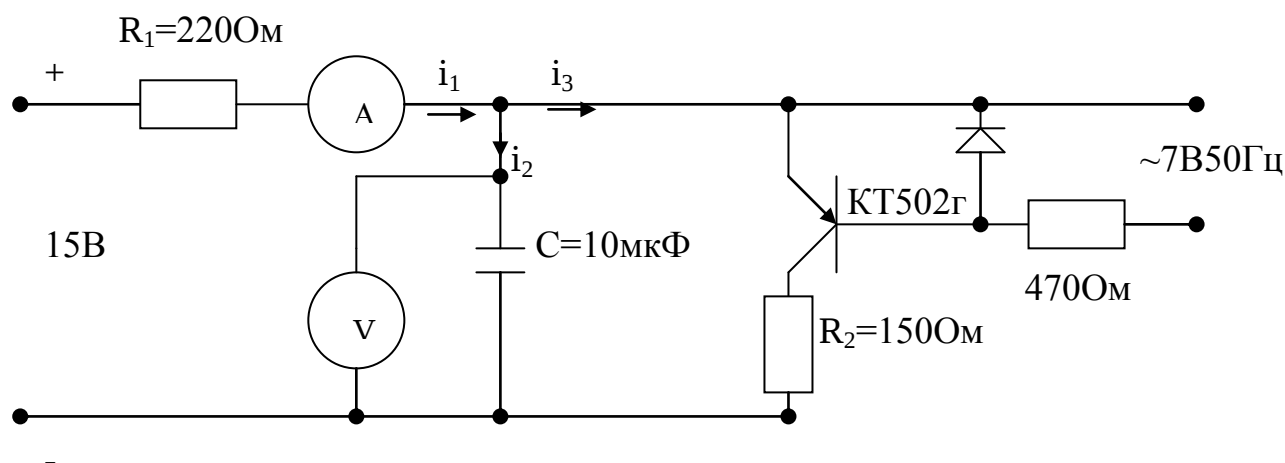


Рис.11.1.

Таблица 11.1. Ключ замыкается.

| t                      | $u_c$ , В | $i_1$ , мА | $i_2$ , мА | $i_3$ , мА | $\tau$ , мс |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| $0_-$ , расчёт         |           |            |            |            |             |
| $0_-$ , эксперимент    |           |            |            |            |             |
| $0_+$ , расчёт         |           |            |            |            |             |
| $\infty$ , расчёт      |           |            |            |            |             |
| $\infty$ , эксперимент |           |            |            |            |             |
| Свободные составляющие |           |            |            |            |             |

Таблица 11.1. Ключ размыкается.

| t                      | $u_c$ , В | $i_1$ , мА | $i_2$ , мА | $i_3$ , мА | $\tau$ , мс |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| $0_-$ , расчёт         |           |            |            |            |             |
| $0_-$ , эксперимент    |           |            |            |            |             |
| $0_+$ , расчёт         |           |            |            |            |             |
| $\infty$ , расчёт      |           |            |            |            |             |
| $\infty$ , эксперимент |           |            |            |            |             |
| Свободные составляющие |           |            |            |            |             |

4. Рассчитать свободные составляющие токов и напряжения на конденсаторе при замыкании и при размыкании цепи как разность между полными значениями переменных при  $t = 0_+$  и при  $t = \infty$ . Вычисленные значения переменных занести в таблицу.

5. Составить характеристические уравнения и найти постоянные времени  $\tau$  при замкнутом и разомкнутом положениях ключа.

6. Установить в цепи транзистор и подать напряжение  $\sim 7\text{В}$  в цепь базы. На экране осциллографа наблюдать кривые напряжений:

$$U_c(t), U_{R1}(t) = R_1 i_1(t), U_{R2}(t) = R_2 i_3(t).$$

Кривые зарисовать на кальку, а затем перенести их на миллиметровку, приняв

следующие масштабы времени и напряжения:

$$1\text{ мс}=1\text{ см}, \quad 1\text{ В}=1\text{ см}.$$

Учесть, что при частоте напряжения, поданного в цепь базы транзистора,  $f = 50\text{ Гц}$  цикл замыкания-размыкания равен  $20\text{ мс}$ . При определении ординат использовать экспериментально полученные значения напряжений при замкнутом и разомкнутом состояниях ключа.

7. Записать выражения для токов и напряжений, как функций времени, используя вычисленные значения постоянных времени, вынужденных и свободных составляющих величин. Построить на миллиметровой бумаге соответствующие кривые и сравнить их с экспериментальными.

### **12.3 Содержание отчёта**

1. Основные теоретические положения.
2. Принципиальная электрическая схема исследуемой цепи.
3. Таблица 11.1 расчётных и экспериментальных значений величин.
4. Функции изменения во времени напряжений и токов.
5. Экспериментальные и теоретические кривые переходных процессов.

### **12.4 Контрольные вопросы**

1. Почему на конденсаторе напряжение не может изменяться скачком?
2. Что понимают под коммутацией?
3. Чем определяется степень характеристического уравнения?
4. Как получить характеристическое уравнение цепи через её входное сопротивление?
5. Как вычисляют докоммутационные и послекоммутационные начальные условия?
6. Что такое постоянная времени переходного процесса?
7. Как изменится постоянная времени цепи с конденсатором при увеличении его ёмкости?
8. Как влияет активное сопротивление электрической цепи, содержащей ёмкость, на длительность переходного процесса?
9. Как рассчитывают зависимые начальные условия?

## Лабораторная работа №13

### Триггеры

*Цель работы:* изучение принципов построения и функциональных возможностей триггеров различных типов.

#### 12.1. Основные теоретические положения

Триггером называют простейшее последовательное устройство, которое может находиться в одном из двух возможных состояний и переходить из одного состояния в другое под действием входных сигналов. Триггеры являются базовыми элементами последовательных логических устройств.

Триггеры обычно имеют два выхода: прямой  $Q$  и инверсный  $\bar{Q}$ .

Входы триггера разделяют на информационные и управляющие. Информационные используются для управления состоянием триггера, управляющие – для предварительной установки и синхронизации.

Различают асинхронные и синхронные триггеры. Асинхронные триггеры меняют свое состояние непосредственно в момент появления на входе информационного сигнала. Синхронные триггеры реагируют на информационные сигналы при наличии сигнала синхронизации  $C$ . Синхронные триггеры, в свою очередь, подразделяют на триггеры со статическим и динамическим управлением по входу синхронизации.

Статические синхронные триггеры воспринимают информационные сигналы при подаче на вход  $C$  логической единицы (прямой вход) или логического нуля (инверсный вход).

Динамические синхронные триггеры воспринимают информационные сигналы при изменении сигнала на входе  $C$  от 0 до 1 (прямой динамический  $C$ -вход) или от 1 до 0 (инверсный динамический  $C$ -вход).

По функциональным возможностям триггеры разделяются на следующие классы:

- с отдельной установкой 0 и 1 (RS-триггеры);
- универсальные (JK-триггеры);
- с приемом информации по одному входу (D-триггеры);
- со счетным входом (Т-триггеры).

Входы триггеров обозначают следующим образом:

$S$  – вход для установки в состояние  $Q = 1$ ;

$R$  – вход для установки в состояние  $Q = 0$ ;

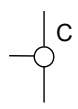
$I$  – вход для установки в состояние  $Q = 1$  в универсальном триггере;

$K$  – вход для установки в состояние  $Q = 0$  в универсальном триггере;

$D$  – вход для установки в состояние  $Q = 1$  или  $Q = 0$  в D-триггере;

$T$  – вход счетного триггера;

$\text{—} \overline{C}$  – статический прямой вход синхронизации;



- статический инверсный вход синхронизации;



- прямой динамический вход синхронизации;



- инверсный динамический вход синхронизации;

V или E – дополнительный управляющий вход для разрешения приема информации.

Схемы триггеров строят обычно на базе логических элементов, основным из которых является элемент «И-НЕ». Рассмотрим основные из этих схем.

### Асинхронный RS-триггер

Схема RS-триггера изображена на рисунке 1. В схеме использованы 4 элемента «И-НЕ» с двумя входами. Элементы «a» и «b» выполняют функцию «НЕ», так как их входы включены параллельно. При отсутствии сигналов на выходах элементов «a» и «b» будет логическая 1, и если выход элемента «c»  $Q = 1$ , то на выходе элемента «d»  $\bar{Q} = 0$ . Состояние триггера изменится, если на вход R подать логическую 1. При этом на выходе «b» появится 0, который изменит выходной сигнал элемента «d» из состояния  $\bar{Q} = 0$  в состояние  $\bar{Q} = 1$ , в результате чего выход элемента «c» изменится в состояние  $Q = 0$ .

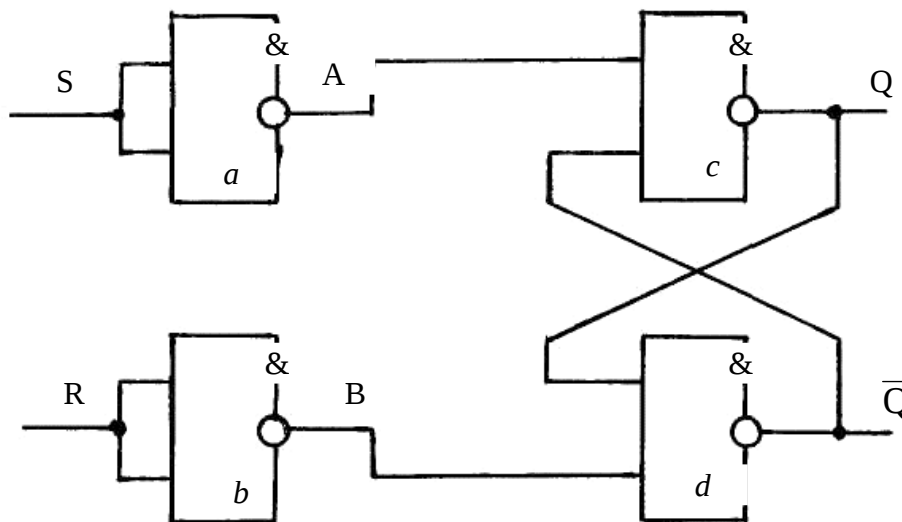


Рисунок 1. Асинхронный RS-триггер

Аналогичным образом состояние триггера вернется в первоначальное, если логическую единицу подать на вход S.

Работу данного триггера описывает характеристическое уравнение:

$$Q^{t+1} = S^t + \bar{R}^t \cdot Q^t, \quad S^t \cdot R^t = 0,$$

где  $Q^t$  – выходной сигнал до подачи входных сигналов  $S^t$  и  $R^t$  в некоторый момент времени  $t$ ,

$Q^{t+1}$  – выходной сигнал после подачи входных сигналов.

Второе уравнение отражает то обстоятельство, что одновременная подача входных сигналов «1» на входы RS-триггера запрещена, так как приводит триггер к неопределенному состоянию.

Помимо характеристического уравнения работа RS-триггера может быть описана следующей таблицей состояния.

Таблица 1. – Состояние RS-триггера

| $S^t$ | $R^t$ | $Q^t$ | $Q^{t+1}$ | Режим            |
|-------|-------|-------|-----------|------------------|
| 0     | 0     | 0     | 0         | Хранение         |
| 0     | 0     | 1     | 1         |                  |
| 1     | 0     | 0     | 1         | Установка 1      |
| 1     | 0     | 1     | 1         |                  |
| 0     | 1     | 0     | 0         | Установка 0      |
| 0     | 1     | 1     | 0         |                  |
| 1     | 1     | 0     | –         | Неопределенность |
| 1     | 1     | 1     | –         |                  |

Схема синхронного RS-триггера представлена на рисунке 2. Данный триггер реагирует на информационные сигналы, поступающие на входы S и R, при наличии сигнала на входе синхронизации C. В остальном его работа аналогична работе асинхронного RS-триггера, она описывается теми же характеристическим уравнением и таблицей состояний.

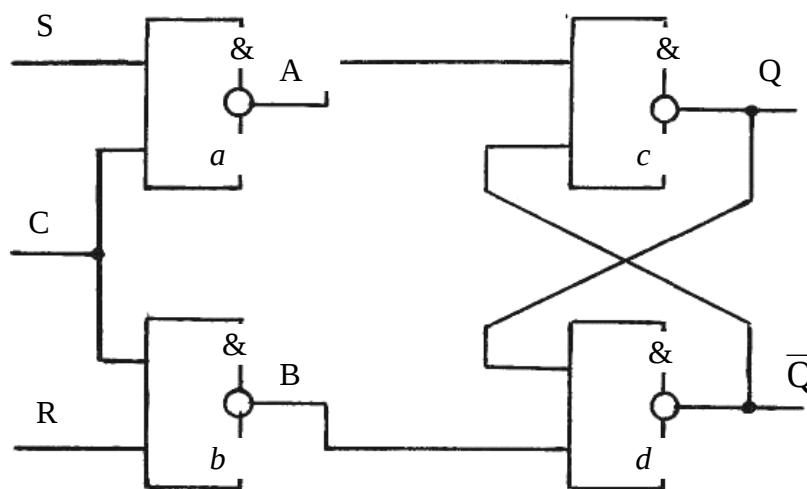


Рисунок 2. Синхронный RS-триггер

JK-триггер, схема которого представлена на рисунке 3, отличается от синхронного RS-триггера тем, что одновременная подача сигналов на его информационные входы J и K не запрещена, она приводит к изменению состояния выходов на противоположное.

Рассмотрим сначала работу JK-триггера при раздельной подаче сигналов на его входы. При отсутствии входных сигналов ( $J = 0$ ,  $K = 0$ ,  $C = 0$ ) на выходе элементов «а» и «а'»  $A = 1$ ,  $A' = 1$ . Выходные сигналы элементов «b» «b'» могут находиться в одном из двух противоположных состояний, предположим,  $B = 1$ ,  $B' = 0$ , тогда, так как в рассматриваемом случае (при  $C = 0$ )  $F = 1$ , выходные

сигналы «D» и «D'» будут  $D = 0$ ,  $D' = 1$ . Так как  $D = 0$ , то  $Q = 1$ , а  $\bar{Q} = 0$ , так как входные сигналы элемента  $e'$  оба равны 1.

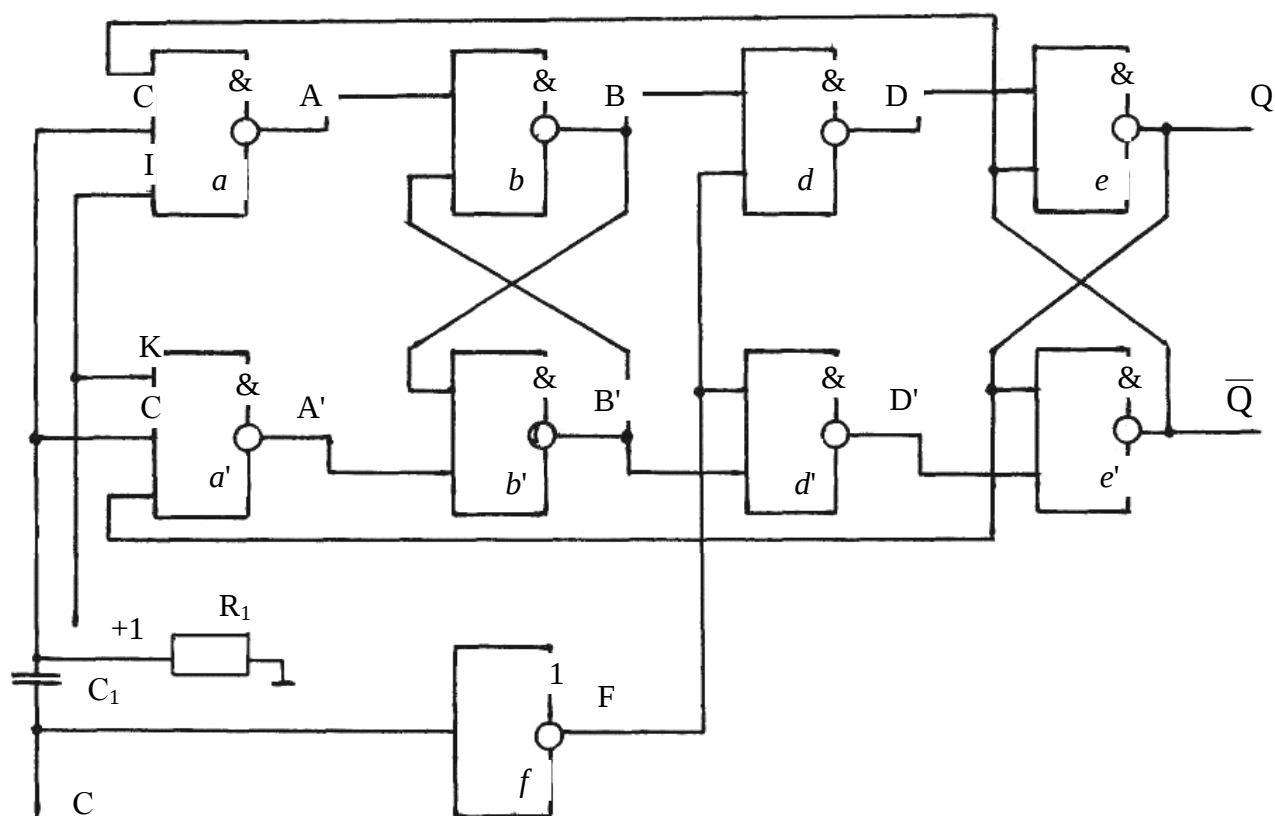


Рисунок 3. ИК-триггер

Если поступит синхронизирующий сигнал  $C = 1$  при отсутствии информационных ( $I = 0$ ,  $K = 0$ ), то изменится состояние элементов «f» и «d» ( $F = 1$ ,  $D = 1$ ), состояние выходного элемента «e» не изменится, так как на его второй вход по-прежнему будет поступать сигнал  $\bar{Q} = 0$ .

Рассмотрим теперь работу триггера, когда при поступлении  $C = 1$  сигналы на информационных входах  $I = 0$  и  $K = 1$ . Если перед подачей этих сигналов  $Q^t = 1$  и  $\bar{Q}^t = 0$ , то на все входы «a» поступят единичные сигналы, поэтому сигнал на его выходе станет равным нулю ( $A' = 0$ ), выходы «b» и «b'» изменят свое состояние ( $B = 0$ ,  $B' = 1$ ), поэтому на обратном фронте синхронизирующего сигнала, когда выход элемента «f» станет равным единице, выходной сигнал «d'» станет равным нулю ( $D' = 0$ ), а выходной сигнал «d» останется единичным. При поступлении нулевого сигнала на вход «e'» с выхода «d'» состояние триггера изменится на  $\bar{Q}^{t+1} = 1$  и  $Q^{t+1} = 0$ .

Если далее при поступлении очередного синхронизирующего сигнала  $I = 1$  и  $K = 0$ , то аналогичным образом состояние выходных сигналов изменится на  $Q^{t+1} = 1$  и  $\bar{Q}^{t+1} = 0$ .

При параллельном включении входов I и K рассматриваемого триггера он превращается в триггер со счетным входом (Т-триггер). Если сигнал на информационном входе Т-триггер равен 1, то при поступлении очередного синхронизирующего импульса состояние триггера меняется на противоположное.

Рассмотрим процесс смены состояния Т-триггера подробно.

Для работы счетного триггера на входы I и K необходимо подать постоянный единичный сигнал. Предположим, перед началом синхронизирующего импульса сигнал  $B' = 1$ , а  $B = 0$ , тогда  $D = 1$  и  $D' = 0$ , выходные сигналы  $Q = 0$  и  $\bar{Q} = 1$ .

При подаче импульса  $C = 1$  выходной сигнал элемента «НЕ» станет равным нулю. Так как на входе «С» элементов «а» и «а'» входной сигнал поступает через дифференцирующую цепочку  $R_1C_1$ , то кратковременно исчезнет единичный сигнал А (сигнал А' останется в это время единичным, так как  $Q = 0$ ), в результате чего изменится состояние элементов «b» и «b'» на  $B = 1$  и  $B' = 0$ . Пока входной сигнал остается равным единице, выходы элементов «d» и «d'» также будут оставаться единичными. При снятии управляющего импульса ( $C = 0$ ) сигнал F станет равным единице и, так как  $B = 1$ , сигнал D станет равным нулю, а  $Q = 1$ ,  $\bar{Q} = 0$ , то есть на обратном фронте входного сигнала состояние триггера меняется на противоположное. Ввиду полной симметрии схемы при очередном входном импульсе произойдет аналогичный процесс (выходные сигналы со штрихом и без штриха при описании процесса меняйте местами), и триггер вернется в первоначальное положение.

Характеристическое уравнение и таблица состояний ИК-триггера следующие.

$$Q^{t+1} = I^t \cdot \bar{Q}^t + \bar{K}^t \cdot Q^t$$

Таблица 2. – Состояние ИК-триггера

| $I^t$ | $K^t$ | $Q^t$ | $Q^{t+1}$ | Режим                 |
|-------|-------|-------|-----------|-----------------------|
| 0     | 0     | 0     | 0         | Хранение              |
| 0     | 0     | 1     | 1         |                       |
| 1     | 0     | 0     | 1         | Установка «1»         |
| 1     | 0     | 1     | 1         |                       |
| 0     | 1     | 0     | 0         | Установка «0»         |
| 0     | 1     | 1     | 0         |                       |
| 1     | 1     | 0     | 1         | $Q^{t+1} = \bar{Q}^t$ |
| 1     | 1     | 1     | 0         |                       |

Помимо описанных триггеров в установках цифровой электроники широко используется триггер с общим входом (D-триггер). Выходной сигнал D-триггера принимает значение, равное входному сигналу в момент поступления импульса синхронизации. Схема D-триггера, собранная на базе «И-НЕ», представлена на рисунке 4.

При отсутствии синхронизирующего сигнала «С» независимо от значения информационного сигнала D  $A = 1$  и  $B = 0$ . Значения выходных сигналов Q и  $\bar{Q}$  могут быть любыми. Предположим, перед поступлением  $C = 1$  на выходе  $Q = 0$ , тогда  $\bar{Q} = 1$ . Если при поступлении  $C = 1$   $D = 1$ , то сигнал А станет равным нулю, в результате чего Q из состояния «0» перейдет в состояние «1», а  $\bar{Q}$  станет равным нулю. После снятия синхронизирующего сигнала выходные сигналы не изменятся, при этом информационный сигнал триггером не воспринимается до поступления очередного сигнала синхронизации. Если при  $C = 1$   $D = 0$ , то А

станется равным «1», В станет равным нулю, в результате чего состояние выходных сигналов Q и  $\bar{Q}$  изменится на противоположное.

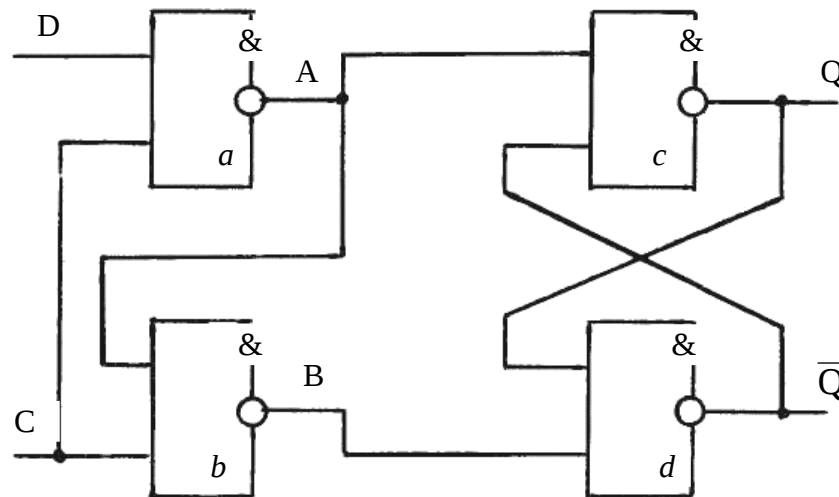


Рисунок 4. Триггер с общим информационным входом

### 13.2. Порядок выполнения работы

10. Детально изучить основные теоретические положения.
11. На лабораторном стенде собрать схемы асинхронного и синхронного RS-триггеров, схему D-триггера и схему JK-триггера с отдельными и со счетным входами.
12. Опробовать работу каждого вида триггеров и по результатам опробования составить таблицы состояний.

### 13.3. Содержание отчета

4. Схемы рассматриваемых в работе триггеров.
5. Таблицы состояний.
6. Краткое описание работы триггеров.

### 13.4. Контрольные вопросы

10. Какие электронные устройства называют триггерами?
11. Чем синхронные триггеры отличаются от асинхронных?
12. Чем отличаются динамический вход синхронизации от статического?
13. Как обозначают входы и выходы триггеров?
14. Назовите рассмотренные в работе типы триггеров и опишите функциональные возможности каждого из них.
15. Что такое характеристическое уравнение триггера?
16. Что представляет собой таблица состояний триггера?

## **Рекомендуемая литература**

1. В.И.Лачин, Н.С. Савелов. Электроника. Изд. «Феникс» 2014 г.
2. Методические указания к выполнению практических работ по информационно-измерительной технике и электронике. СКФУ. 2017.