Электронное учебное издание

Дягилев В.И.

Лабораторные работы по дисциплине
«Электротехника и электроника»
Аналоговая электроника

ЭЛЕКТРОННОЕ МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Филиал «Протвино»
государственного
университета «Дубна»

Евсиков Александр Александрович
я подтверждаю этот документ своей
удостоверяющей подписью
2024-10-16 14:13:22

Филиал «Протвино»
государственного университета «Дубна
142281 г. Протвино Московской обл.,
Северный проезд, д. 9

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Университет «Дубна»
Филиал «Протвино»
Кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств»

В.И. Дягилев

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»

АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Рекомендовано
кафедрой автоматизации технологических процессов и производств
филиала «Протвино» государственного университета «Дубна»
в качестве методического пособия для студентов,
обучающихся по направлениям
«Автоматизация технологических процессов и производств»,
«Информатика и вычислительная техника».

Протвино
2016

ББК 31.33
Д99

Рецензент:
доктор физико-математических наук, начальник лаборатории
ФГБУ «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
В.С. Селезнев

Дягилев, В.И.
Д99 Лабораторные работы по дисциплине «Электротехника и электроника». Аналоговая электроника: электронное методическое пособие / В.И. Дягилев. — Протвино, 2016. — 63 с.

Методическое пособие содержит описание пяти лабораторных работ по дисциплине «Электротехника и электроника». Аналоговая электроника: «Полупроводниковый выпрямитель со сглаживающим фильтром», «Транзисторный однокаскадный усилитель низкой частоты», «Переключающие устройства релейного действия. Логические элементы «НЕ» и «ПАМЯТЬ»», «Импульсные генераторы на транзисторах и ИМС», «Операционные усилители».

Методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Информатика и вычислительная техника».

ББК 31.33

© Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Университет «Дубна», филиал «Протвино», 2016
© Дягилев В.И., 2016

Оглавление

Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ 3
Лабораторная работа № 1. Полупроводниковый выпрямитель со сглаживающим фильтром 6
Лабораторная работа № 2. Транзисторный однокаскадный усилитель низкой частоты 19
Лабораторная работа № 3. Переключающие устройства релейного действия. Логические элементы «НЕ» и «ПАМЯТЬ» 28
Лабораторная работа № 4. Импульсные генераторы на транзисторах и ИМС 39
Лабораторная работа № 5. Операционные усилители 50
Библиографический список 62

2. Коломбет, Е.А. Применение аналоговых микросхем / Е.А. Коломбет. — М. : Радиосвязь, 1990. – 320 с.

3. Рекус, Г.Г. Лабораторный практикум по электротехнике и основам электроники / Г.Г. Рекус, В.Н. Чесноков. — М. : Высш. школа, 2001. — 254 с.

4. Браммер, Ю.А. Импульсные и цифровые устройства / Ю.А. Брам-мер, И.Н. Пащук. — М. : Высш. школа, 2002. — 351 с.

5. Криштафович, А.К. Основы промышленной электроники / А.К. Криштафович, В.В. Трифонюк. — М. : Высш. школа, 1985. — 287 с.

Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ

Подготовка к лабораторным работам.

Лабораторные работы в группах проводятся в соответствии с расписанием учебных занятий в институте и в течение определенного времени. Поэтому для выполнения лабораторных работ студент должен руководствоваться следующими положениями:

1) предварительно ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ;

2) внимательно ознакомиться с описанием соответствующей лабораторной работы и установить, в чем состоит основная цель и задача этой работы;

3) по лекционному курсу и соответствующим литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной лабораторной работе;

4) до проведения лабораторной работы подготовить в рабочей тетради соответствующие схемы, миллиметровку для построения графиков, таблицы наблюдений и расчетные формулы.

Указания к выполнению лабораторных работ.

Успешное выполнение лабораторных работ может быть достигнуто в том случае, если экспериментатор отчетливо представляет себе цель эксперимента и ожидаемые результаты, поэтому важным условием обстоятельности проводимых исследований является тщательная подготовка к лабораторной работе. При этом необходимо соблюдение следующих требований.

1. Перед сборкой электрической цепи студенты должны предварительно ознакомиться с электрическим оборудованием и его номинальными данными, а также с измерительными приборами, предназначенными для проведения соответствующей лабораторной работы.

2. Сборку электрической цепи необходимо производить в точном соответствии с заданием. Целесообразно вначале соединить все элементы цепи, включаемые последовательно, а затем — параллельно. Электрические цепи, включаемые параллельно, рекомендуется соединять проводами другого цвета.

3. После окончания сборки электрическая цепь должна быть предъявлена для проверки. Включать цепь под напряжением можно только с разрешения преподавателя или дежурного лаборанта.

4. Запись показаний всех приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует производить по возможности одновременно и быстро.

5. Результаты измерений заносятся студентом в свою рабочую тетрадь

6. После выполнения отдельного этапа лабораторной работы результаты опыта вместе с простейшими контрольными расчетами предъявляются для проверки преподавателю до разработки электрической цепи.

7. Разбирать электрическую цепь, а также переходить к сборке новой можно только по разрешению преподавателя.

8. После окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в порядок.

9. В течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах. Выходить из помещения лаборатории во время занятий можно только с разрешения преподавателя.

10. Неподготовленные к работе студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Оформление отчета по лабораторным работам.

Составление отчета о проведенных исследованиях является важнейшим этапом выполнения лабораторной работы. По каждой выполненной работе в рабочей тетради составляют отчет, руководствуясь следующими положениями:

1) указать название и порядковый номер лабораторной работы, а также кратко сформулировать цель работы;

2) указать тип и номинальные данные испытуемых электрических машин и аппаратов, а также типы, номера, пределы измерений, класс точности и системы измерительных приборов, используемых при выполнении лабораторной работы (например, амперметр типа М42100, № 01985, магнитоэлектрической системы, 30 делен., предел измерений 3А, кл. 1,5);

3) схемы и графики вычертить с помощью трафарета радиоинженера или циркуля и линейки с соблюдением принятых стандартных условных обозначений;

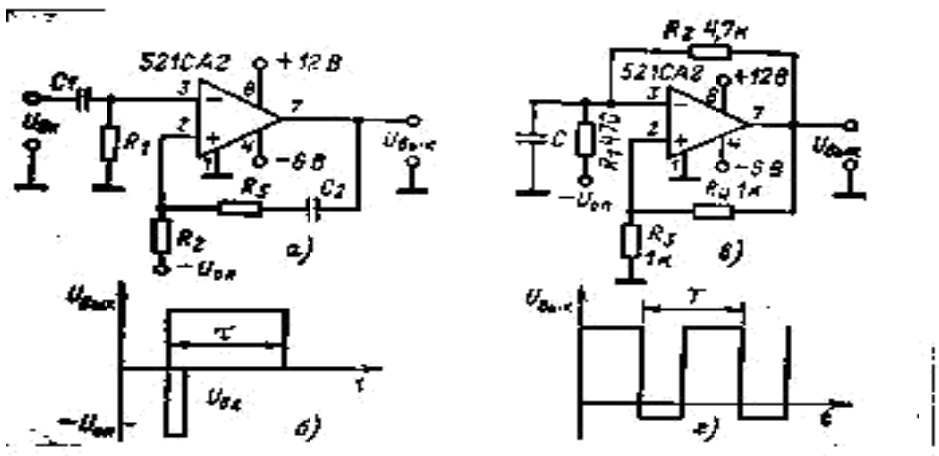


Рис. 10. Ждущий мультиви братор (а), релаксационный генера тор(в) и формы их в ыходных напряжений(б, г)

Оп исание работы этих схем представлены в [1]. Н еобходимо по указани ю преподавател я собрать по од ной схеме. Записать данные опытов и зарисовать ос иллограммы напряжений. Сделать выводы и ответить на вопросы для самопроверки.

5.4 Во просы для самопроверки

1. Что такое операц ионный усилите ль (ОУ)?
2. Пояснить разницу между идеаль ным и реальным ОУ.
3. Чем отличаются принципиально схемы усилителей и компараторов на ОУ?
4. Каким образом можно изменят ь коэффициент усиления инвертиру ющего усилителя?
5. Пояснить работу компаратора.
6. Какие элементы определяют част оту мультивибратора? [4]

Библио графическ ий список

1. Нестеренко, Б.К. Интегральные операционные усилители / Б.К. Нестеренко. — М. : Энергоизд, 1982. — 128 с.

Рис. 8. Неинвертирующий (а) и инвертирующий (б) усилители переменного напряжения

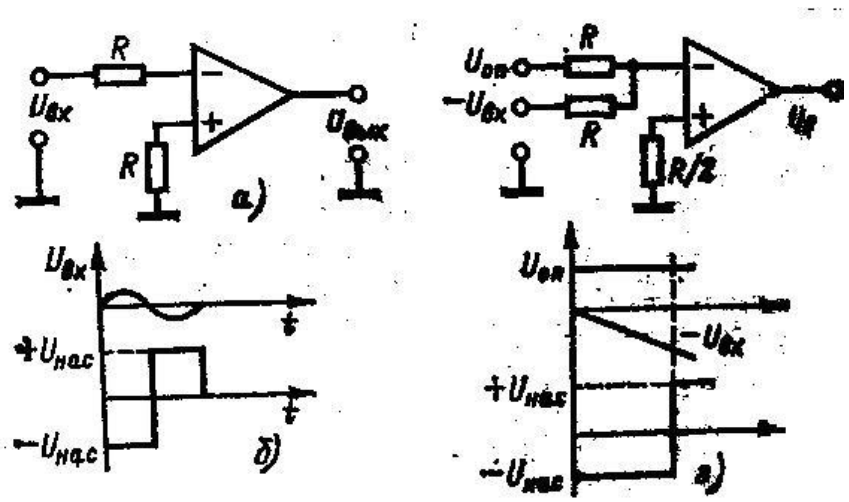


Рис. 9. Нуль-компаратор (а) и форма его выходного напряжения (б); компаратор разнополярных сигналов (в) и форма его выходного напряжения (г)

4) графические зависимости дать в прямоугольной системе координат в масштабе, с равномерными шкалами; произвольный перенос начала координат не допускается; на графиках необходимо наносить экспериментальные точки;

5) отчет по каждой лабораторной работе должен содержать основные выводы. [1]

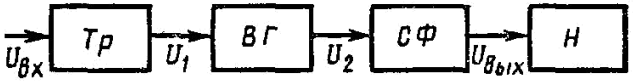
Лаб ораторная работа № 1. Полупроводниковы й выпрямитель со сглаживающ им фильтром

1.1 Цель работы

Исследование о дно- и двухпо лупроводных выпрямительных устройств. Сравнени е полученных экспериментальны х данных с тео-ретич ескими положе ниями. Анализ работы сглаживающих фильтров. Снят ие внешних характеристик.

1.2 Основные теорети ческие положения

Выпрямитель — статическое устройство, служа щее для преобразования переменного тока источника электроэнергии (сети) в постоянный. Выпрямитель состоит из трансформатора, вен тильной группы и сглаживающего фильтра (рис. 1). Трансформатор $T\,p$ выполняет несколько функций: изменяет напряже ние сети $U_{вх}$ д о значения U_1 , необх одимого для в ыпрямления, эле ктрически отделяет нагрузку H от се ти, преобразует число фаз перем енного тока. Вентильная групп а $ВГ$ пр еобразует перем енный ток в пу льсирующий одн онаправленный. Сгла живающий фил ьтр $СФ$ уменьш ает пульсации выпрямленного напря жения (тока) до значения, допустимого для работы нагрузки Н. Тран сформатор $Тр$ и сглаживающий фильтр $СФ$ не являются обяза-тельными элементам и схемы выпрям ителя.



Р ис. 1. Блок-схема выпрямителя

Основными параметрами, харак теризующими качество работы выпрямителя, являются:

1) средние значения выпрямленного (выходно го) напряжения $U_{ср}$ и тока $I_{ср}$

сопровождающееся пере ключением компаратора в другое состояние, при кото ром $U_{вых.max} \approx + U_{ИП}$.

Моменту времени, при котором выполняется рав енство (4.48), соответствует неустойч ивый линейный режим усилител я компарато-ра. При этом наклон пер еходной характеристики определяется собственным коэффициентом усиления усили теля K_U. Поэто му отсутствие в ОУ от рицательной обр атной связи способствует увеличению скоро-сти переключения компа ратора.

Точность сравнения напряжений у величивается с увеличением их амплитуд, которые, однако, не должны превышать допустимых уровней входных дифф еренциальных напряжений. Сопротивление баланси рующего резистора в цепи неинвертирующего входа определяется по формуле

$$R_{бал} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} .$$

5.3 М етодические указания

Озн акомится со сх емой инвертиру ющего усилителя, и неинвертирующего усилителей и повторителя (р ис. 7). На рис. 8 . представлены схемы усилителей переменного напряжения, на рис. 9 — компаратор.

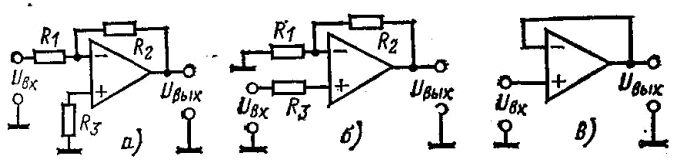
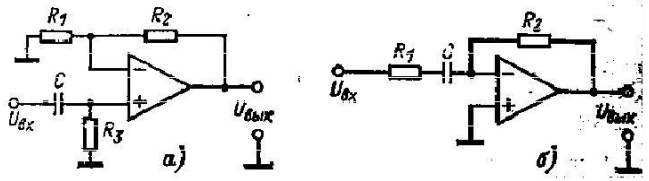


Рис. 7. Инвертирующий, неинвертирующ ий усилители и повторитель



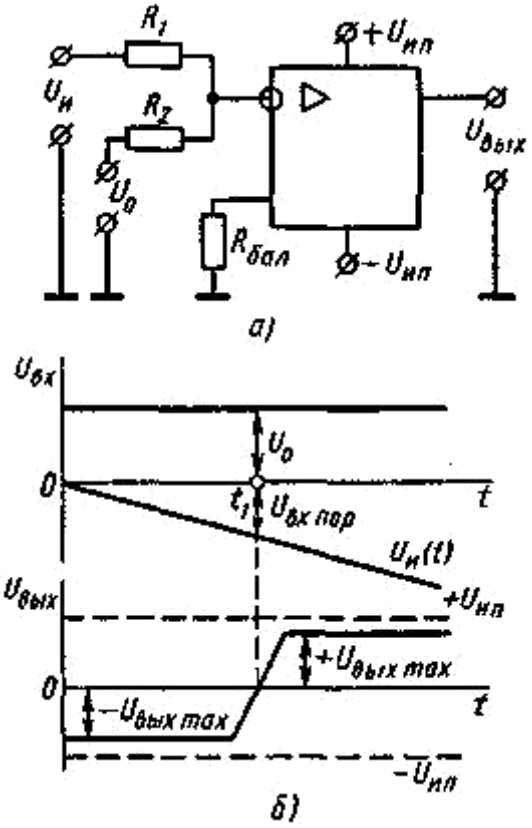


Рис. 6. Компаратор на ОУ

В промежутке времени 0—t_1 (рис.6, *б*) выполняется неравенство $|U_u| < |U_0|$, поэтому $U_{вх} > 0$ и напряжение на выходе компаратора $U_{вых} = U_{вхmax} \approx -U_{нп}$ (напряжение на инвертирующем входе операционного усилителя и его выходе — разнополярны). В момент времени t_1 входной сигнал достигает порогового значения

$$U_{и} = U_{вх.\,пор} = U_0 \frac{R_1}{R_2} \qquad (4.48)$$

а затем, (при $t > t_1$) превышает его, чему соответствует наличие отрицательного потенциала на инвертирующем входе усилителя ($U_{вх}<0$),

$$U_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T u_{вх}\,dt; \quad I_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T i_{вых}\,dt, \qquad (1)$$

где T — период изменения выходного напряжения (тока);

2) частота пульсаций f_n выходного напряжения (тока)

$$f_n = \frac{1}{T} \quad ; \qquad (2)$$

3) коэффициент пульсаций p , равный отношению амплитуды напряжения пульсаций $U_n = U_{max} - U_{min}$ к среднему значению выходного напряжения

$$p = \frac{U_n}{U_{ср}} \cdot \qquad (3)$$

Вместо коэффициента пульсаций p часто используют коэффициент пульсаций по первой гармонике p_1 равный отношению амплитуды первой гармоники выходного напряжения к его среднему значению

$$p_1 = \frac{U_{m1вых}}{U_{ср}} \cdot \qquad (4)$$

Внешняя характеристика — зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от среднего значения выпрямленного тока: $U_{ср} = U_{ср}(I_{ср})$;

4) коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{полезн}}{P_{потр}} = \frac{P_{полезн}}{P_{полезн} + P_{тр} + P_{вг} + P_{ф}} \quad , \qquad (5)$$

где $P_{тр}$, $P_{вг}$, $P_{ф}$ — мощность потерь в трансформаторе, в вентильной группе и сглаживающем фильтре соответственно.

Работа выпрямителя (вентильной группы) основана на свойствах вентилей — нелинейных двухполюсников, пропускающих ток преимущественно в одном (прямом) направлении. В качестве вентилей используют обычно полупроводниковые диоды.

Вентиль, обладающий нулевым сопротивлением для прямого тока и имеющий бесконечно большое сопротивление для обратного тока, называют *идеальным.* Вольт-амперные характеристики (ВАХ) реальных вентилей приближаются к ВАХ идеального вентиля.

Для работы в вы прямителях вентили выбирают по эксплуатационным параметрам, к которым относятся:

– *наибольший (прямой) рабочий ток* $I_{\text{ср max}}$ — предельно допусти мое среднее значение выпрямле нного тока, про текающего чере з венти ль при его работе в однополупе риодной схеме на активную нагрузку (при нормальн ых для данного вентиля условиях охлаждения и темпе ратуры, не превышающей преде льного значени я);

– *наибольшее д опустимое обратное напряжение* (амплитуда) $U_{\text{обр max}}$ — обратное напряжение, кот орое вентиль в ыдерживает в течение длительного вр емени. Как пра вило, напряжени е $U_{\text{обр max}}$ равно поло ине напряжения пробоя;

– *прямое падение напряжения* $U_{\text{пр}}$ — среднее значение прямого напряжения в однополупериодной схеме выпрямления (см. схемы выпрямления), работающей на активную нагрузку при номинальном токе. Производная $\frac{d\,U_{\text{пр}}}{dI}$ представля ет собой *диффе ренциальное прямое сопротивление ве нтиля* $R_{\text{в}}$;

– *обратный то к* $I_{\text{обр}}$ — значение тока, протекающего чере з венти ль, при приложе нии к нему доп устимого обратного напряжения;

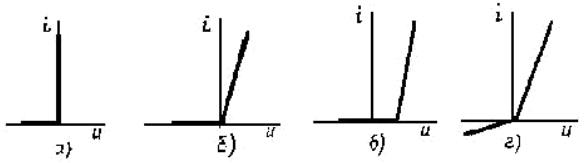


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов

– *максимальная мощность* P_{max} — максимально допустимая мощн ость, которая м ожет быть рассе яна корпусом ве нтиля.

На рис. 2 а—г приведены различные кусочно -л инейные аппрок-сима ции характеристик вентилей. Для проведения расчетов выпрями-телей чаще всего ог раничиваются простейшими а ппроксимациями (рис. 2 а, б).

Схемы выпрямления.

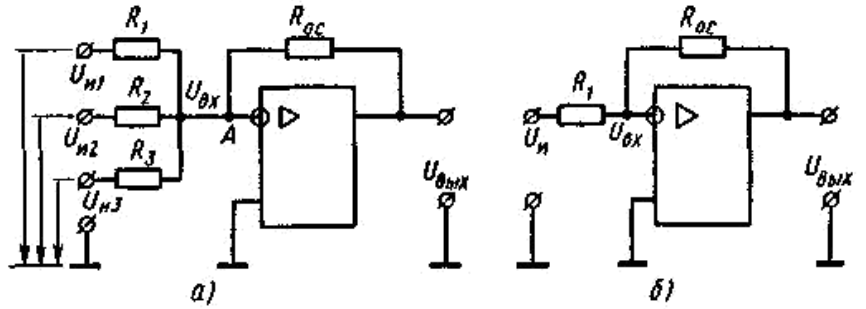


Рис. 5. Схема сумматора (а) и масштабного усилителя (б)

Выходное напряжение в сумматоре на ОУ пропорционально сумме входных напряжений.

Масштабный усилитель.

Назначение этого усилителя — изменение масштаба электрической величины посредством умножения входного сигнала на некоторый постоянный коэффициент.

Если положить в схеме на рис. 5а $R_2 = R_3 = \infty$ (усилитель с одним входом), то получим схему, показанную на рис. 5 б, для которой уравнение (4.47) приобретает вид $U_{вых} = -\frac{R_{\text{ос}}}{} U_{н}$, что соответствует R_1 назначению усилителя. Уровень выходного напряжения (масштаб) устанавливается соотношением сопротивлений R_1 и $R_{\text{ос}}$, т. е. весовым коэффициентом.

Компаратор напряжения.

Компараторное включение операционного усилителя используется для сравнения напряжения источника сигнала $U_{\text{н}}$ с опорным напряжением U_0. В компараторном режиме обычно отсутствуют цепи отрицательной обратной связи с подачей сравнивающих сигналов на один или оба входа усилителя.

Для сравнения разнополярных входных напряжений используется *одновходовый компаратор* (рис. 6 а), в котором исследуемый и опорный сигналы поступают на инвертирующий вход усилителя.

Типовые применения ОУ.

Принципиальная схема неинвертирующего усилителя переменного тока на микросхеме 140УД1А показана на рис. 4.

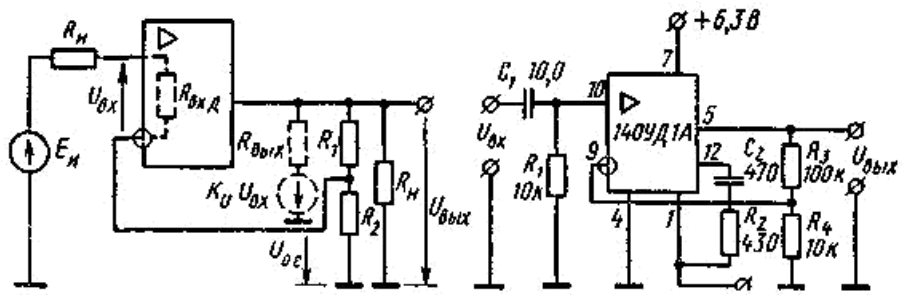


Рис. 4. Неинвертирующий ОУ

Традиционными областями применения ОУ являются решающая аналоговая техника, аппаратура обработки сигналов, радиоизмерительные устройства и др., в которых часто требуется выполнение операторных уравнений при замыкании выхода ОУ на инвертирующий вход с помощью пассивных цепей отрицательной обратной связи. При рассмотрении основных типовых применений ОУ в названных областях будем полагать, что влиянием собственных параметров усилителя с учетом того, что K_U и $R_{вх}$ достаточно велики, а $R_{вых}$ доста-точно мало, можно пренебречь.

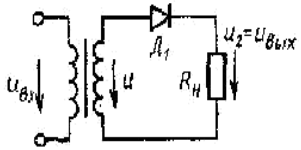
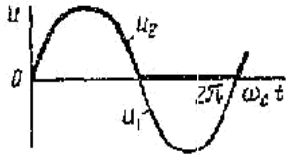
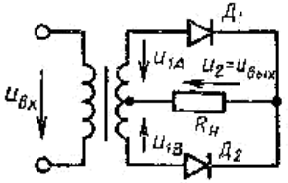
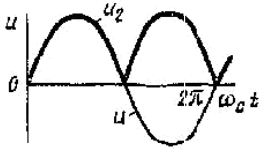
Сумматор со многими входами.

На вход сумматора (рис. 5 *а*) от нескольких источников с выходными сопротивлениями R_1, R_2 , R_3 , ... поступают входные сигналы $U_{и1}$, $U_{и2}$, $U_{и3}$,....

Кроме того, к входу усилителя (точка *A*) через сопротивление обратной связи *AV* подводится часть выходного напряжения $U_{вых}$. При этом необходимо учитывать, что небольшое выходное сопротивление усилителя входит в сопротивление $R_{ос}$.

Наи более распространенные схемы выпрямления показаны в табл. 1, где приняты следующие обозн ачения: m_c — число фаз напряжени я сети; m_1 — чи сло фаз напряжения на входе схемы выпрямления (на выходе транс форматора); $m = \frac{f_n}{f_c}$ — коэффициент, равный отношен ию частоты пул ьсации выходн ого напряжения к частоте напряжени я сети. В качестве вентилей везде изображены полупроводниковые диоды.

Таблица 1. Схемы выпрямл ения

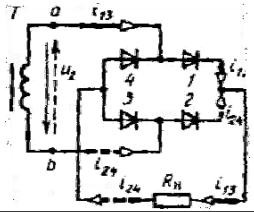
Схема выпрямления (п ри активной нагрузке)	Ф орма выходного напряжении
1) Однофазная однополупериодная ($m_c = 1$, $m_1 = 1$, $m = 1$) 	
2) Однофазная с выводом средней точки ($m_c = 1$, $m_1 = 1$, $m = 2$) 	

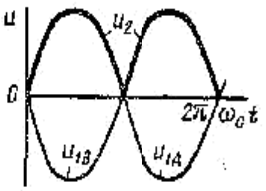
Продолжение табл. 1

Схема выпрямления (п ри активной нагрузке)	Ф орма выходного напряжении

3) О днофазная двухполупериодная (мостовая)

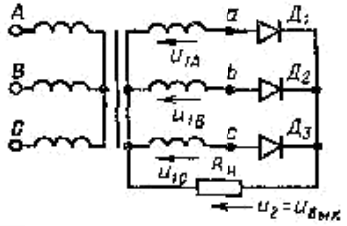
($m_c = 1, m_1 = 2, m = 2$)

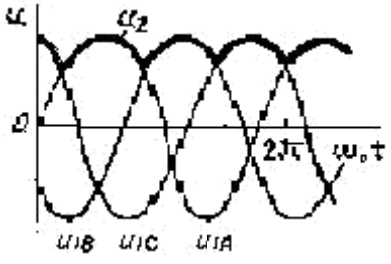




4) Трехфазная с выводом нейтрали

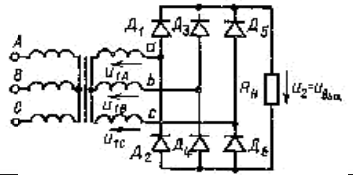
($m_c = 3, m_1 = 3, m = 3$)

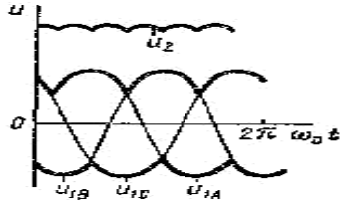




5) Тр ехфазная мостова я схема

($m_c = 3, m_1 = 3, m = 6$)





Однофазными в ыпрямительными устройствами являются такие, в которых ток во вторичной обмотке трансформатора в процессе выпрям ления протекает только в одном направлении. В качестве электриче ского вентиля в этой схеме ис пользуется полупроводниковый диод Д. При подаче переменного синусоидального напряжения на перви чную обмотку согласующего трансформатора напряжение на зажи мах вторичной его обмотки буд ет также переменным синусоидальн ым, т. е.: $U_2 = U_{2m} \cdot \sin(\omega t)$. Кривая получаемого в процессе

$$U_{R2} = I_2 R_2 = -I_И R_2 = -E_И \frac{R_2}{R_1} \qquad (4.39)$$

Так как потенциал точки *A,* где осуществляется суммирование токов, практически равен нулю, то

$$U_{вых} = U_{R2} \quad и \quad U_{вых} = U_{R2} = -E_И \frac{R_2}{R_1}, \qquad (4.40)$$

откуда коэффициент усиления ОУ с учетом того, что коэффициент передачи напряжения обратной связи $\beta_U = \frac{R_1}{R_2}$,

$$K_U = \frac{U_{вых}}{E_И} = -\frac{R_2}{R_1} \qquad (4.41)$$

Знак «–» в уравнении (4.41) указывает на инвертирование фазы (полярности) входного сигнала. Входное и выходное сопротивления такой модели в первом приближении определяются равенствами

$$R_{вх} \approx R_1 ; R_{вых} \approx 0 . \qquad (4.42)$$

Модель неинвертирующего ОУ показана на рис. 6. Напряжение обратной связи, снимаемое с делителя R_1R_2, пропорционально выходному напряжению усилителя:

$$U_{ос} = \frac{U_{вых} R_2}{(R_1 + R_2)} = \beta_U U_{вых} .$$

Принимая во внимание, что коэффициент усиления идеального ОУ определяется равенством (4.41), для неинвертирующего усилителя получим

$$K_U = \frac{1}{\beta_U} = \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \qquad (4.43)$$

Если $R_1 = 0$, то $K_U = 1$, $R_{вх} = R_2$ и ОУ становится неинвертирующим повторителем напряжения. Однако такой повторитель передает постоянное напряжение (конденсатор C_1 при этом исключается), не внося дополнительного сдвига фазы. Входное сопротивление реального инвертирующего усилителя с учетом наличия обратной связи велико:

$$R_{вх} = R_{вх.\,м} (1 + \beta_U K_U) \qquad (4.44)$$

где $R_{вх..м}$ — собственное входное сопротивление микросхемы; K_U — коэффициент усиления микросхемы без обратной связи.

работы схем, а также значительное снижение потребляемого тока. Другие ОУ серий 140 и 153 микросхемы 140УД6, 140УД8, 140УД12, 153УД 6 в схемотехническом отношении мало отличаются от микросхемы 140УД7, являясь ее модификациями.

Инвертирующее и неинвертирующее включение ОУ.

В зависимости от условий подачи на вход ОУ усиливаемого сигнала, а также с учетом подключения внешних компонентов можно получить инвертирующее и неинвертирующее включения усилителя. Любое схемотехническое решение с применением ОУ содержит одно из таких включений.

На рис. 3 приведена модель инвертирующего включения ОУ.

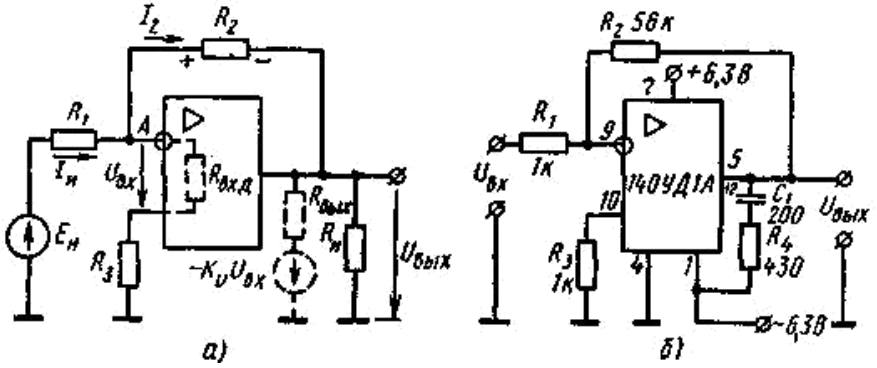


Рис. 3. Инвертирующий ОУ

Так как усиление ОУ очень велико, то с небольшой ошибкой будем считать такую модель идеальной, что соответствует выполнению условий $K_U \to \infty$ и $K_1 \to \infty$, где K_U и K_1 — коэффициенты усиления по напряжению и току без обратной связи. Если при этом охватить усилитель параллельной отрицательной обратной связью по напряжению через резистор R_2, то любой незначительной сигнал $U_{вх}$ на входе будет усилен и передан по цепи обратной связи во входную цепь ОУ, компенсируя входной сигнал так, что в состоянии равновесия (стационарном режиме) $U_{вх} = 0$. Поскольку входное сопротивление усилителя также велико, то можно считать, что ток источника сигнала $I_н$ входит только в сопротивление R_2, падение напряжения на котором за счет этого тока

однополупериодного выпрямления пульсирующего тока может быть разложена в гармонический ряд Фурье:

$$i = I_{2m}\left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2}\sin(\omega t) - \frac{2}{3}\cos^2(\omega t) - \text{К}\right).$$

Из приведенного выражения следует, что пульсирующий ток при однополупериодном выпрямлении, кроме переменных составляющих различных амплитуд и частот, содержит также и постоянную составляющую $I_d = \frac{I_{2m}}{\pi}$. При этом постоянную составляющую напряжения на нагрузке или среднее значение выпрямленного напряжения U_d с учетом выражения для тока I_{2m} определяют из соотношения:

$$U_d = R_н I_d = I_{2m} R_н = \frac{U_{2m}}{\pi}.$$

Однополупериодное выпрямление переменного тока характеризуется глубокими пульсациями выпрямленного тока и напряжения, которые обусловливаются наличием в кривых выпрямленного тока и напряжения переменных составляющих пульсаций. Также отмечается недостаточно высокое использование трансформатора, т. к. по его вторичной обмотке при этом протекает ток только в течение полупериода. Выпрямители подобного рода применяют главным образом в маломощных установках, когда выпрямленный ток мал, а достаточно удовлетворительное сглаживание пульсаций может быть обеспечено с помощью фильтра.

Представляет собой сочетание двух однополупериодных выпрямителей с общей нагрузкой. При этом напряжение на каждой половине вторичной обмотки трансформатора можно рассматривать как два независимых синусоидальных напряжения, сдвинутых относительно друг друга по фазе на угол 180°.

В сравнении со схемой однополупериодного выпрямителя в двухполупериодном ток во вторичной обмотке трансформатора не содержит постоянной составляющей, так как в этой обмотке ток протекает в течение всего периода, вследствие чего подмагничивание сердечника в данном случае отсутствует, тепловые потери при этом уменьшаются. С учетом этого применение двухполупериодной схемы выпрямления более предпочтительно, чем однополупериодной. Снижения обратного напряжения, воздействующего на диод в непроводящую часть периода, и уменьшения расчетной мощности трансфор-

матора при двухполупериодном выпрямлении переменного тока можно достигнуть при переходе от однотактной схемы к двухтактной (мостовой) схеме.

Выпрямитель, выполненный по мостовой схеме позволяет получить двухполупериодное выпрямление переменного тока при полном использовании мощности трансформатора, не имеющего среднего вывода от вторичной обмотки. В этой схеме в течение полупериода, когда потенциал вывода, а вторичной обмотки трансформатора будет выше потенциала его вывода *b,* ток пропускают диоды 1 и 3. При этом диоды 2 и 4 находятся в непроводящем состоянии. В следующий полупериод будут проводить ток соответственно диоды 2 и 4 (цепь тока указана пунктирными стрелками на рис.), а диоды 1 и 3 будут находиться в непроводящем состоянии. Из схемы видно, что направление тока в цепи нагрузки в течение обоих полупериодов переменного напряжения при этом не меняется.

Таким образом, рассматриваемая схема является схемой двухполупериодного выпрямления. Значения среднего выпрямленного напряжения на нагрузке и коэффициента пульсации для выпрямителя определяются так же, как и для однотактного двухполупериодного выпрямителя.

Данная схема выпрямления позволяет получить заданное выпрямленное напряжение при числе витков вторичной обмотки трансформатора, вдвое меньшем, чем в однотактной двухполупериодной схеме выпрямления при прочих равных условиях.

Так как во вторичной обмотке трансформатора в рассматриваемой схеме протекает не пульсирующий, а синусоидальный переменный ток, это позволяет уменьшить габариты трансформатора по сравнению с трансформатором, необходимым для питания однотактного двухполупериодного выпрямителя, рассчитанного на ту же мощность, приблизительно в 1,5 раза.

Мостовые схемы позволяют осуществлять выпрямление переменного тока в постоянный без использования согласующего трансформатора при непосредственном подведении сетевого переменного напряжения к вентильному мосту, когда напряжение питающей сети находится в соответствии с выпрямляемым напряжением.

Основные соотношения для схем выпрямления при работе на активную нагрузку $R_н$ в предположении идеальности трансформатора и вентилей приведены в табл. 1.

К входам усилителя прикладывается напряжение $U_{вх}$ от источни-ка дифференциального сигнала $E_и$ с внутренним сопротивлением, равным нулю. При этом $U_{вх}$ является дифференциальным напряжени-ем независимо от того, какой из входов усилителя заземлен.

Как входное, так и выходное напряжения могут симметрично изменяться относительно нуля (быть биполярными), как это видно из передаточной характеристики ОУ $U_{вых} = f(U_{вх})$ (рис. 2 *б*). При заземленном неинвертирующем входе, как показано на рис. 2 *а,* передача сигнала на выход усилителя осуществляется с инвертированием фазы входного сигнала (передаточная характеристика 1). В случае заземле-ния инвертирующего входа фаза усиливаемого сигнала в процессе усиления не изменяется (передаточная характеристика *2*). Выходное напряжение снимается относительно средней точки источников пита-ния (корпуса). Если $U_{вх} = 0$, то $U_{вых} = 0$, что отражает условие баланса ОУ. При отсутствии внешних цепей обратных связей, как в данном случае, наклон передаточных характеристик $\Delta U_{вых}/\Delta U_{вх}$ определяется собственным коэффициентом усиления K_U . Предельное значение ам-плитуды выходного сигнала весьма близко к $2U_{ип}$.

Операционный усилитель содержит два входа и один выход. При подаче сигнала на один из входов (вывод 9 — инвертирующий вход «–») выходной сигнал, снимаемый с вывода 5, сдвинут по фазе относительно входного сигнала на 180° (как в усилительном каскаде на транзисторе по схеме ОЭ). Прохождение сигнала от другого, неинвертирующего входа «+» (вывод 10) к выходу усилителя не сопровождается сдвигом его фазы (или полярности) входного сигнала. К выводу 5 подключается внешняя нагрузка и цепи обратной связи, а к выводам 1 и 7 — источник питания. Выводы 1, 2, 3 и 12 предназначены для подключения корректирующих цепей. Промышленные образцы ОУ типа 140УД1Б обеспечивают K_U = 1300—12 000; $R_{вх}$ = 7—35 кОм; $R_{вых}$ = 300 Ом.

Типичной для интегральных ОУ второго поколения является микросхема 140УД7. Отличительной особенностью этого усилителя от рассмотренных является то, что он содержит лишь два каскада усиления.

Технические параметры двухкаскадных ОУ примерно соответствуют параметрам лучших образцов усилителей первого поколения (микросхемы 153УД1, 140УД2 А, Б и др.). Однако принципиальным достижением является увеличение быстродействия и стабильности

Напряжение, приложенное непосредственно между входами, равно разности напряжений $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$. Причем это напряжение равно нулю, если последние имеют даже существенно неравные значения. Поэтому $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ по отношению к общей точке называют напряже-ниями общего вида, а их разность — дифференциальным напряжени-ем.

Из технических соображений, а частично по традиции, в инженерной практике в большинстве случаев применяют усилители напряжения. Развитие микроэлектроники еще в большей степени усиливает эту тенденцию. Выпускаемые ОУ характеризуются большим входным и низким выходным сопротивлениями, а также высоким коэффициентом усиления. Представляя ОУ идеальной моделью, считают, что $K_U \to \infty$, $R_{BK} \to \infty$, $R_{вых} \to 0$. Кроме того, к основным признакам идеального ОУ следует также отнести бесконечно широкую полосу частот, начиная с частоты $f = 0$; постоянство амплитуды усиливаемого сигнала во всем диапазоне частот; отсутствие статических, шумовых и дрейфовых ошибок во времени и в диапазоне температур.

Питание ОУ осуществляется от двух соединенных последовательно источников с одинаковыми постоянными напряжениями $U_{ип1}$ и $U_{ип2}$ или от одного источника со средней точкой, которая заземлена (рис. 2). При использовании соответствующих делителей напряжения возможно питание ОУ от одного источника, однако это приводит к увеличению потребления энергии и снижает показатели ОУ.

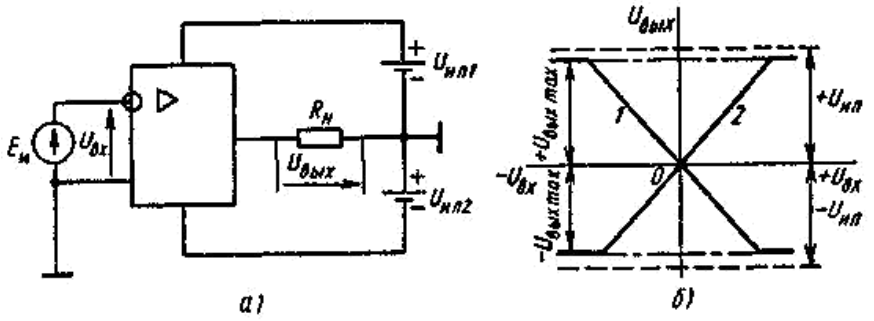


Рис. 2. Блок-схема ОУ с двухполярным питанием

Вне шнюю характер истику выпрям ителя с учетом прямого дифференциального сопрот ивления вентиле й $R_в$ и привед енного к вторичной обмотке сопроти вления трансформатора $R_{тр}$ можно выразить следующ им образом:

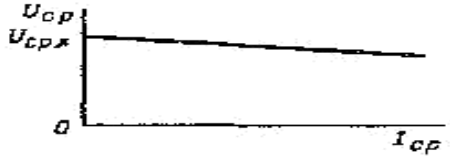


Рис. 3. Внешняя характеристика выпрямителя

$$U_{ср} = U_{ср.х} - (R_{тр} + NR_в)I_{ср},$$

где $U_{ср.х}$ — среднее выпрямленное напряжение в режиме холостого хода вы прямителя;

N — число вентилей, че рез которые в каждый момент вр емени проте-кает ток нагрузки (N = 1 для однопол упериодных схем, $N = 2$ для двухполупериодных схем).

Работа выпрямителя на емкостну ю нагрузку.

Работа однофазного однополупери одного выпрямителя на нагрузку, с остоящую из па раллельно включенных конденс атора C и ре-зистивн ого элемента $R_н$, проиллюстриро вана на рис. 4 а, б.

Ток i_2 через вентиль протекает в течение неболь шой доли периода, заряжая конденс атор C. Постоянная времени зар ядки конденсатора определяется мал ым сопротивле нием, равным су мме прямого диффер е нциального соп ротивления вен тиля и приведе нного к вторичной обмотке сопрот ивления трансф орматора. В остальную часть периода конденсатор разряжается на $R_н$, напряжение на его обкладках убы вает по экспоненциальному закону.

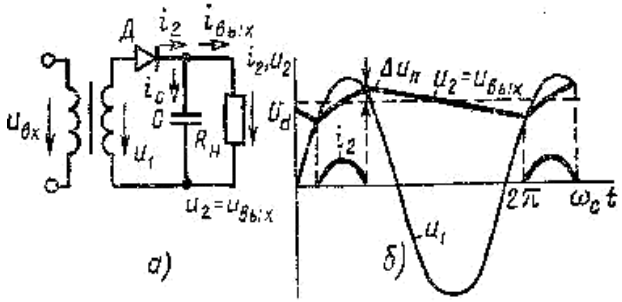


Рис. 4. Схема и временная диаграмма выходного напряжения выпрямителя с емкостным фильтром

При большой емкости конденсатора, когда выполняется условие $\tau_н = CR_н >> \frac{2\pi}{\omega_c}$ время его зарядки становится пренебрежимо малым по сравнению со вре менем его разрядки; разрядка ко нденсатора протекает во времени практически по ли нейному закону. В этом случае:

$$U_н = \frac{U_{1m}\,2\pi}{\tau_н \omega_п}\ ;\ U_{ср} = U_{1m} - \frac{U_п}{2} = U_{1m}\left(1 - \frac{\pi}{\omega_п \tau_н}\right);$$

$$U_{обр} \le 2U_{1m} - \frac{U_п}{2} \approx 2U_{1m}\ ;\ p = \frac{2}{\frac{2U_{1m}}{U_п}} \approx \frac{U_п}{U_{1п}} = \frac{2\pi}{\omega\tau};$$

$$p_1 = \frac{U_п}{\pi U_{ср}} \approx \frac{2}{\omega_п \tau_н}\ .$$

Таким образом, при большой е мкости конденсатора пульсации напряжения на выхо де выпрямителя сглаживаются, а среднее значение выпрямленного напряжения приближается к максимальному значени ю выходного нап ряжения.

Сглаживание выпрямленного напряжения.

Для сглаживания (уменьшения пульсаций) выпрямленного напряжения применяют сглаживающ ие фильтры. Сглаживающий фильтр включают между вентильной группой и нагрузкой, он содержит (в основном) реактивные элеме нты, сопротивление которых зависит от частоты протекающего через них тока. При этом для обеспе-

назначенный для выполнения самых разнообразных функций, в том числе и перечисленных.

Основные свойства операционных усилителей.

Интегральные ОУ обычно строят по схеме усиления с непосредственной связью между отдельными каскадами с дифференциальным входом и биполярным по отношению к амплитуде усиливаемого сигнала выходом. Это обеспечивает нулевые потенциалы на входе и выходе ОУ при отсутствии управляющих сигналов на его входе. Поэтому такие усилители легко соединять последовательно при непосредственной связи между отдельными каскадами, а также достаточно просто охватывать любыми цепями обратных связей.

Как отмечалось, интегральный ОУ имеет обычно дифференциальный вход (два входных зажима). Для обеспечения универсальности применения ОУ должен иметь также два выхода (рис. 1), с которых можно снять два противофазных напряжения ($U_{вых1}$ и $U_{вых2}$).

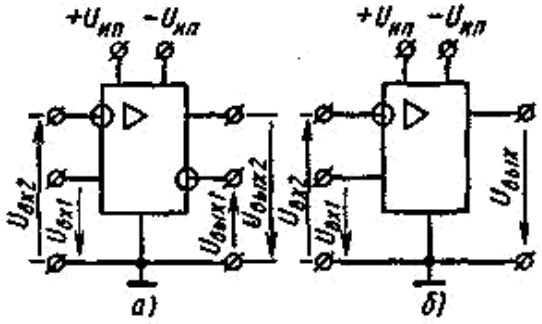


Рис. 1. Блок-схема ОУ

Причем каждое из выходных напряжений может быть положительно или отрицательно относительно потенциала общей (заземленной) точки двух источников питания $+U_{ип}$ и $-U_{ип}$. Оба разнопо-лярные выходные напряжения должны иметь примерно одинаковый уровень, в связи с чем требуется равенство по абсолютному значению обоих источников питания.

Большинство стандартных интегральных ОУ имеет один выход (рис. 1 *б*). При этом выходное напряжение $U_{вых}$ находится в фазе с напряжением $U_{вх1}$ и противофазном напряжению $U_{вх2}$.

Лабораторная работа № 5.
Операционные усилители

5.1 Цель работы

1. Ознакомление с основными схемами на основе операционного усилителя (ОУ).

2. Исследование основных закономерностей в различных схемах с ОУ.

Приборы и оборудование: источник постоянного напряжения 24 В.(со средней точкой), плата с ОУ и резисторами и конденсатора-ми, два мультиметра, осциллограф.

5.2 Основные теоретические положения

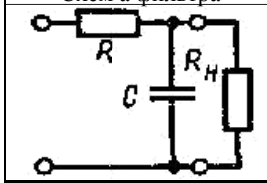
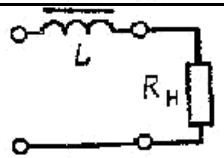
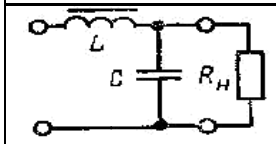
Операционные усилители (ОУ) в интегральном исполнении в настоящее время составляют основу аналоговых интегральных схем. Такие усилители (разумеется, в иных схемотехнических вариантах) использовались для решения операторных уравнений еще в аппаратуре электронной техники первого поколения (см. п. 3.1).

До появления линейных интегральных схем к классу операционных усилителей относили многокаскадные усилители постоянного тока с обратными связями, которые использовали в аналоговой вычислительной технике для выполнения операций алгебраического сложения, вычитания, умножения, деления, дифференцирования, интегрирования, логарифмирования и т. д. Однако для усилителей постоянного тока на дискретных транзисторах (а тем более на лампах) характерны многочисленные недостатки.

Успехи технологии обусловили появление серийных партий ОУ в виде интегральных микросхем, что позволило значительно усовершенствовать их технические и эксплуатационные показатели. При этом наряду с известными были разработаны новые схемотехнические решения, составившие основу интегральных ОУ. Все это существенно расширило универсальность и функциональную ориентацию линейных интегральных ОУ. Таким образом, в настоящее время под ОУ понимают высококачественный усилитель напряжения, пред-

чения ф ильтрации последовательно с нагрузкой включают элементы, имеющие большое сопротивление для переменной соста вляющей выпрямленного тока и малое для постоянн ой, а параллельно нагрузке — элемент ы, имеющие малое сопротивлен ие для переменной и большое для пос тоянной составляющей. Послед овательно вклю чаемыми эле-ментами могут быть индуктивная катушка с ферромагнитным сер-дечником (дроссель) ил и параллельны й *LC*-контур, н астроенный в резонан с на частоту пульсаций $\omega_n = 2\pi f_n$.

Таблица 2. Схемы фильтра

Схем а фильтра	λ	$k_ф$	q
	$\frac{R_н}{R_н + R_L}$	$\omega_n RC$	$\frac{\omega_n CRR_н}{R_н + R}$
	$\frac{R_н}{R_н + R_L}$	$\frac{R_н}{\sqrt{(R_н + R_L)^2 + (\omega_n L)^2}} \approx \frac{R_н}{\omega_n L}$	$\frac{R_н^2}{\omega_n L (R_н + \omega_n L)}$
	$\frac{R_н}{R_н + R_L}$	$\omega_n^2 LC - 1$	$\frac{R_н (\omega_n^2 LC) - 1}{R_н + R_L}$

Про стейший индук тивный сглаживающий фильтр состоит из ин-дуктивной катушки—др осселя, включаемого последовательно с на-грузкой. В результате пульсаций выпрямленного тока в катушке ин-дуктивности возникает электродвижущая сила самоиндукции

$e_L = \pm L \frac{d_i}{dt}$ которая в силу закона электромагнитной индукции

стремится сгладить пульсации тока в це пи нагрузки, а, следовательно, и пульсации напряжения на ее зажимах. Индуктив ные фильтры обычно применяют в схемах выпрямления с большими значениями выпрямл енного тока, та к как в этом случае увеличивается эффектив-

ность сглаживания. В тех случаях, когда необходимо Качество сглаживания характеризуется несколькими показателями, к которым относятся:

– *коэффициент сглаживания* q — отношение коэффициентов пульсации по первой гармонике на входе и выходе фильтра: $q = \frac{p_{12}}{p_{1вых}}$;

– *коэффициент фильтрации* $k_ф$ — отношение амплитуд первых гармоник на входе и выходе фильтра: $k_ф = \frac{U_{m12}}{U_{m1вых}}$;

– *коэффициент передачи постоянной составляющей* λ — отношение постоянных составляющих на выходе и входе фильтра: $\lambda = \frac{U_{ср.вых}}{U_{ср2}}$.

Если постоянная составляющая выпрямленного напряжения передается на выход фильтра без изменений, то $\lambda = 1$; $q = k_ф$. Некоторые основные типы сглаживающих фильтров и их характеристики представлены на рис. 5.

1.3 Задание по работе

1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки (рис. 5).
2. Исследовать двухполупериодный мостовой выпрямитель.
3. Сделать выводы по работе.

тоpе появляется отрицательный выброс напряжения. Медленная разрядка конденсатора определяет длительность паузы между импульсами, после чего процесс повторяется.

Блокинг-генератор можно перевести в ждущий режим, если запереть транзистор по базе положительным напряжением или по эмиттеру — отрицательным. Для запуска схемы необходимо подать отпирающий импульс, превышающий по амплитуде запирающее напряжение. При этом начинается описанный лавинообразный процесс, формируется один импульс и блокинг-генератор возвращается в исходное ждущее состояние.

4.3 Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, используемым при выполнении работы.
2. Ознакомиться со схемами различных МВ и БГ. Зарисовать их.
3. Установить $U_{пит}$ на блоке питания 15 В и подать его на клеммы блока схем.
4. Поочередно включая тумблеры питания МВ и БГ (по указанию преподавателя) рассмотреть при помощи осциллографа картины напряжения на элементах схемы.
5. Меняя параметры *RC* цепей, измерить длительность импульса и паузы $U_{вых}$. Измерить длительность переднего и заднего фронтов $U_к$ и $U_{вых}$ (в схеме БГ).
6. Записать данные опытов и проанализировать их.

4.4 Вопросы для самопроверки

1. Объяснить осциллограммы напряжений в схемах МВ и БГ, сравнивая их с диаграммами.
2. Какой режим работы транзисторов МВ и БГ?
3. Рассказать о приближенном расчете параметров схемы МВ.
4. Как превратить ждущий БГ в автоколебательный БГ?
5. Почему БГ не может работать при малой скважности импульсов?
6. Как уменьшить «всплеск» коллекторного напряжения при запирании транзисторного БГ?
7. Объяснить природу этого «всплеска» $U_к$.

рядки напряжение на базе, равное напряжению на конденсаторе (при медленном изменении тока напряжением на обмотке $\omega_б$ можно пренебречь), достигнет нуля (момент времени t_1) транзистор отпирается и появляются базовый и коллекторный токи. Приращение коллекторного тока вызывает в обмотке $\omega_к$ ЭДС самоиндукции e_1 за счет чего в обмотке $\omega_б$ наводится ЭДС взаимоиндукции e_2 отрицательной относительно базы полярности. Процесс уменьшения напряжения на базе и соответствующего возрастания коллекторного и базового токов носит лавинообразный характер и заканчивается насыщением транзистора. В этот момент формируется фронт генерируемого импульса, а так как его длительность мала, то напряжение на конденсаторе практически не успевает измениться.

Затем начинается формирование вершины импульса. В это время ток базы не управляет током коллектора, скорость его изменения становится равной нулю и наводимая в обмотке $\omega_б$ ЭДС e_2 начинает падать. В результате уменьшения базового тока в обмотке $\omega_б$ возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая уменьшению базового тока и имеющая ту же полярность, что и ЭДС e_2 . Это приводит к быстрой зарядке конденсатора C базовым током через малое сопротивление эмиттерного перехода насыщенного транзистора. Формирование вершины импульса заканчивается в момент перехода транзистора из режима насыщения в активный режим.

При формировании среза импульса уменьшение коллекторного тока вызывает появление ЭДС e_1 , e_2 в обмотках $\omega_к$ и $\omega_б$. Их полярность обратна той, которая имела место при формировании фронта импульса. Благодаря действию положительной обратной связи в схеме возникает обратный лавинообразный процесс, во время которого токи коллектора и базы резко уменьшаются и транзистор запирается.

В связи с тем, что процессы формирования фронта и среза импульса аналогичны, их длительность примерно одинакова. Инерционность транзисторов способствует некоторому удлинению фронта и среза генерируемых импульсов, однако для современных транзисторов их длительность не превышает десятков наносекунд.

Поскольку в момент запирания транзистора коллекторный ток не прекращается мгновенно, возникает ЭДС самоиндукции и на коллек-

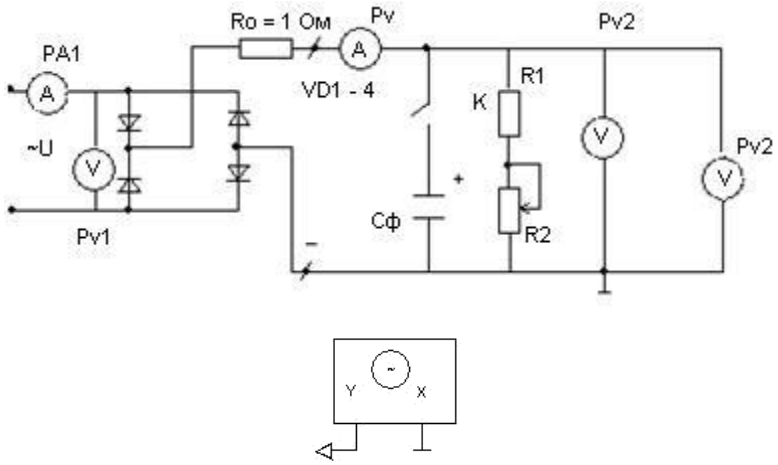


Рис. 5. Схема испытательного стенда

1.4 Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой (стендом). В отчете дать его описание.

2. Подготовить стенд к проведению исследования, а именно, подключить измерительные приборы, подать напряжение переменного тока (по указанию преподавателя). При этом иметь ввиду, что приборы *PA1*, *PV1* и *PV3* — переменного тока, а *PV2* — постоянного.

3. При неизменном питающем напряжении *~U* провести исследование схемы выпрямителя и данные опытов занести в табл. 3.

Таблица 3. Результаты измерения

№/ №	~U (В)	U_d (В)	$U_п$ (В)	I_1 (А)	I_d (А)	$C_ф$ (мкф)	U диода (форма и величина $U_п$)	$U_{д.пр.обр.}$	$I_{диода}$

4. Необходимо провести измерение при нескольких значениях выпрямляющего тока I_d и при 3-х -4-х значениях емкости конденсатора фильтра $C_ф$. Например, $C_ф$=0, $C_ф$=500, $C_ф$= 2500, $C_ф$=10000 мкф.

5. Зарисовать (или заснять) наиболее характерные осциллограммы, например, U_d, $U_п$, $U_{д.пр.обр.}$ с фильтром.

6. Величину тока $I_d = I_{диода}$ можно определить по осциллографу, присоединив 2 его щупа к резистору R_0 = 1 Ом. Тогда величина тока численно будет равна величине напряжения. Попытаться объяснить форму тока I_d.

7. По данным табл. 2 построить графики зависимостей $U_d(I_d)$, $U_п(I_d)$ при различных значениях емкости $C_ф$.

1.5 Вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте форму тока вентиля, нагрузки, первичной обмотки трансформатора, $V_{обр}$, $U_{пр}$, $U_н$.

2. Почему увеличивается $U_{пр}$ при увеличении тока нагрузки?

3. Почему уменьшается пульсация при изменении величины L или C, и как надо их изменять для уменьшения U_n?

4. Что такое внешняя характеристика и как изменяется ее положение, если увеличивать или уменьшать U_1?

5. Почему изменяется $U_н$ при подключении стабилитрона в схему (показать на ВАХ)?

6. Нарисовать форму $U_н$, если включен стабилитрон, но отключен $C_ф$.

7. Чему равно $U_н$ относительно U_2 (по диаграмме)?

8. Почему происходит короткое замыкание в схеме при замыкании одного из диодов?

9. Нарисовать полную схему лабораторной установки и объяснить принцип ее действия. [2]

импульсных трансформаторов. Отличительной чертой блокинг-генераторов является большая скважность генерируемых импульсов, которая практически не может быть получена другими способами. Обычно длительность импульсов блокинг-генератора лежит в пределах от десятых долей микросекунды до десятых долей миллисекунды, а частота следования — от десятков герц до сотен килогерц.

Рассмотрим работу блокинг-генератора с самовозбуждением по одной из самых распространенных схем на транзисторе с общим эмиттером (рис. 7 а).

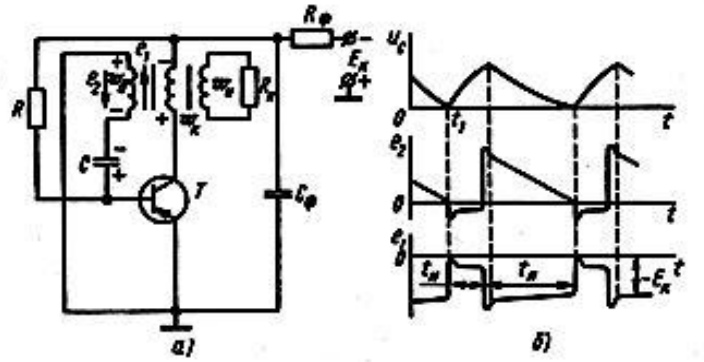


Рис. 7. Схема транзистора с общим эмиттером

В цепь коллектора транзистора включена обмотка импульсного трансформатора $\omega_к$, в цепь базы — обмотка обратной связи между коллектором и базой $\omega_б$. Нагрузка подключена к выходной повышающей обмотке $\omega_н$, что позволяет получить требуемые полярность и амплитуду выходных импульсов. Коллекторная и базовая обмотки включены встречно для обеспечения положительной обратной связи. Частота следования импульсов определяется времязадающей *RC*-цепью, подключенной к базе транзистора.

В качестве исходного примем состояние, при котором транзистор заперт, а конденсатор C, заряженный в предыдущем цикле работы до максимального напряжения, медленно перезаряжается через резистор R и обмотку $\omega_б$. Напряжение на базе положительно и транзистор удерживается в запертом состоянии. Когда в процессе переза-

$$f = \frac{1}{T} = \frac{U_n}{4\omega_1 S B_S},$$

где ω_1 — число витков обмотки II трансформатора;

B_S — индукция насыщения сердечника трансформатора, Тл;

S — сечение сердечника трансформатора, см^2.

В течение всего периода насыщения э. д. с. во всех обмотках трансформатора остается постоянной. Следовательно, и в обмотке *V*, к которой подключена нагрузка, э. д. с. имеет форму прямоугольного импульса (рис. 6).

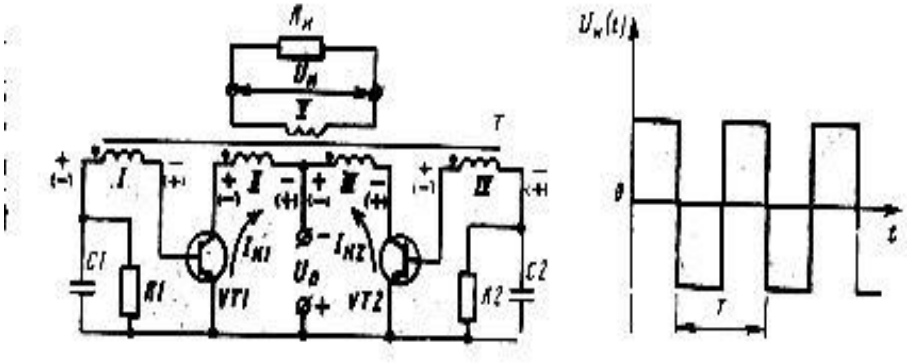


Рис. 6. Электрическая схема и диаграмма напряжения преобразователя Ройера

Частоту переключения транзисторов обычно выбирают в пределах от 300 Гц до 15 кГц. Сопротивления базовых резисторов *R1* и *R2* выбирают в диапазоне 15—150 Ом. Они предназначены для стабилизации работы преобразователя. Емкость конденсаторов *C1* и *C2* выбирают в диапазоне 510—5100 пФ. Они служат для улучшения формы выходного напряжения.

Блокинг-генераторы.

Блокинг-генератором называют однокаскадный генератор с сильной индуктивной обратной связью, служащий для генерирования коротких импульсов, близких по форме к прямоугольным. Обратная связь в блокинг-генераторах осуществляется с помощью специальных

Лабораторная работа № 2. Транзисторный однокаскадный усилитель низкой частоты

2.1 Цель работы

Исследование статических входных и выходных характеристик транзистора и определение по ним характеристических Л-параметров. Применение транзистора в схеме однокаскадного усилителя напряжения, исследование влияния параметров элементов схемы усилительного каскада, выполненного на транзисторе по схеме с общим эмиттером, на его основные характеристики.

2.2 Основные теоретические положения

Транзистор (полупроводниковый триод) представляет собой электронный прибор, основанный на взаимодействии двух расположенных близко друг от друга (на расстоянии нескольких микрометров) электронно-дырочных *p*-*n*-переходов.

Основным элементом транзистора является кристалл германия или кремния, в котором с помощью соответствующих примесей созданы три области (слоя) с различными типами проводимости. В германиевом транзисторе (рис. 1 а) обычно два крайних слоя обладают дырочной проводимостью (*p*-области), а внутренний слой имеет электронную проводимость (n-область), в соответствии с чем такой транзистор называется полупроводниковым триодом типа *p*-*n*-*p*. Условное обозначение транзистора типа *p*-*n*-*p* показано на рис. 1 б. Кремниевые транзисторы чаще изготовляют в виде полупроводниковых триодов типа *n*-*p*-*n,* принципиальная схема и условное изображение которых показаны на рис. 2 а, б. Следует заметить, что принцип действия полупроводниковых транзисторов независимо от их типа один и тот же. Различие состоит лишь в выборе полярности присоединяемых к ним источников питания. Средняя область (слой) транзистора независимо от типа является его базой *Б* или основанием, а крайние — эмиттером *Э* и коллектором *К*. Наличие трех слоев с различной проводимостью обусловливает на границах их раздела два *p*-*n*-перехода, характеризующихся динамическим равновесием. Чтобы вывести *p*-*n*-переход из состояния равновесия, к нему прикладывается внешнее напряжение.

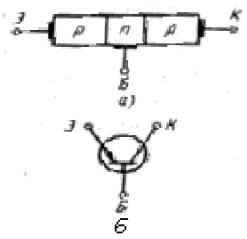


Рис. 1. *p-n-p* тран зистор

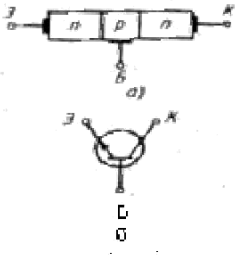


Рис. 2. *n-p-n* транзистор

Схемы включен ия источников питания транзисторов типов *p-n-p* и *n-p -n* показаны на рис. 3 и 4.

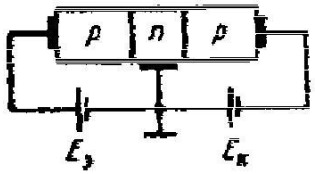


Рис. 3. Схема питания *p-n-p* транзистора

форматор осуществляет положительную обратную связь в схеме и гальванически разделяет выходное напряжение (в виде импульсов прямоугольной формы) с напряжением источника питания U_n . При подаче напряжения питания U_n через транзисторы *VT1* и *VT2* начинают протекать начальные коллекторные токи малой величины. Вследствие не идентичности параметров транзисторов ток одного из них, например, первого, будет больше. Это приведет к появлению нарастающего магнитного потока в сердечнике трансформатора, в обмотках которого наводятся э.д.с., усиливающие исходную разницу. Полярности этих э. д. с. на рис. 6 указаны без скобок. Иными словами, э. д. с., индуцируемая в базовых обмотках *I и IV* трансформатора, такова, что транзистор *VT1* (с большим начальным током) будет открываться, а транзистор *VT2* (с меньшим начальным током) — закрываться. Коллекторный ток $I_{к1}$ первого транзистора, а следовательно, и магнитный поток в сердечнике будут непрерывно нарастать до момента насыщения сердечника (транзистор *VT2* заперт). При этом рост магнитного потока прекращается и э.д.с. во всех обмотках становятся равными нулю. Ток $I_{к1}$ начинает снижаться, вызывая уменьшение магнитного потока. Это приводит к изменению полярностей э. д. с. во всех обмотках на противоположные (на рис. 6 отмечены скобками). Под действием э. д. с., действующих в симметричных базовых обмотках *I* и *IV,* транзистор *VT1* начинает закрываться, а транзистор *VT2* — открываться. Коллекторный ток второго транзистора $I_{к2}$ увеличивается до тех пор, пока не прекратится нарастание магнитного потока в противоположном направлении. Э. д. с. во всех обмотках вновь становятся равными нулю. Ток $I_{к\,2}$ уменьшается, магнитный поток убывает, э. д. с. меняет полярность. Это приводит к закрытию транзистора *VT2* и открытию *VT1* . Процесс повторяется, и транзисторы попеременно проводят ток в симметричные обмотки II и III трансформатора, инвертируя напряжение источника питания U_n и формируя на нагрузке импульсы прямоугольной формы. Частота переключения транзисторов *f* и период колебаний *T* связаны с параметрами устройства и напряжением питания U_n следующей формулой:

но переключается из одного устойчивого состояния в другое, генерируя на своих выходах *Вых.1* и *Вых.2* периодические импульсы прямоугольной формы. Период колебаний T и длительность каждого из двух устойчивых состояний t_1 , и t_2 определяют следующим образом: $t_1 \approx 0{,}7R3C2$; $t_2 \approx 0{,}7R2C1$; $T = t_1 + t_2$.

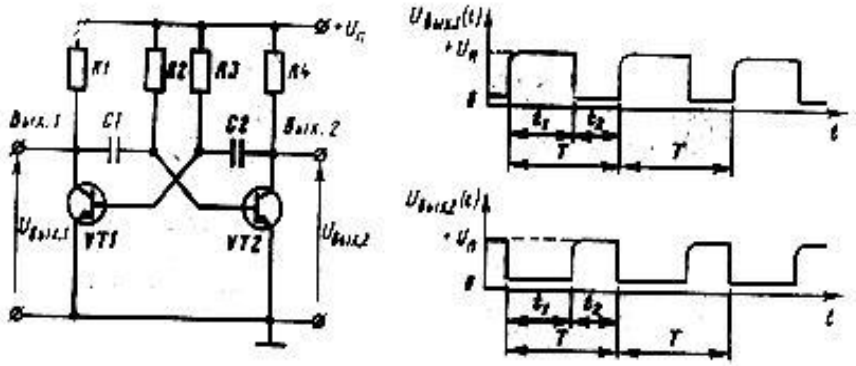


Рис. 5. Электрическая схема и временная диаграмма работы мультивибратора

Если резисторы и конденсаторы в каждом плече схемы мультивибратора выбраны одинаковыми *(R2 = R3, C1 = C2* и *R1 = R4),* то длительности импульсов t_1 и t_2 равны и мультивибратор носит название симметричного. Как правило, период T мультивибраторов на биполярных транзисторах выбирают таким образом, чтобы частота повторения импульсов $f = \frac{1}{T}$ лежала бы в пределах от 100 Гц до 10 кГц. Бесконтактную коммутацию напряжения первичного источника питания и преобразование этого напряжения в периодические импульсы прямоугольной формы можно осуществить с помощью трансформаторного устройства, получившего название преобразователя Ройера. В состав устройства (рис. 6) входят два биполярных транзистора *VT1* и *VT2,* два резистора *R1* и *R2,* два конденсатора *C1* и *C2* и насыщающийся трансформатор *T.* Транзисторы выполняют роль бесконтактных прерывателей и работают в ключевом режиме, транс-

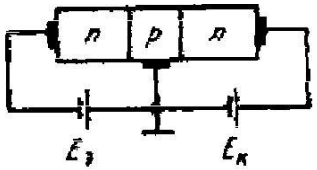


Рис. 4. Схема питания *n-p -n* транзистора

Транзисторы вклю чаются в схему таким образом, чтобы к переходу эмиттер—база внешнее напряжение было приложено в прямом направлении, а к *p-n*-переходу коллектор—база в обратном направлен ии.

При воздействии внешних напряж ений потенциальный барьер между эмиттером и базо й понижается, а между базой и коллектором — увели чивается. В рез ультате основные носители заряда эмиттерно-го слоя переходят в область базы, а затем в область коллектора, соз-давая ток коллекторного перехода.

Одн овременно с эт м происходит и переход основных носителей заряда базы через эмит терный переход. Однако в область базы при изготовл ении транзистора вводят знач ительно меньшее количество атомов примеси, чем в эмиттер, поэто му ток эмиттерного перехода создается главным образом переходом основных носителей эмиттерного слоя. Если время прохождения основных носителей заряда эмиттер а через область базы много меньше времени их независимого существования, то основ ная часть этих носителей доходит до коллекторного перехода и попадает в область коллектора. При этом лишь небольш ая часть указан ных носителей рекомбинирует в области базы с ее осн овными носителями. Таким образом, значение тока в цепи коллект орного (закрытого) перехода зависит от значения тока в цепи эмиттер ного (открытого) перехода. Связь между токам и коллектор-ной и эмиттерной цепей характеризует ся коэффициентом передачи тока

$$\alpha = \frac{I_к}{I_э} \mid U_к = const,$$

где $\Delta I_к$, $\Delta I_э$ — приращения коллекторного и эмиттерного токов.

Коэффициент пере дачи тока транзистора можно в ыразить через мгновенные значения переменных составляющих токов коллекторной и эмитте рной цепей:

$$\alpha = \frac{I_к}{I_э},$$

где $I_к$, $I_э$ — токи в цепях коллектора и эмиттера.

Для плоскостных транзисторов коэффициент передачи тока α = 0,92—0,99. Это означает, что в области базы рекомбинирует соответственно 1—8 % основных носителей заряда эмиттера. Число рекомбинирующих в области базы основных носителей заряда эмиттера определяет ток базы $i_б$. В соответствии с этим $i_б = i_э - i_к$.

Для наиболее распространенной схемы включения транзистора — с общим эмиттером, коэффициент его усиления можно выразить через α так:

$$B = h_{12} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Тогда для $\alpha = 0{,}99$, $\beta \approx 100$.

В справочниках приводят значения для $h_{12э}$. Это общепринятое обозначение коэффициента усиления транзистора.

Основными характеристиками транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, являются статическая входная характеристика $I_б(U_б)$ при $U_к = const$ (рис. 5) и статическая выходная $I_к(U_к)$ при $I_б = const$ (рис. 6).

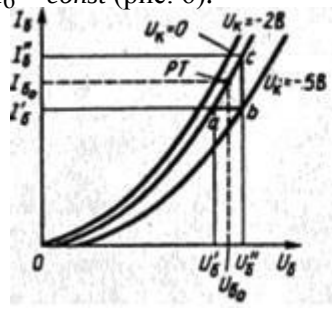


Рис. 5. Входная ВАХ

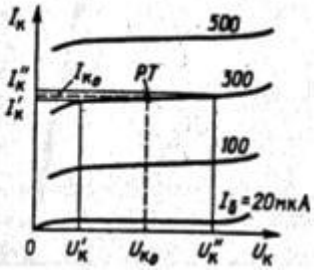


Рис. 6. Выходная ВАХ

Входная характеристика определяет зависимость тока базы от напряжения на базе при неизменном напряжении на коллекторе. В рассматриваемой схеме к эмиттерному переходу транзистора приложено прямое напряжение, поэтому при напряжении на коллекторе $U_к = 0$ входная характеристика соответствует прямой ветви вольтам-

называется режимом насыщения. Он реализуется при положительных потенциалах на базе. При этом базовый переход смещен в прямом направлении, его сопротивление мало и ток базы $I_б \approx U_{вх} / R1$. Коллекторный переход транзистора характеризуется малым остаточным напряжением $U_к = U^0 \approx 0$, а ток коллектора максимален: $I_к \approx \frac{U}{R2^n}$. Мощность, рассеиваемая в транзисторе, при его работе в режиме ключа невелика, так как в режиме отсечки близок к нулю ток коллектора, а в режиме насыщения — напряжение. В обоих случаях $P_к$, равная $U_к I_к$, оказывается близкой к нулю.

Схемы с транзисторными ключами стараются составлять таким образом, чтобы переход транзистора из одного состояния в другое проходил за минимально возможное время. Иначе говоря, длительность фронта $t_Ф$ и длительность среза $t_с$ импульса переключения транзистора (см. рис. 2) должны быть как можно меньше. Это обеспечивает дополнительную экономию и уменьшение потерь энергии в самом транзисторном ключе. Примерно так же поступают при конструировании обычных бытовых выключателей. С одной стороны, сопротивление контактов стараются делать по возможности малым, чтобы исключить нагрев самого выключателя при включенном состоянии прибора — электроплитки, утюга, лампочки и т. д. С другой стороны, за счет специальной конструкции и наличия пружин процесс включения и выключения электроприбора осуществляется «щелчком»; что уменьшает время переключения.

Такой ключ называют инвертором. Повышению входного напряжения (потенциала базы) соответствует понижение выходного напряжения (потенциала коллектора), и наоборот.

Мультивибратор и преобразователь Ройера.

Если в схеме одновибратора, приведенной на рис. 3, резистор обратной связи *R4* заменить на конденсатор, а резистор входной цепи *R2* замкнуть свободным концом на шину питания « $+ U_n$ », то полученная таким образом схема (рис. 5) в отличие от одновибратора будет обладать уже двумя стабильными состояниями. Для того чтобы подчеркнуть это свойство схемы, ее назвали мультивибратором. Каждое стабильное состояние мультивибратора сохраняется в течение строго определенного интервала времени. Мультивибратор постоян-

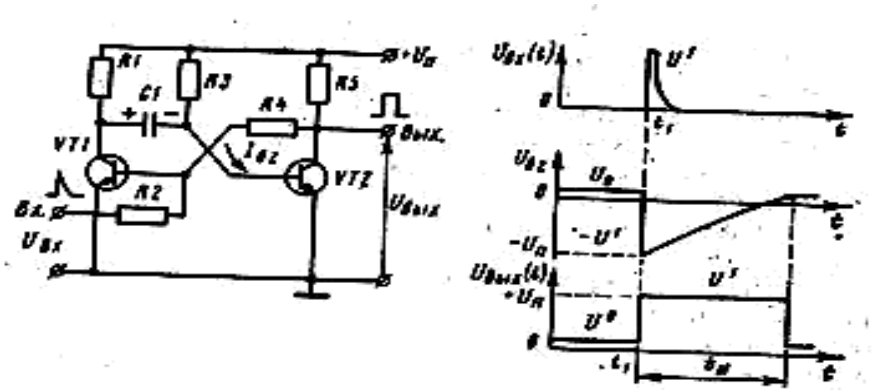


Рис. 3. Электрическая схема и временная диаграмма работы одновибратора

Отметим одну существенную особенность работы транзисторов *VT1* и *VT2* в схеме одновибратора. Транзисторы при работе устройст-ва или полностью открыты, или полностью закрыты. Переход из од-ного состояния в другое происходит скачком. Такой режим работы транзистора называется ключевым; схемы, в которых транзистор используется в режиме ключа, положены в основу всех современных цифровых вычислительных устройств и управляющих машин.

Режим работы транзистора (рис. 4) характеризуется всего двумя состояниями. Одно состояние определяется точкой *B* и носит название режима отсечки. В этом режиме коллекторное напряжение

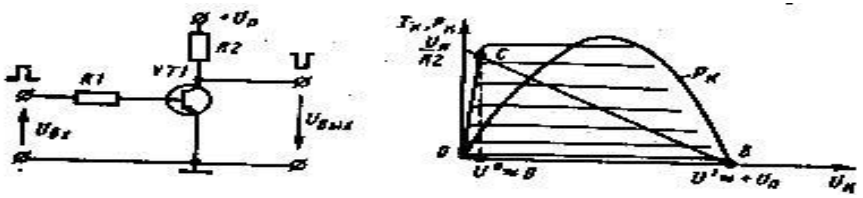


Рис. 4. Схема и характеристика работы ключа на биполярном транзисторе

$U_к = U^1 \approx U_n$, ток базы $I_б = 0$, ток коллектора $I_к \approx 0$. Режим отсечки реализуется при отрицательных или близких к нулю потенциалах на базе транзистора. Другое состояние определяется точкой *C* и

перной характеристики полупроводнико вого *p-n*-перехо да. При этом увеличе ние отрицательн ого напряжени я на коллекторе смещает характери тику вправо, что соответствует уменьшению т ока базы. Это объясня ется тем, что чем больше отрицательное напря жение на коллекторе, тем меньше ш ирина слоя баз ы. Уменьшение же ширины приводит к уменьшени ю рекомбинаций в ней, а, следовательно, и к уменьше нию тока базы.

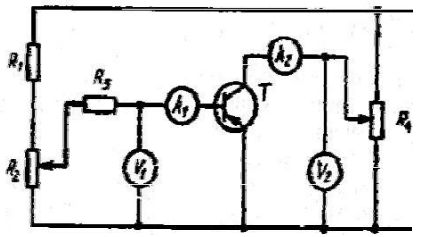
2.3 Задание по работе

1. Снять семейство статических в ходных и выходных характеристик транзистора типа *p-n-p*, включенного по схеме с общим эмиттером, и определить по н им характеристические Л-парам етры.
2. Исследовать вл ияние параметр ов элементов усилительного каскада, выполненного на транзисторе п о схеме с общим эмиттером, на его а мплитудно-часто тную характеристику.
3. Составить кратк ие выводы по ра боте.

2.4 Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с установкой дл я снятия статич еских характеристи к транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Записат тип и паспорт ные данные иссл едуемого транзистора, а также техн ические данные используемых в работе измерительных приборов.
2. Снять входную статическую характеристику транзистора $I_б(U_б)$ пр и $U_{кэ} = const$. Для этого:

а) подвести к схе ме напряжение U = 12 В от стабилизированного источника постоян ного напряжения (рис. 7);



-12 В

+12 В

Рис. 7. Входные характеристики транзистора

б) потенциометром *R*4 установить на коллекторе транзистора напряжение $U_{кэ} = U_к = 0$ и в процессе снятия характеристики поддерживать его неизменным;

в) изменяя потенциометром R2 напряжение в цепи базы $U_{бэ} = U_б$ от нуля, установить ток в цепи базы равным значению, ука-занному в паспортных данных транзистора. Затем, уменьшая напря-жение на базе транзистора, произвести пять измерений тока базы $I_б$ и соответствующего ему напряжения $U_б$. Результаты измерений нанес-ти на график $I_б(U_б)$ при $U_к = const$;

г) повторить опыт при другом, заданном преподавателем, значении напряжения на коллекторе.

3.Снять выходную статическую характеристику транзистора $I_k(U_к)$ при $I_б = const$. Для этого:

а) с помощью потенциометра *R*2 в цепи базы транзистора установить ток базы заданного значения;

б) изменяя напряжение $U_к$ потенциометром *R*4 в цепи коллектора от нулевого значения до 15 В, измерить ток коллектора $I_к$ транзистора. Провести измерения тока коллектора при пяти различных значениях напряжения $U_к$. Результаты измерений нанести на график $I_к(U_к)$ при $U_б = const$;

в) провести аналогичные измерения при двух других значениях тока базы; перед каждым измерением необходимо подрегулировать ток базы транзистора (значения тока базы, при которых снимаются выходные характеристики, задаются преподавателем).

4. Ознакомиться с однокаскадным усилителем напряжения, схема которого приведена на рис. 8 и собрана на рабочей панели лабораторного стенда, и провести исследование влияния параметров элементов усилительного каскада, выполненного на транзисторе по схеме с общим эмиттером, на его амплитудно-частотную характеристику *K*(*f*); для этого к исследуемому усилителю подключить:

а) источник входного сигнала — звуковой генератор (ЗГ);

б) цифровой вольтметр $V_{вх}$ для измерения напряжения входно-го сигнала;

в) цифровой вольтметр $V_{вых}$ для измерения напряжения выходного сигнала;

В исходном установившемся состоянии (рис. 3) ток через конденсатор *C1* не протекает, поэтому транзистор *VT2* базовым током $I_{б2}$ будет полностью открыт, а *VT1* заперт. На диаграмме это состояние соответствует интервалу времени $0 - t_1$, Малое остаточное падение напряжения между эмиттером и коллектором открытого (насыщенного) транзистора *VT2* обозначено через U^0 . Это напряжение называется напряжением логического нуля; оно подается на выходной зажим схемы и одновременно через резистор *R4* на базу транзистора *VT1*, запирая его.

Конденсатор *C1* в исходном состоянии заряжен до напряжения, близкого по значению к напряжению питания U_n , которое называют напряжением логической единицы и обозначают через U^1.

Предположим, что в момент t_1 на входные зажимы схемы и на базу транзистора *VT1* кратковременно поступает импульс напряжения с амплитудой U^1 (см. диаграмму на рис. 3). Транзистор *VT1* отпирается и соединяет левую обкладку конденсатора *C1* с эмиттером *VT2*. Потенциал база — эмиттер транзистора *VT2* скачком изменяется до отрицательного напряжения логической единицы. Транзистор *VT2* запирается и через резисторы *R5* и *R4* поддерживает транзистор *VT1* в открытом состоянии, даже если входное напряжение станет равным нулю, т. е. в момент времени t_1 напряжение на выходе схемы скачком изменяется до напряжения логической единицы U^1 и за счет положительной обратной связи поддерживается на этом уровне.

С момента времени t_1 конденсатор *C1*, подключенный через резистор *R3* к зажиму $+ U_n$, начинает перезаряжаться. Потенциал базы транзистора *VT2* также будет линейно изменяться во времени. Транзистор *VT2* будет заперт до тех пор, пока потенциал базы *VT2* не достигнет напряжения, приблизительно равного $U°$. По истечении этого периода транзистор *VT2* откроется и схема опрокинется в исходное состояние. Длительность выходного импульса, равная времени перезарядки конденсатора *C1* $t_u \approx 0{,}7$ *C1R3*.

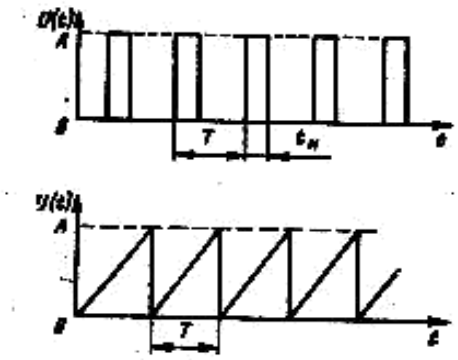


Рис. 1. Прямоугольная и пилообразная формы периодических импульсов

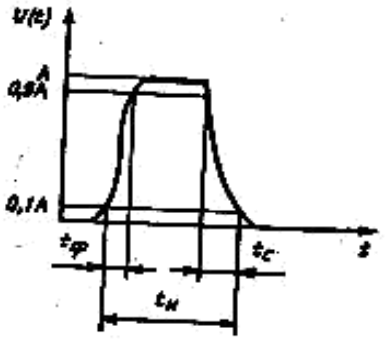


Рис. 2. Форма реального импульса

Однако в простейших случаях к такого рода преобразованиям можно не прибегать и использовать генераторы несинусоидальных колебаний. Генераторы импульсов прямоугольной формы получили наибольшее распространение Вырабатываемые ими импульсы всегда отличаются от идеальных, что выражается обычно в замедлении их нарастания и убывания. Реальные импульсы (рис. 2) характеризуются следующими основными параметрами: амплитудой А; длительностью t_u , обычно определяемой на уровне 0,1 А; длительностью фронта импульса $t_ф$, т. е. временем нарастания импульса от 0,1 до 0,9 А; длительностью среза импульса t_c , т. е. временем убывания импульса от 0,9 до 0,1 А. Использование этих параметров обусловлено тем, что никакие реальные процессы включения и выключения электрических сигналов не могут происходить мгновенно.

Устройство и принцип работы одновибратора.

Одновибратором называется электронное устройство, которое при воздействии на его вход короткого запускающего импульса вырабатывает на выходе импульс прямоугольной формы заданной длительности. Другими словами, запускающий импульс «включает» одновибратор, который затем, по истечении определенного времени, автоматически «выключается» сам. В связи с этим одновибраторы часто называют еще электронными реле выдержки времени.

г) источник питания усилителя — источник стабилизированного постоянного напряжения с уровнем U = 12 В. Обратить внимание на то , чтобы выводы «земля» всех подключенных к усилителю приборов были соединены между собой и подключены к выводу «земля» стенда;

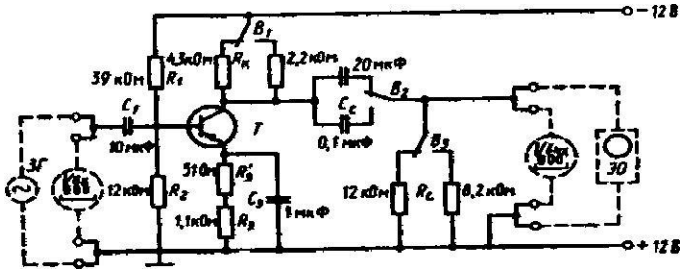


Рис. 8. Однокаскадный усилитель напряжения

д) переключателями на панели установить параметры элементов схемы усилителя по варианту I табл. 1

Таблица 1. Параметры элементов схемы усилительного каскада

Номера вариантов	Параметры элементов схемы усилительного каскада		
	$R_К$, кОм	$R_С$, кОм	$C_С$, мкФ
I	4,3	12,0	20,0
II	2,2	12,0	20,0
III	4,3	12,0	0,1
IV	4,3	8,2	20,0

е) включить напряжение питания измерительных приборов, звукового генератора и усилительного каскада; снять и построить амплитудно-частотную характеристику $K_u(f)$ усилительного каскада для диапазона частот 200—200000 Гц, поддерживая при этом напряжение входного сигнала неизменным и равным $U_{вх}$ = 5 мВ (замеры провести на частотах: 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000, 50000, 100000, 200000 Гц). При построении амплитудно-частотной характеристики $K_u(f)$ по оси ординат откладывается коэффициент усиления по напряжению $K_u = U_{вых}/U_{вх}$, а по оси абсцисс — частота входного сигнала в логарифмическом масштабе;

ж) снять и построить аналогичные характеристики при других значениях параметров элементов усилителя в соответствии с вариантами II, III, IV табл. 1.

5. Снять и построить амплитудную характеристику $C_{вых}(C_{вх})$ усилительного каскада, собранного по варианту I на частоте = 1 кГц, изменяя $£_{вх}$ от нулевого значения до значения, при котором наблюдается заметное искажение формы выходного сигнала. Зарисовать на кальку с экрана осциллографа, включенного на выход усилителя, осциллограммы выходного напряжения для линейного и нелинейного участков характеристики.

6. Провести обработку результатов опытов:

а) по входным характеристикам, полученным при выполнении опыта по п. 2, определить характеристические h_{11} — параметры тран-зистора (h_{11} — входное сопротивление, h_{12} — коэффициент внутрен-ней обратной связи), для этого на характеристиках построить харак-теристический треугольник;

б) по выходным характеристикам (п. 3) определить параметры h_{21} — коэффициент усиления по току и h_{22} — выходную проводи-мость транзистора; характеристические треугольники строить на ли-нейных участках характеристик;

в) по одной из амплитудно-частотных характеристик (п. 4) определить полосу пропускания усилителя ($f_н$—$f_в$);

г) по амплитудной характеристике $U_{вых}(U_{вх})$ определить коэффициент усиления по напряжению Ки на линейном участке характеристики и сравнить его с коэффициентом усиления, полученным по амплитудно-частотной характеристике;

д) по амплитудной характеристике определить динамический диапазон работы усилителя.

2.5 Вопросы для самопроверки

1. Назовите типы транзисторов.
2. Нарисуйте схемы включения транзисторов.
3. Установите взаимосвязь между токами эмиттера, коллектора и базы транзистора.
4. Приведите семейство входных и выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с общей базой.

Лабораторная работа № 4. Импульсные генераторы на транзисторах и ИМС (Мультивибраторы и блокинг-генераторы)

4.1 Цель работы

Ознакомление со схемами релаксационных генераторов в автоколебательном и ждущем режимах работы. Исследования влияния параметров схем на их выходные характеристики.

4.2 Основные теоретические положения

Параметры импульсных сигналов.

В ряде случаев возникает необходимость в получении периодической последовательности сигналов, форма которых отличалась бы от синусоидальной. Например, при передаче и приеме кодовых сигналов для осуществления тактовой синхронизации используется периодическая последовательность импульсов прямоугольной формы (рис. 1), а для осуществления строчной развертки в телевизорах (и в любых видеотерминальных устройствах) — последовательность импульсов пилообразной формы.

В любой периодической последовательности импульсы следуют с периодом T, которому соответствует частота повторения $F = \frac{1}{T}$. Сами импульсы характеризуются амплитудой А, импульсы прямоугольной формы — длительностью $t_и$ или скважностью $q = \frac{T}{t_и}$.

Преобразованием гармонических синусоидальных колебаний с помощью специальных формирователей могут быть получены импульсы достаточно сложной формы.

5. Зачем необходим второй источник питания в ключевых схемах и почему он не всегда указывается, так же как и некоторые элементы, присоединенные к нему и к базе транзистора?

6. Пояснить работу электромеханического реле.

7. Почему напряжение на транзисторе в отсечке не равно питающему, а в насыщении — нулю?

5. Как по статическим характеристикам транзистора определить коэффициент усиления по току K, в схеме с общим эмиттером?

6. Укажите преимущества схемы включения транзистора с общим эмиттером по сравнению со схемой с общей базой.

7. Нарисуйте типовую схему усилительного каскада с общим эмиттером.

8. Поясните, как влияет увеличение сопротивления резистора $R_{\text{х}}$ на коэффициент усиления усилительного каскада с общим эмиттером.

9. Поясните назначение делителя напряжения R_1—R_2 в схеме усилительного каскада с общим эмиттером.

10. Поясните назначение цепи $R_{\text{э}}$—$C_{\text{э}}$ в усилительном каскаде с общим эмиттером.[2]

Лабораторная работа № 3. Переключающие устройства релейного действия. Логические элементы «НЕ» и «ПАМЯТЬ»

3.1 Цель работы

Ознакомление с основами цифровой и релейной электроники. Исследования характеристик транзисторного ключа, логических элементов, и электромеханического реле.

3.2 Основные теоретические положения:

Транзисторный ключ. Цифровые электронные устройства можно построить на диодах, транзисторах, ферромагнитных элементах и т. д. В настоящее время широко применяются транзисторные цифровые устройства. В них транзисторы работают в ключевом режиме.

В транзисторном ключе, изображенном на (рис. 1 а), биполярный транзистор включен по схеме с общим эмиттером. На вход ключа поступает входной сигнал $U_{вх}$, выходной сигнал $U_{вых}$ снимается с коллектора транзистора.

Схема транзисторного ключа (*а*), выходные характеристики транзистора (*б*) и зависимость $U_{к.э} = f(i_б)$ в транзисторном ключе *(в).* Из контура источника питания E— $R_к$ —коллектор—эмиттер *VT*

$$U_{вых} = U_{к.э} = E - i_к R_к . \qquad (1)$$

В то же время в соответствии с выходными характеристиками транзистора (рис. 1 *б)* $U_{к.э}$ зависит от тока коллектора $i_к$ и базы $i_б$. Точки пересечения выходных характеристик и линии *AB*, построенной по уравнению (1), позволяют определить зависимость $U_{вых}$ от $i_б$. При $i_б = 0$ транзистор находится в состоянии «отсечки»: транзистор закрыт, ток $i_к = 0$, $U_{вых} = U_{к.э} \approx E$ (точка *A* на рис. 1 *б, в).* При увеличении $i_б$ увеличивается $i_к$ и уменьшается $U_{к.э}$. При $i_б = i_{б4}$ транзистор находится в состоянии «насыщения»: транзистор полностью открыт, ток $i_к$ максимален, напряжение $U_{к.э}$ имеет наименьшее значе-

	$U_{к1}$	$U_{к2}$	$U_{Rк1}$	U_{Rb1}
SB1 отжата (режим отсечки)	6,52	0,19	5,46	0
SB1 нажата (режим насыщения)	0,18	10,64	11,8	11,1

Схема логического элемента «Память» (триггер). Исследовать ее работу , нажимая кнопки *SB1* и *SB2*. Записать порядок действия оператора и состояние 4-х транзисторных ключей (*VT1—VT4*). Составить таблицу состояния транзисторов (выходов 1—4) при действии входов 1 и 2 (*SB1* и *SB2*).

Таблица 2. Состояния транзистора

Состояние кнопок	Состояние входов	*CD1*	*CD2*	*CD3*	*CD4*
SB1 отжата	ВХ 1 «0»	+/–	–	–	+
SB1 нажата	ВХ 1 «1»	+	–	–	+
SB2 отжата	ВХ 2 «0»	–	+/–	+	–
*SB2*нажата	ВХ 2 «1»	–	+	+	–

Нажатием кнопок «ПУСК» и «СТОП» убедиться в правильности работы элементов НЕ и ПАМЯТЬ.

Измерить напряжение на открытом (насыщенном и закрытом транзисторе). Уяснить, почему на закрытом транзисторе напряжение меньше питающего

На платах с реле и электродвигателем проследить за их работой при нажатии кнопок ПУСК и СТОП.

3.5 Вопросы для самопроверки

1. Показать на примере приближенный расчет транзисторного ключа (для заданной нагрузки — $U_н R_н$ или $I_н R_н$).
2. Зачем нужен коэффициент запаса для тока базы в ключе на транзисторе?
3. Пояснить назначение диода VD_3 и резистора R_6 в схеме.
4. Почему триггерной схеме можно дать название элемент «Память»?

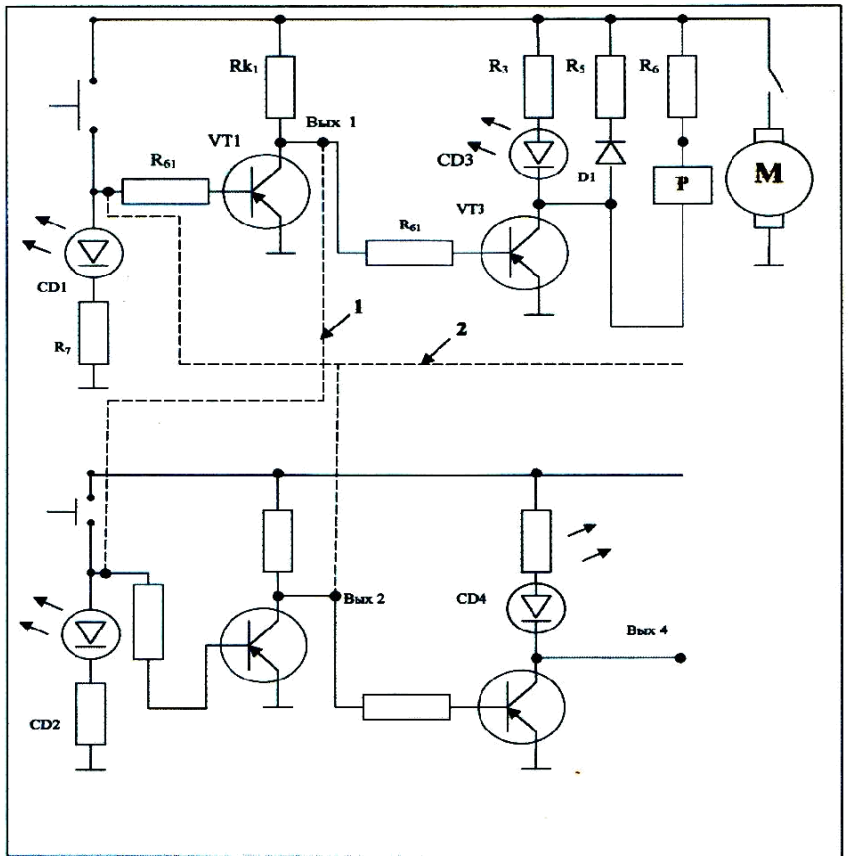


Рис. 1. Принципиальная схема элемента «ПАМЯТЬ» на 2- х элементах «НЕ»

1.Исследовать работу каскада на транзисторе *VT 1*.

1.1. Измерить напряжение $U_{кэ1}$ при отжатой и нажатой кнопк е *SB1*.

1.2. Измерить $U_{Rк}$ и $U_{Rб}$ в этих режимах.

1.3. Измерить U_{RD1}.

Измерение напр яжения при отжа той и нажатой кнопке *SB1*.

Таблица 1

ние (точка *B* на рис. 1 б, *в)*. При $i_б > i_{б4}$ ток $i_к$ и напряжение $U_{к.э}$ не изменяются. Таким образом, состояние транзистора зависит от $i_б$, а $i_б$ в свою очередь — от входного напряжения $U_{вх}$.

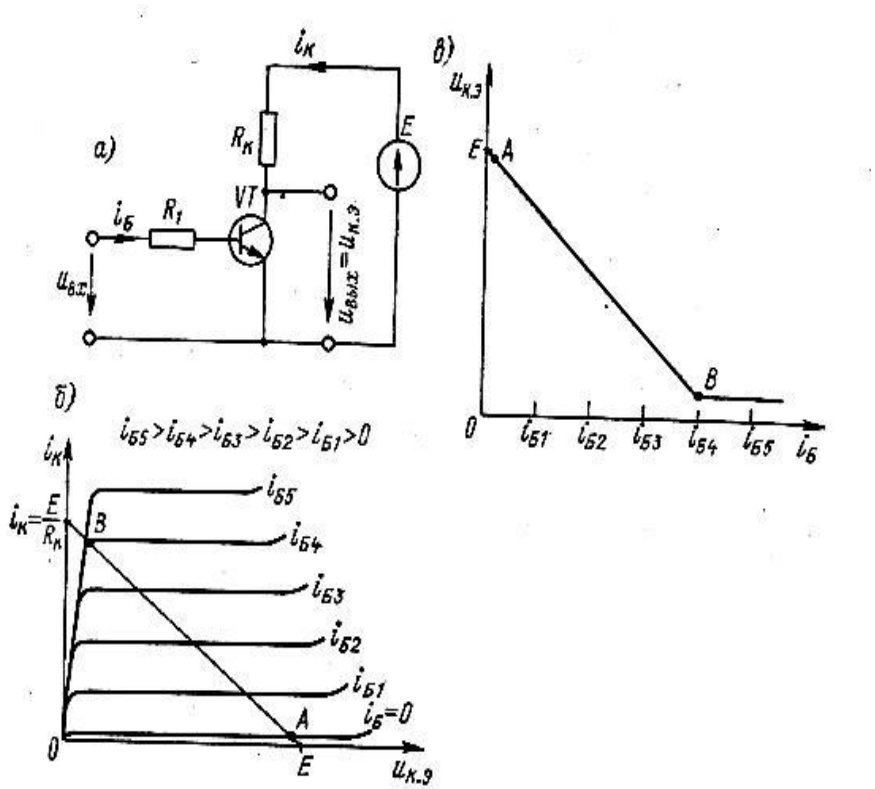


Рис. 1. а) транзисторный ключ; б) выходные характеристики транзистора; в) зависимость $U_{к.э.}$ от тока базы

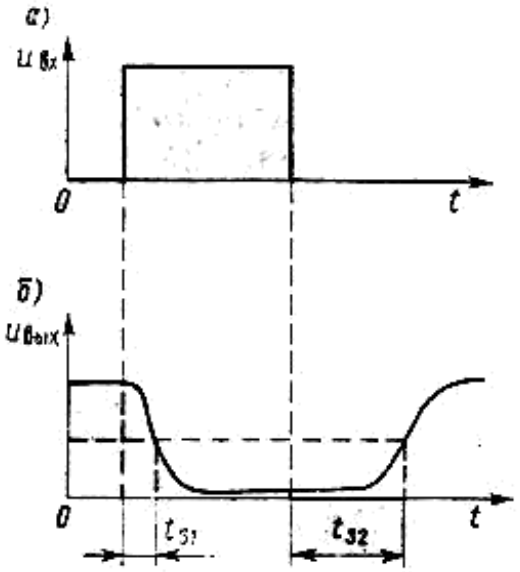


Рис. 2. Входной (*а*) и выходной *(б)* сигналы транзисторного ключа

Сигнал на входе ключа $U_{вх}$ может иметь два уровня напряжения: низкий — логический «0» и высокий — логическая «1». Параметры транзисторного ключа выбирают так, чтобы при подаче на вход сигнала «0» ($i_б \approx 0$) транзистор находился в состоянии «отсечки» и $U_{вых}$ соответствовало логической «1», а при подаче на вход «1» ($i_б \geq i_{б4}$) транзистор находился в состоянии «насыщения» и $U_{вых}$ соответствовало логическому «0».

Важным параметром транзисторных ключей является быстродействие, определяющее скорость обработки информации в цифровых устройствах. Быстродействие транзисторных ключей оценивается временем задержки выходного сигнала $U_{вых}$ относительно входного $U_{вх}$ (рис. 2). Причем время задержки по переднему фронту сигнала t_{31} и по заднему фронту сигнала t_{32} различно. Для транзисторных ключей оно составляет от единиц до сотых долей микросекунды.

пирается, т. к. кн «ПУСК» разомкнута. Естественно, что такая схема очень востребована во многих устройствах автоматического управления, защиты и т.п.

Также приведена схема управления и защиты электродвигателя. В исходном состоянии (кн. «ПУСК» и «СТОП» разомкнуты, ключ К замкнут) транзисторы *VT1* закрыт, а *VT2* — открыт, *VT3* – закрыт. При нажатии кн. «ПУСК» состояние транзисторов меняется на об-ратное и по обмотке реле о.р. начинает протекать ток. При этом маг-нитный поток в его сердечниках притягивает подвижной поворотный якорь. Пластина с контактами, прикрепленная к нему приходит в движение. Контакты замыкаются К(НР) замыкаются, к электродвига-телю прикладывается напряжение питания и двигатель начинает ра-ботать (вращается вал). Во избежание пробоя коллекторного перехода *VT* при замыкании кн. «СТОП» из-за наличия запасенной энергии в индуктивности катушки о.р. при протекании тока. $W_{эм} = (LI^2)/2$ присоединяется цепь, состоящая из диода *VD* и резистора R_g. При этом ток катушки реле о.р. переходит из разомкнутой коллекторной цепи в цепь *VD*-R_g. Энергия $W_{эм}$. Рассеивается в резисторе, а напряжение на коллекторном переходе ограничивается падением напряжения на R_g (а оно невелико, ибо R_g — мелко)

Состав схемы.

1. Два транзисторных ключа с запускающими кнопками.
2. Два ключевых усилителя на транзисторах *VT3* и *VT4*.
3. Реле, обмотка которого включена в коллекторную цепь транзистора *VT3* через добавочный резистор R_6.
4. Нагрузка (электродвигатель, подключенный контактами реле).

2. Ознакомиться со схемой двухкаскадной ключевого усилителя с положительной обратной связью. Зарисовать схемы.

3. Установить питание $U_{\text{пит}} = 12$ В .

4. Подать на клеммы $U_{\text{пит}} = 12$ В .

5. Убедиться, что транзисторы VT_1 и VT_2 работают в ключевом режиме. Записать в таблицу соответствия величины $U\kappa_{\text{нас}}$ и $U\kappa_{\text{отс}}$.

6. Подключить к выходу ☺ триггера усилитель на транзисторе VT_3 .

7. Проверить его работоспособность, то есть измерить $Uk_{\text{э}}$ при насыщении и отсечке (см. п. 9).

8. Проверить работу реле, повышая напряжение питания до его срабатывания.

9. Подключить к контактам реле электролампу и электродвигатель.

10. Для выбора параметров усилителя на VT_3 воспользоваться данным реле (на катушке).

11. Записать данные опытов.

3.4 Практическая часть

Ознакомиться со схемой лабораторного стенда. На рис. 1 приведена схема стенда с 2-мя инверторами «НЕ». Для создания элемента «ПАМЯТЬ» предусмотрены перемычки, создающие межкаскадную связь между *VT1* и *VT2* (резистор $R_{\text{Б2}}$) и положительную обратную связь (с коллектора *VT2* на базу *VT1*). Это резистор $R_{\text{о.с.}}$ Для упрощения монтажа эти резисторы объединены с пусковыми (в схемах триггеров они раздельные).

Без перемычек П1 и П2 инверторы «НЕ1» и «НЕ2» работают от кнопок кн. «ПУСК» и кн. «СТОП» автономно. При замыкании П1 и П2 мы получим элемент «ПАМЯТЬ». Здесь при нажатии кн. «ПУСК» *VT1* — открыт, *CD1* — светится, *VT2* — закрыт, ибо напряжение на его базе равно 0 (точнее 0,2—0,5 В) — это напряжение на открытом, насыщенном коллекторном переходе *VT1*. Такое состояние схемы может сохраняться сколь угодно долго, до момента замыкания кн. «СТОП». При этом отпирается *VT2*. напряжение на его коллекторе становится равным 0 (опять же более точно 0,2—0,5 В) и *VT1* — за-

Бесконтактные устройства релейного действия.

Переключающие устройства служат для приведения в действие (включения и выключения) различных исполнительных механизмов, осуществления коммутации в электрических цепях, построения логических блоков и вычислительных систем. Все переключающие устройства характеризуются двумя состояниями: включенным и выключенным. Первое из этих состояний условились именовать состоянием логической единицы (логическая 1), второе — состоянием логического нуля (логический 0). Во включенном состоянии переключающее устройство должно обеспечивать беспрепятственное протекание электрического тока от источника питания к нагрузке, в выключенном состоянии — исключать его протекание.

Включение и выключение самих переключающих устройств осуществляется воздействием, также характеризующимся всего двумя состояниями, или уровнями. Если входное воздействие ниже некоторого определенного уровня, переключающее устройство остается во включенном состоянии. Если же входное воздействие превышает некоторый порог, именуемый порогом срабатывания, переключающее устройство выключается. По этой причине входные воздействия переключающих устройств также характеризуются всего двумя уровнями: логический 0 и логическая 1.

В качестве примера переключающих устройств можно привести разнообразные электромагнитные реле, всевозможные кнопки, транзисторные ключи, тиристорные коммутаторы и т. д. Все эти устройства работают по одному и тому же принципу. Для приведения их в действие нужно преодолеть некоторый пороговый уровень, от чего и происходит смена исходного состояния. В частности, если к обмотке реле приложить напряжение, которое превышает напряжение срабатывания, реле возбуждается и замыкает свои фронтовые контакты (тыловые контакты при этом размыкаются). Аналогичным образом работают кнопка, транзисторный ключ и тиристор, с той лишь разницей, что для включения и выключения кнопки нужно приложить определенное усилие, а для включения транзисторного ключа требуется определенное значение тока в цепи базы.

На основе переключающих устройств можно осуществлять как простейшие логические операции, так и сложнейшие математические вычисления. Получившие в последнее время достаточно широкое распространение мини- и микроЭВМ, персональные компьютеры и

другая вычислительная техника в ка честве основног о исходного элемента используют транзисторный кл юч. На рис. 3 показано, как одна и та же логическая ф ункция *И* може т быть реализована с помощью различных переключающих устройств. На практике такие функции испол ьзуют во всех тех случаях, к огда интересую тся совпадением двух или более собы тий или каких-то условий. Например, нужно со-ставить схему, решающую логическую задачу автоматического от-правл ения поезда метрополитена со станции. Поезд может быть от - правл ен при выполнении двух услови й: двери поезда закрыты, на вы-ходн ом светофоре — зеленый огонь . Релейная схем а, реализующая эти условия, приведена на рис. 3 *а.* При замыкании фронтовых кон-тактов реле закрыти я дверей *Д* и сигнального реле зеленого огня *З* возбуждается реле хода *Х* и своими ф ронтовыми контактами замыка-ет це пь управления в ключения тяговы х двигателей в режим *Ход.*

Подобным образом функциони рует и бесконта ктное переключающ ее устройство, приведенное на рис. 3 *б.* Устройство представля-ет собой двухвходовой инвертор, и спользующий т ранзистор *VT1* в режиме ключа. На п ервый вход инве ртора подается логический сиг-нал 1, который формируется схемой контроля закрытия дверей поез-да, н а второй вход — логический си гнал 1 наличия зеленого огня на выхо дном светофоре. Логическую операцию *И* осуще ствляет диодная часть схемы *(VD1, V D2, R1).* Для свя зи этой части схемы с инверто-ром служит стабили трон *VD3,* который совместно с резистором *R2* обесп ечивает надежн ое запирание т ранзистора при невысоком, но поло жительном потенциале точки *А*, соответствующ ем логическому нулю элемента *И*. Условимся при этом сигналом логи ческой единицы считать потенциал, б лизкий к напряжению источника питания $+U_п$.

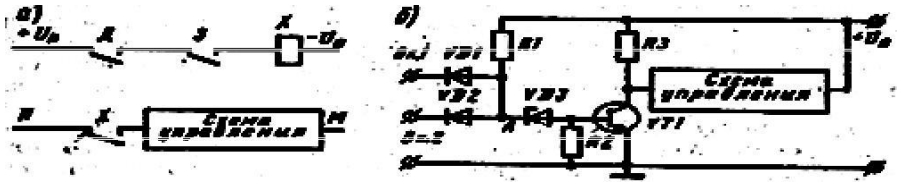


Рис. 3. Реализация лог ической функции *И* с помощью реле (*а*) и с помощью двухвходового и нвертора (*б*)

Если двери поезда открыты и на выходном светофоре отсутствует разрешающее показание, на соответствующих входах устройства *Вх.1* и *Вх.2* присутствуют сигналы логического нуля. Транзисторный ключ при этом заперт, вследствие того что электрический ток не мо-жет проходить через его базовый вывод и протекает от «плюса» ис-точника питания через резистор *R1* и включенные в прямом направ-лении диоды *VD1* и *VD2* на общую точку схемы. Через стабилитрон *VD3* и переход база—эмиттер транзистора ток не протекает, так как открытые диоды *VD1* и *VD2* представляют для него значительно меньшее сопротивление. Схема управления двигателями при этом отключена от питания. Присутствие логической единицы только на входе *Вх.1* или только на входе *Вх.2* ничего не меняет, ключ остается
в закрытом состоянии ввиду того, что ток по-прежнему протекает через один из двух открытых диодов *VD1* или *VD2.* Только при наличии сигнала логической единицы на обоих входах (когда одновременно закрыты двери и горит зеленый огонь) ток пройдет через резистор *R1,* стабилитрон *VD3* и переход база—эмиттер ключа *VT1.* Сопротивление резистора *R1* и тип стабилитрона *VD3* подбирают таким образом, чтобы протекающий через транзистор базовый ток обеспечил его надежное отпирание. Таким образом, ключ *VT1* отпирается, подключая схему управления тяговых двигателей к источнику питания.

Возможна реализация и других, более сложных логических зависимостей, также требующая использования переключающих устройств. В настоящее время эти зависимости в подавляющем числе случаев реализуют с помощью бесконтактных полупроводниковых устройств и схем. Реле используют только тогда, когда на логические зависимости накладывают высокие требования по безопасности их исполнения.

На основе этих схем можно создавать триггеры. Триггером называется переключающее устройство, обладающее двумя устойчивыми состояниями и способное скачком переключаться из одного состояния в другое под действием внешнего управляющего сигнала.

3.3 Методические указания

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, используемым при выполнении работы.