

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОУ ВПО «ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА «УПРАВЛЯЮЩИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»

ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания к лабораторным работам

Направления: 140400 – Электроэнергетика и электротехника
 230100 – Информатика и вычислительная техника
Специальности: 140604 – Электропривод и автоматика
 промышленных установок и технологических комплексов
 230101 – Вычислительные машины, комплексы,
 системы и сети

Вологда, 2010

Электроника. Методические указания к лабораторным работам.- Вологда, ВоГТУ, 2010.- 31 с.

Описано 6 лабораторных работ по курсу «Электроника». Работы предусматривают расчет схем на полупроводниковых приборах и моделирование в пакете Electronics Workbench.

Для студентов направлений 140400 и 230100, специальностей 140604 и 230101

Утверждено редакционно-издательским советом ВоГТУ
Составитель А.М.Водовозов, к.т.н., доцент,
Рецензент Сердюков Н.А., зав. кафедрой АВТ

ВВЕДЕНИЕ

Электроника – одна из наиболее бурно развивающихся наук, в значительной степени определяет современное состояние техники. Именно благодаря её развитию стремительно меняются машиностроение, вычислительная техника, автоматика. Электронные схемы общего назначения являются разновидностью электрических схем, методика расчета которых имеет свои особенности, обусловленные нелинейностью и, иногда, неопределенностью характеристик электронных приборов. Несмотря на большое количество выпускаемых электронной промышленностью полупроводниковых элементов расчету электронных схем присущи вполне определенные закономерности; существует сравнительно небольшое количество правил, методов и практических приемов, позволяющих выполнить ориентировочный расчет электронного устройства.

Круг типовых полупроводниковых приборов, изучаемых в курсе «Основы электроники», ограничен: полупроводниковые диоды, биполярные и полевые транзисторы. Статические и динамические характеристики приборов описаны в справочниках и технической литературе с различной степенью детальности. Предлагаемые в методических указаниях сведения по расчету электронных схем позволяют на основе справочных данных и знаний типовых характеристик элементов выполнить начальный расчет электронной схемы без применения сложного математического аппарата и средств вычислительной техники.

Лабораторные работы по дисциплине выполняются с использованием пакета программ моделирования электронных схем «Electronics Workbench» версии 5.12 фирмы Interactive Image Technologies. Подробное описание пакета можно найти в [5].

Лабораторная работа №1. Расчет схем с полупроводниковыми диодами

1.1. Основные теоретические сведения

Диод представляет собой двухслойную полупроводниковую структуру с двумя выводами, получившими названия анод и катод (рис 1.1).

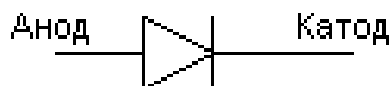


Рис. 1.1. Условное обозначение диода

Параметры и режим работы диода определяются его вольтамперной характеристикой, иллюстрирующей зависимость протекающего через диод тока I от приложенного напряжения U . Типовая вольтамперная характеристика прибора показана на рис. 1.2.

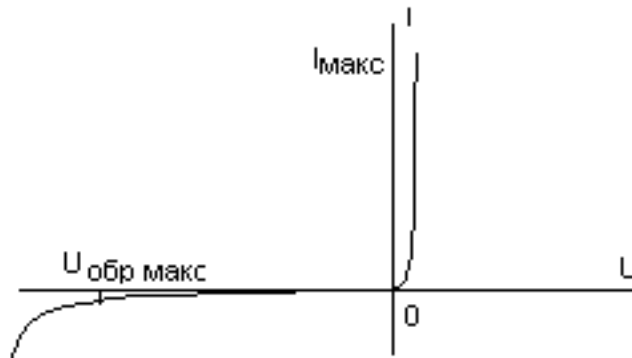


Рис. 1.2. Вольтамперная характеристика диода

Приложенное к диоду напряжение может быть разной полярности. Положительным принято считать напряжение между электродами, приложенное плюсом к аноду прибора, минусом - к катоду.

При положительном напряжении через диод протекает *прямой* ток, резко возрастающий при увеличении напряжения. Максимальное значение прямого тока $I_{\text{макс}}$ нельзя превышать из-за возможного перегрева диода и выхода его из строя. При максимальном значении тока приложенное к диоду напряжение мало зависит от типа прибора и для диодов из германия находится в пределах 0,7- 0,9 В, для диодов из кремния - 1,0 - 1,2 В.

При отрицательном напряжении диод считается запертым, через него протекает незначительный *обратный* ток, на несколько порядков меньший прямого. Максимальное значение обратного напряжения $U_{\text{обр_макс}}$ также ограничено. Напряжение больше максимального значения приводит к возникновению лавинного пробоя, при котором ток через прибор начинает резко возрастать при неизменном напряжении, и последующему перегреву прибора.

Участок характеристики, ограниченный максимальным обратным напряжением $U_{\text{обр_макс}}$ и максимальным прямым током $I_{\text{макс}}$, считается *рабочим* участком. На рабочем участке характеристика прибора описывается экспоненциальной зависимостью Эберса-Молла:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{U}{m\varphi_T}\right) - 1 \right], \quad (1.1)$$

1.1)

где I_0 - теоретическое значение обратного тока,

$m = 1 \div 2$ - поправочный коэффициент,

φ_T - термический потенциал электрона.

В свою очередь: $\varphi_T = kT / q$, (1.2)

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [Дж/К] - постоянная Больцмана,

$T [K]$ - абсолютная температура в градусах Кельвина,

$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ [кулон] - заряд электрона

При комнатной температуре $T=296 K$ термический потенциал электрона приблизительно равен 25,5 мВ.

Непосредственно формулой 1.1 удастся воспользоваться на практике очень редко из-за большой неопределенности параметра I_0 , который к тому же сильно зависит от температуры. Считается, что обратный ток диода удваивается при увеличении температуры всего на $10 K$.

В практических расчетах вольтамперная характеристика диода обычно заменяется двумя прямыми:

$$I = \begin{cases} \infty, & \text{при } U_a > U_0, \\ 0, & \text{при } U_a < U_0, \end{cases} \quad (1.3)$$

где U_0 - падение напряжения на диоде при протекании тока в прямом направлении. Для кремниевых диодов величина U_0 находится в пределах 0,8 – 1,2 В, для германиевых – 0,6 – 0,8 В.

Применение упрощенного описания позволяет формализовать расчет схем и проводить его с минимальным использованием справочных данных.

1.2. Программа работы

Расчет схемы

Используя простейшую модель диода, рассчитать напряжения и токи в различных ветвях электронной схемы. Исходные данные для расчета взять из таблицы I, схемы – из рисунка 1.3. При расчетах падение напряжения на диоде принять равным $I V$.

Таблица I
Варианты заданий для расчета

Вариант	Рис.	U1 (В)	U2 (В)	R1 (кОм)	R2 (кОм)	R3 (кОм)
1	а	5	15	3	20	13
2	б	5	15	3	21	12
3	в	5	15	4	22	11
4	г	6	15	4	23	10
5	д	6	14	4	24	9
6	е	6	14	4	25	8
7	ж	7	14	5	26	7
8	з	7	14	5	27	6
9	и	7	13	5	28	5
10	к	8	13	5	29	20
11	л	8	13	6	30	19

12	м	8	13	6	15	18
13	а	9	12	6	16	17
14	б	9	12	6	17	16
15	в	9	12	7	18	15
16	г	10	12	7	19	14
17	д	10	11	7	20	13
18	е	10	11	7	21	12
19	ж	11	11	8	22	11
20	з	11	11	8	23	10
21	и	11	10	8	24	9
22	к	12	10	8	25	8
23	л	12	10	9	26	7
24	м	12	10	9	27	6
25	а	13	9	9	28	5
26	б	10	13	6	17	16
27	в	11	13	7	18	15
28	г	12	13	7	19	14
29	д	13	12	7	20	13
30	е	14	12	7	21	12

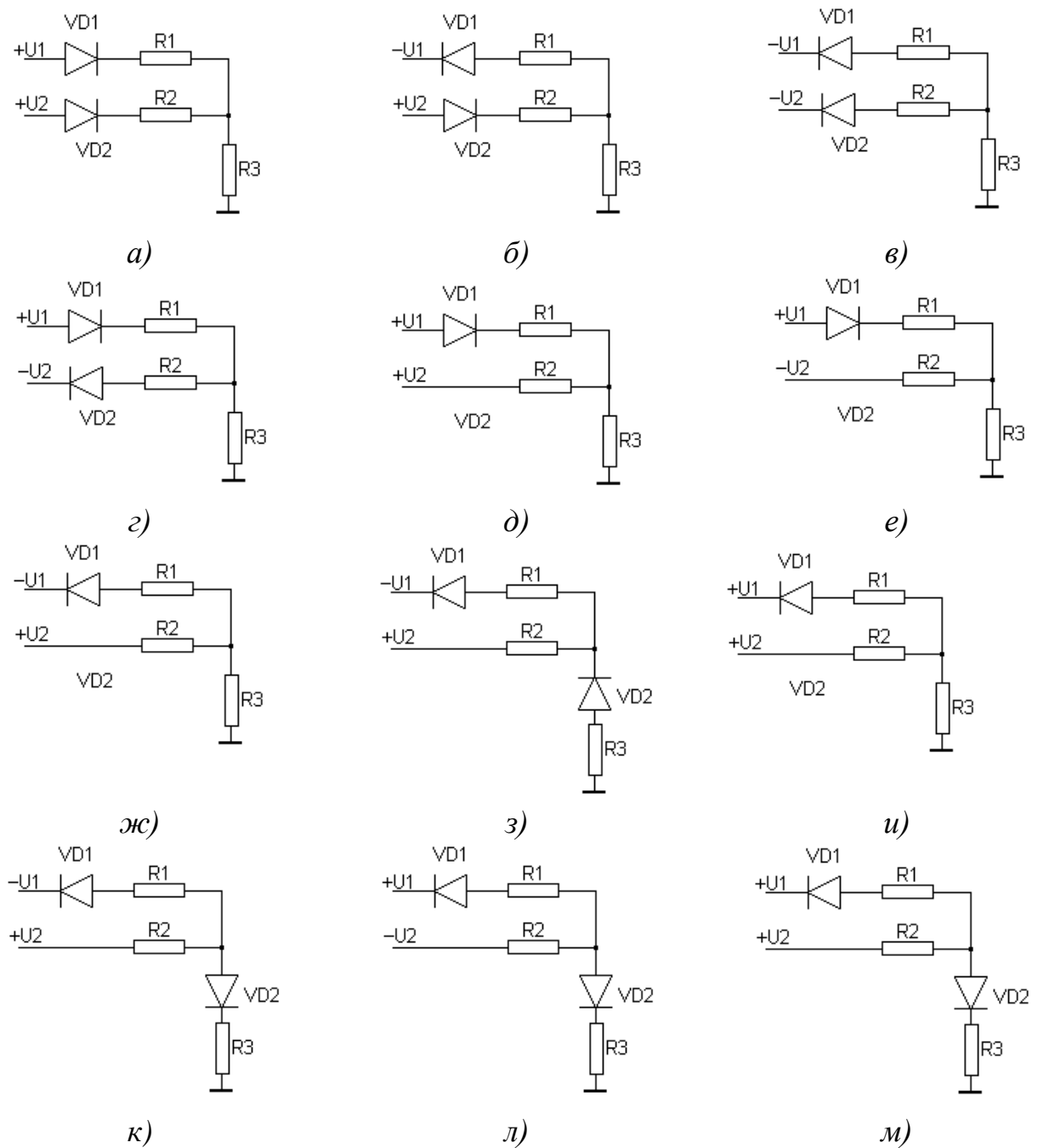


Рис. 1.3. Варианты заданий для расчета схем с диодами

Для решения задачи необходимо :

- Аккуратно вычертить расчетную схему.
- Обозначить все токи в ветвях схемы и потенциалы узлов. Направления токов выбрать совпадающими с проводящим состоянием диодов.
- Составить систему уравнений в соответствии с законами Кирхгофа для всех узлов и контуров схемы.
- Решить систему уравнений любым известным методом.
- Проанализировать полученные результаты. Если в результате расчетов ток, протекающий через какой либо из диодов схемы,

получился отрицательным, то сделать вывод о несоответствии решения и описания диода. В этом случае ток через диод следует принять равным нулю, преобразовать систему уравнений и решить её вновь.

Занести результаты расчета в таблицу по форме 1.

Форма 1

Результаты расчета и моделирования схемы с диодами

Токи в ветвях схемы	I1, мА	I2, мА	I3, мА
Результаты расчета			
Результаты моделирования с идеальными диодами			
Результаты моделирования с реальными диодами			

Моделирование схемы

Собрать модель схемы в программе «Electronics Workbench». Установить все необходимые параметры схемы. Для измерения токов и напряжений в ветвях схемы включить в неё измерительные приборы: амперметры и вольтметры.

Выбрать для исследования схемы идеальные диоды. Включить модель. Результаты моделирования занести в таблицу 1.1.

Заменить в схеме идеальные диоды на диоды фирмы General Electric или Motorola (по указанию преподавателя) из библиотеки пакета Electronics Workbench. Повторить моделирование. Результаты вновь занести в таблицу 1.1.

Сравнить результаты моделирования с полученными ранее расчетными данными. Сделать выводы о точности расчетов, о влиянии реальных параметров диодов на результаты расчетов.

1.3. Содержание отчета

Титульный лист. Расчетная схема. Расчетные формулы. Результаты расчета. Выводы.

1.4. Контрольные вопросы

- Чему равно падение напряжения на диоде, включенном в прямом направлении?
- Как изменяется падение напряжения на диоде при изменении протекающего через него тока?
- Как влияют реальные параметры диодов на результаты расчетов электронных схем?
- Можно ли рассчитать диодную схему, не выбирая диоды?

Лабораторная работа №2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

2.1. Основные теоретические сведения

Выпрямители осуществляют преобразование переменного напряжения в постоянное. Схемы выпрямителей многообразны. Из однофазных схем наиболее распространена мостовая схема, изображенная на рис. 2.1.

Четыре диода схемы обеспечивают протекание тока нагрузки I_n в одном направлении независимо от знака входного напряжения. При положительном входном напряжении в первый полупериод синусоиды (рис. 2.1) ток от плюса источника входного напряжения (точка а) протекает через диод VD_1 , через сопротивление нагрузки R_n (точка d), диод VD_4 к минусу источника (точка с).

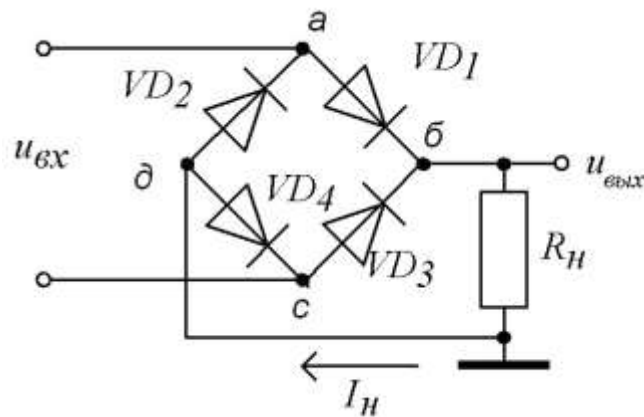


Рис. 2.1. Однофазный мостовой выпрямитель

Если пренебречь падением напряжения на диодах, то выходное напряжение (напряжение на нагрузке) повторяет входное: $u_{вых} = u_{вх}$ (рис. 2.2). В случае смены полярности (второй полупериод) контур тока включает в себя диод VD_3 , резистор R_n и диод VD_2 . При этом ток нагрузки, по-прежнему, протекает от точки б схемы к точке d, а $u_{вых} = -u_{вх}$

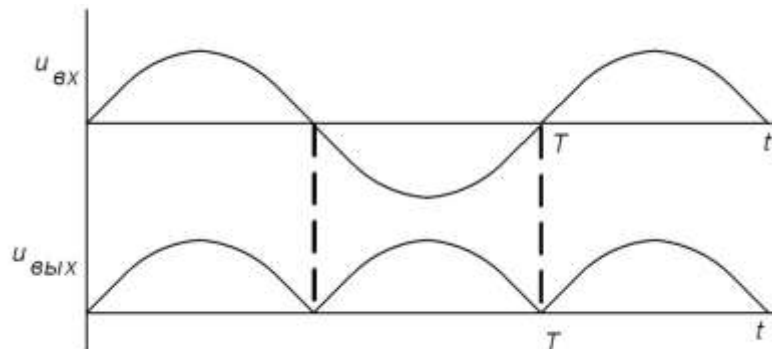


Рис. 2.2. Временная диаграмма работы выпрямителя

Среднее значение выходного напряжения:

$$U_{\text{вых}} = 1/\pi \int_0^{\pi} u_{\text{вх}} d\nu ,$$

где $\nu = \omega t$,

ω – угловая частота сигнала.

У синусоидальных сигналов

$$U_{\text{вых}} = 1/\pi \int_0^{\pi} U_{\text{max}} \sin(\nu) d\nu ,$$

где: $U_{\text{max}} = \sqrt{2} \cdot U$ – амплитуда синусоиды,

U – действующее значение входного напряжения.

Отношение $D = U_{\text{вых}} / U$ называется коэффициентом выпрямления схемы.

Для однофазной мостовой схемы (рис. 2.1) и синусоидальных сигналов в соответствии с (2.1) имеем $D = 2\sqrt{2} / \pi \cong 0,9$.

Форма выходного напряжения (рис. 2.2), характерная для выпрямителей, не удовлетворяет большинство потребителей. По этой причине неотъемлемым элементом источника питания становится сглаживающий фильтр, в качестве которого можно использовать конденсатор. Выпрямитель с емкостным фильтром изображен на рис. 2.3, а на рис. 2.4 временные диаграммы его работы.

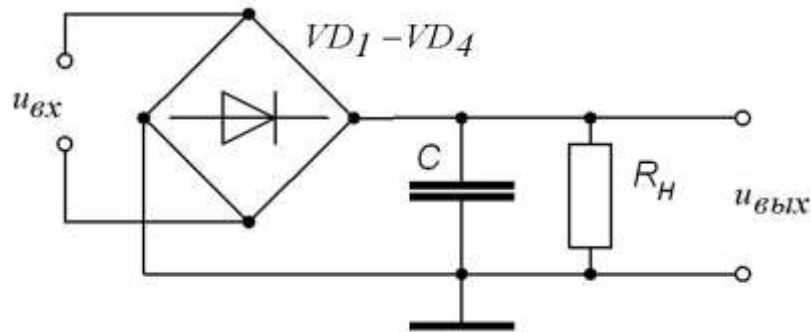


Рис. 2.3. Выпрямитель с емкостным фильтром

В интервале (рис. 2.4) $t_2 - t_1$, когда входное напряжение $u_{\text{вх}}$ превышает напряжение на нагрузке, осуществляется подзаряд конденсатора через выпрямитель. Остальную часть периода $t_2 - t_1$ происходит разряд конденсатора на нагрузку по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau = R_H C$.

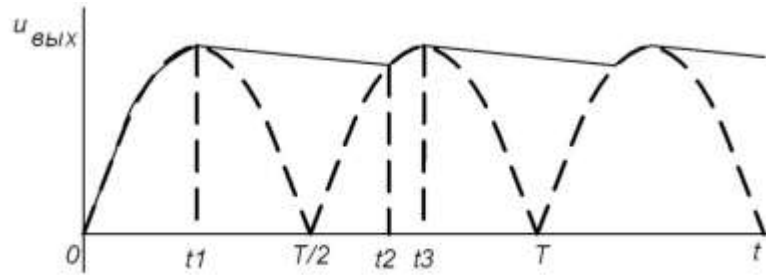


Рис. 2.4. Временные диаграммы работы мостового выпрямителя с емкостным фильтром

Если принять, что время разряда конденсатора $t_2 - t_1$ значительно больше времени заряда $t_2 - t_1$, то среднее за время $T/2$ напряжение на нагрузке можно рассчитать по формуле

$$U_{вых} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} U_{max} \exp(-t/\tau) dt.$$

При $t_2 - t_1 = T$:
$$U_{вых} = (\tau/T) \cdot U_{max} [1 - \exp(-T/\tau)].$$

Для нормальной работы фильтра необходимо, чтобы при любой нагрузке выпрямителя выполнялось условие: $\tau = R_n C \gg T/2$, тогда

$$U_{вых} = U_{max}$$

К концу периода разряда конденсатора (момент t_2 на рис. 2.2) напряжение на нагрузке

$$U_{t2} = U_{max} \exp(-T/\tau)$$

отличается от максимального значения на величину амплитуды пульсаций

$$U_n = U_{max} [1 - \exp(-T/\tau)].$$

При выполнении условия $\tau \gg T$

$$U_n = U_{max} T/\tau = U_{max} / (2fR_n) = I_n / (2fC),$$

где: f - частота питающей сети,

R_n - сопротивление нагрузки,

I_n - ток нагрузки,

C - емкость конденсатора.

1.2. Программа работы

Расчет выпрямителя без фильтра

По заданному значению входного напряжения U и сопротивления нагрузки R рассчитать выходное напряжение $U_{вых}$ и ток нагрузки $I_{вых}$ однофазного

мостового выпрямителя (рис. 2.1), максимальный ток I_{max} , протекающий через диоды, максимальное обратное напряжение на диодах U_{max} . Исходные данные для расчета взять из таблицы 2. При расчетах падение напряжения на диоде принять равным 1 В. По максимальному току I_{max} и максимальному напряжению U_{max} из справочника по полупроводниковым приборам выбрать диоды для построения схемы.

Таблица 2

Варианты заданий для расчета

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
U(В)	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17	17,5
R(Ом)	11,0	12,1	13,2	14,4	15,6	16,9	18,2	19,6	21,0	22,5	24,0	25,6	27,2	28,9	30,6

Вариант	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
U	18	18,5	19	19,5	20	20,5	21	21,5	22	22,5	23	23,5	24	24,5	25
R(Ом)	32,4	34,2	36,1	38,0	40,0	42,0	44,1	46,2	48,4	50,6	52,9	55,2	57,6	60,0	62,5

Моделирование

Собрать схему выпрямителя в программе моделирования Electronics Workbench 5.12. В модели использовать идеальные диоды. С помощью измерительных приборов измерить выходное напряжение и ток нагрузки выпрямителя. Результаты моделирования сравнить с расчетом.

Поменять в модели диоды на реальные из библиотеки моделирующего пакета. Сравнить новые результаты моделирования с полученными ранее.

С помощью осциллографа зафиксировать форму выходного напряжения выпрямителя и кривую напряжения на одном из диодов. По показаниям осциллографа рассчитать максимальный ток через диоды, максимальное обратное напряжение на диодах. Сравнить результаты моделирования с результатами расчетов. Осциллограммы работы сохранить для отчета.

Расчет выпрямителя с емкостным фильтром

Рассчитать емкость фильтра для выпрямителя. При расчете напряжение пульсаций U_n принять равным 5% от выходного напряжения $U_{вых} = U_{max}$, ток нагрузки I_n - рассчитать по известному значению выходного напряжения $U_{вых}$ и заданному сопротивлению нагрузки.

Моделирование

Собрать схему выпрямителя с емкостным фильтром (рис. 2.5) в программе моделирования Electronics Workbench 5.12.

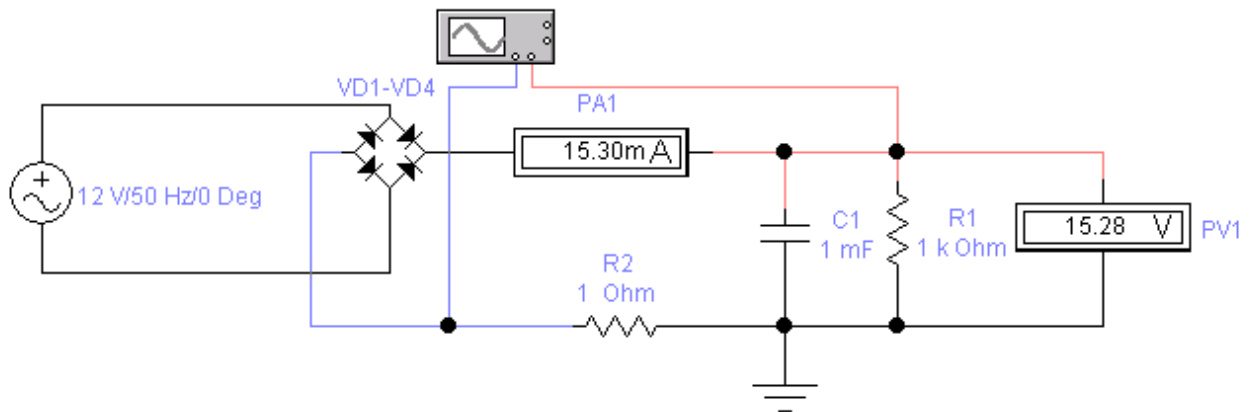


Рис. 2.5. Модель выпрямителя с емкостным фильтром

Установить в модели параметры источника входного напряжения, сопротивления нагрузки $R1$ и емкости конденсатора $C1$. Для измерения тока включить в схему измерительный резистор $R2$ величиной не более 1% от сопротивления нагрузки.

С помощью измерительных приборов измерить выходное напряжение и ток нагрузки выпрямителя. Результаты моделирования сравнить с расчетом.

С помощью осциллографа зафиксировать форму выходного напряжения выпрямителя и кривую падения напряжения на измерительном резисторе $R2$. По показаниям осциллографа рассчитать амплитуду пульсаций выходного напряжения и максимальный ток через диоды выпрямителя. Сравнить результаты моделирования с результатами расчетов. Сравнить значение максимального тока с рассчитанным ранее значением для выпрямителя без фильтра.

2.3. Содержание отчета

Титульный лист. Расчетные формулы для двух исследуемых схем. Результаты расчета. Осциллограммы и результаты моделирования. Выводы по каждому пункту работы..

2.4. Контрольные вопросы

- Чему равен коэффициент выпрямления однофазного мостового выпрямителя?
- Как рассчитать максимальный ток через диод, если известно среднее значение выпрямленного тока?
- Как рассчитать максимальное обратное напряжение на диоде, если известно среднее выпрямленное напряжение?
- Как зависит выходное напряжение выпрямителя от типа диодов?
- Как изменяется выходное напряжение выпрямителя при подключении к нему емкостного фильтра?
- Как изменяется ток через диоды выпрямителя при подключении к

- нему емкостного фильтра?
- Как влияет ток нагрузки на пульсации напряжения на выходе выпрямителя с емкостным фильтром?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. РАСЧЕТ СХЕМ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

3.1. Основные теоретические сведения

Транзистор является усилительным прибором. с тремя электродами: эмиттер (*emitter*), коллектор (*collector*) и база (*base*). В зависимости от расположения слоев полупроводника в структуре прибора различают транзисторы типа *p-n-p* и типа *n-p-n*. Их условные обозначения показаны на рис. 3.1



Рис. 2.1. Транзисторы со структурой *n-p-n* (а) и *p-n-p* (б)

В зависимости от схемы включения транзистор может работать в трех разных режимах: активном, режиме насыщения и режиме отсечки.

В активном режиме направление всех токов через транзистор должно совпадать с направлением стрелки в условном обозначении прибора. В этом случае переход “база-эмиттер” работает как открытый диод, а переход “база-коллектор” находится под обратным напряжением (закрит).

Коллекторный ток транзистора в активном режиме I_k всегда превышает базовый $I_б$. Их отношение: $\beta = I_k / I_б$ (3.1)

называется *коэффициентом усиления транзистора по току*. Для различных транзисторов даже одного типа коэффициент усиления очень различен, обычно он точно не известен и находится в пределах от 50 до 250. К тому же коэффициент усиления сильно зависит от тока коллектора, напряжения между коллектором и эмиттером и температуры.

Для любого транзистора, в соответствии с первым законом Кирхгофа:

$$I_э = I_k + I_б \quad (3.2)$$

и, следовательно, $I_э = (\beta + 1) \cdot I_б$. (3.3)

Переход “база-эмиттер” транзистора работает в активном режиме аналогично диоду, включенному в прямом направлении. Напряжение между базой и эмиттером $U_{бэ}$ не должно быть более 0,6÷0,8 В, так как в противном случае ток через переход возрастает до недопустимых значений.

В режиме насыщения напряжение на коллекторе транзистора меньше чем напряжение на базе и переход «база-коллектор» транзистора открыт. В этом случае транзистор не является усилительным прибором и его ток коллектора определяется подключенными к транзистору источниками питания и резисторами.

В режиме отсечки напряжение на базе транзистора меньше чем напряжение на эмиттере и переход «база-эмиттер» закрыт. В этом режиме транзистор не проводит тока: ток базы, ток эмиттера и ток коллектора равны нулю.

3.2. Программа работы

Расчет схемы

Используя простейшее описание транзистора, рассчитать токи и напряжения во всех ветвях заданной схемы. Исходные данные для расчета приведены в таблице 3, расчетные схемы – на рис. 3.2. При расчетах коэффициент усиления транзистора β считать равным 100, падение напряжения на переходе "база-эмиттер" - равным 0,6 В.

Таблица 3

Варианты заданий для расчета транзисторных схем

Вариант	Рис.	R1 (кОм)	R2 (кОм)	R3 (кОм)	R4 (кОм)	U
1	а	50	100	1	0,3	10
2	б	50	110	2	0,4	11
3	в	100	120	3	0,5	12
4	г	100	130	0,5	0,6	13
5	д	150	140	0,6	0,7	14
6	е	150	150	0,7	0,8	15
7	ж	200	160	0,8	0,9	16
8	з	200	170	0,9	1	17
9	и	250	180	1,1	1,1	18
10	а	250	190	1,2	1,2	19
11	б	300	200	1,3	1,3	20
12	в	300	210	1,4	1,4	6
13	г	350	220	1,5	1,5	7
14	д	350	230	1,6	1,6	8
15	е	60	240	1,7	1,7	9
16	ж	60	250	1,8	1,8	10
17	з	120	260	1,9	1,9	11
18	и	120	270	2,1	2	12
19	а	180	280	2,2	2,1	13
20	б	180	290	2,3	2,2	14
21	в	240	300	2,4	2,3	15
22	г	240	310	2,5	2,4	16

Вариант	Рис.	R1 (кОм)	R2 (кОм)	R3 (кОм)	R4 (кОм)	U
23	д	70	320	2,6	2,5	17
24	е	70	330	2,7	2,6	17
25	ж	140	340	2,8	2,7	19
26	з	120	260	1,9	1,9	11
27	и	120	270	2,1	2	12
28	а	180	280	2,2	2,1	13
29	б	180	290	2,3	2,2	14
30	в	240	300	2,4	2,3	15

Для решения задачи необходимо выполнить следующее:

- Аккуратно вычертить расчетную схему.
- Обозначить все токи в ветвях схемы и потенциалы узлов. Принять, что транзистор работает в активном режиме; направления токов через электроды транзистора выбрать в соответствии с направлением стрелки в условном обозначении прибора.
- Для всех узлов и контуров схемы составить уравнения в соответствии с законами Кирхгофа и формулами, описывающими работу транзистора.
- Решить систему уравнений любым известным методом.
- Проанализировать полученные результаты. Если в результате расчетов ток, протекающий через электроды транзистора, получился отрицательным, то сделать вывод о несоответствии режима работы транзистора активному режиму. Определить в каком режиме работает прибор, и повторить расчеты.

Результаты расчета оформить в виде таблицы по форме 3.

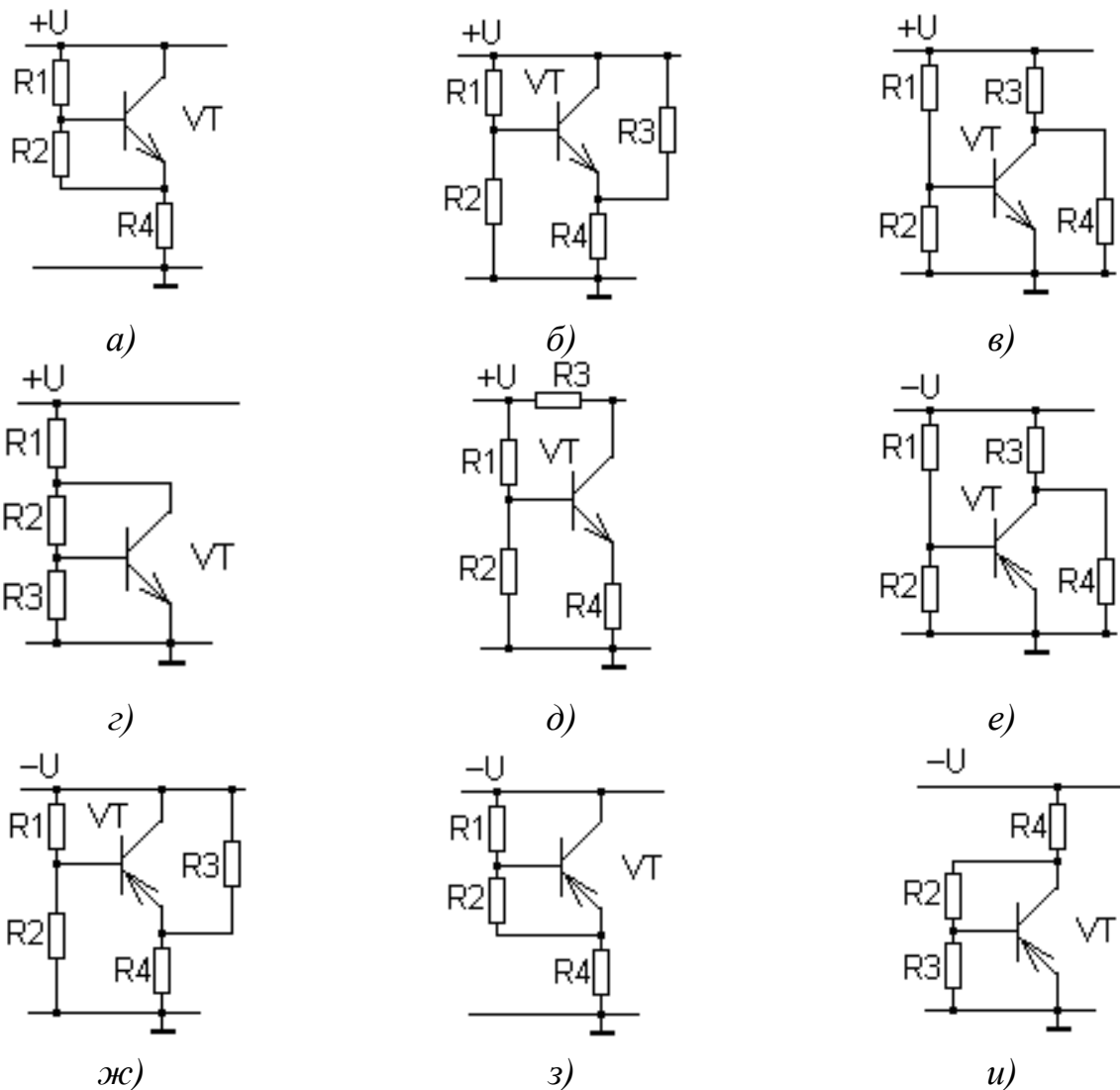


Рис. 3.2. Расчетные схемы на биполярных транзисторах

Форма 3

Результаты расчета и моделирования схемы с транзисторами

Токи в ветвях схемы	I1, мА	I2, мА	I3, мА	I4, мА	I5, мА	I6, мА
Результаты расчета						
Результаты моделирования с идеальным транзистором						
Результаты моделирования с реальным транзистором						

Моделирование схемы

Собрать модель схемы в программе «Electronics Workbench» версии 5.12. Установить все необходимые параметры схемы. Для измерения токов и напряжений в ветвях схемы включить в неё измерительные приборы: амперметры и вольтметры.

Выбрать для исследования схемы идеальный транзистор, у которого коэффициент усиления равен 100. Включить модель. Результаты моделирования занести в таблицу.

Заменить в схеме идеальный транзистор на транзистор фирмы National Electronic или Motorola (по указанию преподавателя) из библиотеки пакета Electronics Workbench. Повторить моделирование. Результаты вновь занести в таблицу 1.1.

Сравнить результаты моделирования с полученными ранее расчетными данными. Сделать выводы о точности расчетов, о влиянии реальных параметров транзистора на результаты расчетов. Объяснить новые результаты.

3.3. Содержание отчета

Титульный лист. Расчетная схема. Расчетные формулы. Результаты расчета. Выводы.

3.4. Контрольные вопросы

- Написать основные уравнения, описывающие работу биполярного транзистора.
- От чего зависит ток коллектора биполярного транзистора?
- Как связаны между собой ток эмиттера и ток коллектора транзистора, работающего в активном режиме?
- Как влияет падение напряжения на переходе «база-эмиттер» на ток эмиттера транзистора, работающего в активном режиме?
- При каком условии транзистор переходит в режим насыщения?
- При каком условии транзистор переходит в режим отсечки?
- Как рассчитать ток коллектора транзистора в режиме отсечки?
- Как рассчитать ток коллектора транзистора в режиме насыщения?

Лабораторная работа № 4. Исследование транзисторных повторителей напряжения

4.1. Основные теоретические сведения

Повторителя напряжения являются усилителями тока, предназначенными для согласования усилительных каскадов.

Эмиттерный повторитель

В эмиттерном повторителе нагрузка включается в цепь эмиттера биполярного транзистора (рис. 4.1).

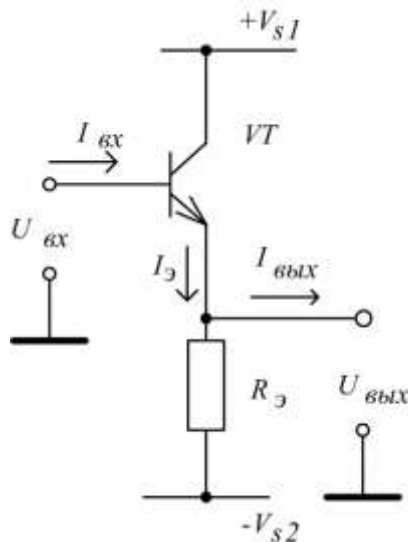


Рис. 4.1. Эмиттерный повторитель

Выходное напряжение повторителя отличается от входного на величину падения напряжения на эмиттерном переходе:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{бэ}}.$$

Если напряжение $U_{\text{бэ}}$ считать постоянным, то коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = \partial U_{\text{вых}} / \partial U_{\text{вх}} \cong 1.$$

Входным током схемы является ток базы транзистора, выходным – часть тока эмиттера транзистора, ответвляющаяся в нагрузку $I_{\text{вых}}$. Соотношение эмиттерного и базового токов с учетом распределения тока эмиттера в цепи эмиттера и определяет коэффициент усиления повторителя по току:

$$K_i = \partial I_{\text{вых}} / \partial I_{\text{вх}} = (\beta + 1) \frac{R_{\text{э}}}{R_{\text{э}} + R_{\text{н}}}.$$

Входное сопротивление схемы определяется с учетом того, что:

$$\partial U_{\text{вх}} = \partial U_{\text{вых}} = \partial I_{\text{вых}} \cdot R_{\text{н}},$$

$$\partial I_{\text{вх}} = \partial I_{\text{вых}} / \beta.$$

В результате:

$$R_{\text{вх}} = \partial U_{\text{вх}} / \partial I_{\text{вх}} = \beta R_{\text{н}}.$$

Полученные результаты объясняют основное применение эмиттерного повторителя, как устройства для согласования высокоомных источников сигнала с относительно низкоомной нагрузкой.

Двухтактные повторители

Схема двухтактного повторителя, известного под названием усилителя класса В, изображена на рис. 4.2.

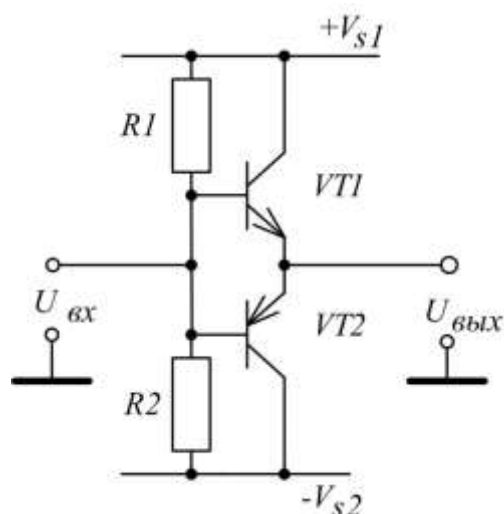


Рис. 2.18. Двухтактный повторитель напряжения класса В

Схема представляет собой соединение двух транзисторов, один из которых (VT1) работает в режиме эмиттерного повторителя при положительном входном сигнале, а второй (VT2) - при отрицательном:

$$\begin{cases} U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{бэ}}, & \text{при } U_{\text{вх}} > U_{\text{бэ}} \\ U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} + U_{\text{бэ}}, & \text{при } U_{\text{вх}} < -U_{\text{бэ}} \end{cases}$$

При малых напряжениях $U_{\text{бэ}} > U_{\text{вх}} > -U_{\text{бэ}}$ выходной сигнал схемы однозначно равен нулю из-за потерь на р-п- переходах транзисторов. По этой причине форма выходного сигнала усилителя отлична от формы входного. При преобразовании синусоидальных сигналов в выходном напряжении присутствуют искажения типа «ступенька» (рис. 4.3).

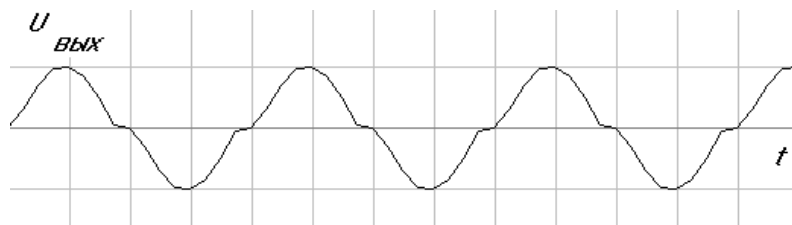


Рис. 4.3. Форма выходного напряжения усилителя класса В

Избавиться от нелинейных искажений сигнала, вызванных потерями на р-п- переходах транзисторов, позволяет схема двухтактного усилителя класса АВ, изображенная на рис. 4.4.

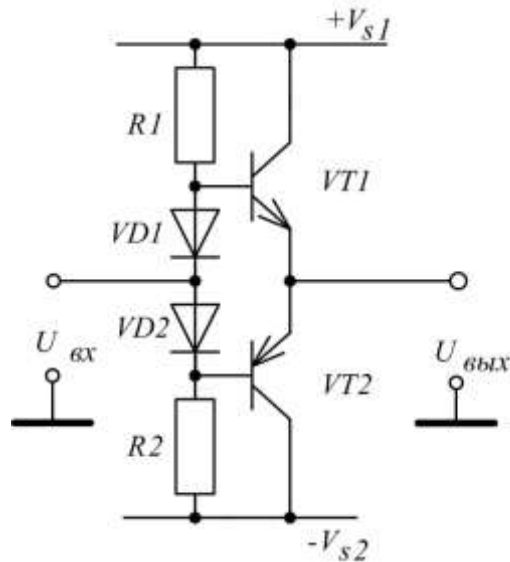


Рис. 4.4. Двухтактный повторитель класса АВ

За счет диодов $VD1$ и $VD2$ потенциалы на базах транзисторов изменяются, и изменяется величина выходного напряжения схемы:

$$\begin{cases} U_{вых} = U_{вх} + U_{\delta} - U_{бэ}, & \text{при } U_{вх} > U_{бэ} \\ U_{вых} = U_{вх} - U_{\delta} + U_{бэ}, & \text{при } U_{вх} < U_{бэ} \end{cases}$$

где U_{δ} - падение напряжения на диоде.

Если подобрать диоды по прямому падению напряжения $U_{\delta} = U_{бэ}$, то схема становится идеальным повторителем напряжения.

Моделирование

Собрать схему эмиттерного повторителя (рис. 4.1) в программе моделирования Electronics Workbench 5.12. В модели использовать идеальные транзисторы. Подключить ко входу повторителя источник напряжения $U_{вх}$, к выходу – сопротивление нагрузки R_n . Величину резистора и напряжения питания схемы $V_{S1} = V_{S2}$ выбрать из таблицы 4.1.

Таблица 4.1

Варианты заданий для расчета транзисторных схем

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R_n (кОм)	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$V_{S1} = V_{S2}$ (В)	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14

Вариант	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
R_n (кОм)	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1
$V_{S1} = V_{S2}$ (В)	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15

Вариант	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
R_H (кОм)	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2
$V_{S1} = V_{S2}$ (В)	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16

Сопротивление R_3 выбрать равным $R_H / 2$.

Изменяя входное напряжение схемы в пределах от $-V_{S2}$ до $+V_{S1}$ снять зависимость выходного напряжения схемы от входного и, одновременно, выходного тока от входного. Результаты занести в таблицу по форме 4.

$U_{вх}$ (В)	$-V_{S2}$										$+V_{S1}$
$I_{вх}$ (мА)											
$U_{вых}$ (В)											
$I_{вых}$ (мА)											

Построить графики зависимостей выходного напряжения схемы от входного $U_{вых}(U_{вх})$ и выходного тока от входного $I_{вых}(I_{вх})$. На линейных участках характеристики посчитать коэффициент усиления схемы по напряжению $K_u = \partial U_{вых} / \partial U_{вх}$ и коэффициент усиления по току $K_i = \partial I_{вых} / \partial I_{вх}$.

Сравнить полученные результаты с расчетными.

Подключить ко входу схемы генератор синусоидальных напряжений с амплитудой равной $0,8 \cdot V_{S1}$. Зарисовать форму выходного сигнала повторителя. Результаты опыта объяснить.

Повторить все опыты с двухтактной схемой повторителя по схеме усилителя класса В (рис. 4.3). Результаты объяснить.

Повторить все опыты с двухтактной схемой повторителя по схеме усилителя класса АВ (рис. 4.4). Результаты объяснить.

3.3. Содержание отчета

Титульный лист. Расчетная схема. Расчетные формулы. Осциллограммы. Результаты расчета. Выводы.

3.4. Контрольные вопросы

- Как рассчитываются коэффициенты усиления по току и по напряжению эмиттерного повторителя?
- От чего зависит входное напряжение эмиттерного повторителя?
- Недостатки однотактной схемы повторителя?
- Преимущества двухтактных схем повторителей?
- Преимущества усилителя класса АВ?

Лабораторная работа №5. Исследование операционного усилителя

5.1. Основные теоретические сведения

Операционный усилитель (ОУ) является усилителем постоянного тока с большим (иногда достигающим десятки тысяч) коэффициентом усиления и большим (иногда в сотни мегаом) входным сопротивлением. Операционные усилители выпускаются в виде интегральных микросхем, параметры и схемы включения которых достаточно подробно описаны в справочной литературе. Условное обозначение типового операционного усилителя показано на рис.5.1.

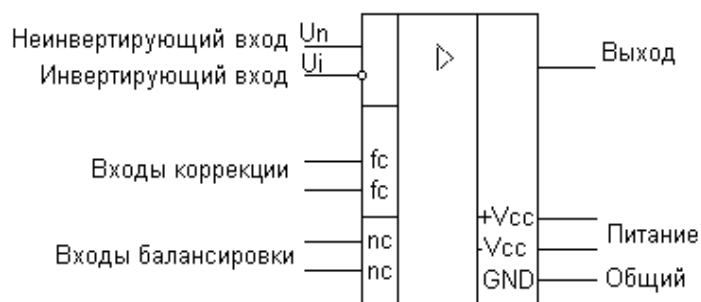


Рис.5.1. Условное обозначение операционного усилителя

Все ОУ имеют так называемый дифференциальный вход, выполненный как два независимых входа: инвертирующий и неинвертирующий. Усилению подвергается разность напряжений, приложенных ко входам: $U_n - U_i$.

Входы коррекции, балансировки, общий вывод у некоторых типов интегральных ОУ отсутствуют. При использовании ОУ необходимо применять схемы включения микросхем, рекомендованные изготовителем. На расчетных схемах некоторые неосновные входы ОУ могут быть опущены (рис. 5.2).

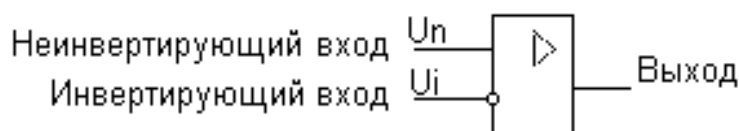


Рис.5.2 Упрощенное условное обозначение ОУ

Из-за большого коэффициента усиления ОУ их сложно использовать без добавочных стабилизирующих элементов, и на практике схемы ОУ, как правило, охватывают цепочками обратных связей, т.е. электрическими цепями, связывающими выход усилителя с одним из входов. Связь выхода ОУ с инвертирующим входом считается отрицательной обратной связью, а связь выхода с неинвертирующим входом - положительной обратной связью. ОУ с отрицательной обратной связью используются в качестве линейных усилительных элементов, ОУ с положительной обратной связью выполняют функции нелинейных элементов: устройств сравнения, генераторов импульсов и т.д.

Расчет схем с отрицательной обратной связью ведется на основе модели идеального операционного усилителя: усилителя с бесконечно большим

коэффициентом усиления и бесконечно большим входным сопротивлением. Из признаков идеального ОУ вытекают следующие его свойства:

- входные токи операционного усилителя пренебрежимо малы;
- потенциалы входов операционного усилителя равны $u_n = u_i$ (для схем с отрицательной обратной связью при условии, что выходное напряжение усилителя меньше напряжения насыщения).

Напряжением насыщения считается максимально возможное выходное напряжение ОУ. Величина напряжения насыщения U_{max} обычно приводится в справочных данных усилителя. В приближенных расчетах можно принять U_{max} равным напряжению питания ОУ.

Для схем без обратной связи либо с положительной обратной связью считается, что усилитель не может находиться в активном режиме; его выходное напряжение может принимать только два возможных значения, равных напряжению насыщения положительной или отрицательной полярности. При этом знак выходного напряжения полностью соответствует знаку разности напряжений на входах:

$$U_{вых} = \text{sign}(U_n - U_i).$$

5.2. Программа работы

Расчет схемы

Используя модель идеального операционного усилителя рассчитать выходное напряжение схемы с операционным усилителем. Исходные данные для расчета приведены в таблице 5. Напряжение насыщения ОУ принять равным +/- 12 В.

Таблица 5.
Варианты заданий для расчета

Вариант	Рис.	R1 (кОм)	R2 (кОм)	R3 (кОм)	R4 (кОм)	U (В)
1	а	10	82	30	36	1
2	б	11	75	33	33	2
3	в	12	68	36	33	3
4	г	13	62	39	30	4
5	д	14	57	43	27	5
6	е	15	54	47	24	6
7	ж	16	51	51	22	7
8	з	18	47	54	20	8
9	а	20	43	57	18	9
10	б	22	39	62	16	10
11	в	24	36	68	15	1
12	г	27	33	75	14	2
13	д	30	33	82	13	3

Вариант	Рис.	R1 (кОм)	R2 (кОм)	R3 (кОм)	R4 (кОм)	U (В)
14	е	33	30	10	12	4
15	ж	36	27	11	11	5
16	з	39	24	39	54	6
17	а	43	22	36	51	7
18	б	47	20	33	47	8
19	в	51	18	33	43	9
20	г	54	16	30	39	10
21	д	57	15	27	36	5
22	е	62	14	24	33	6
23	ж	68	13	22	33	7
24	з	75	12	20	30	8
25	с	82	11	18	27	9
26	а	75	47	62	27	3
27	б	68	43	68	24	4
28	в	62	39	75	22	5
29	г	57	36	82	20	6
30	д	54	33	10	18	7

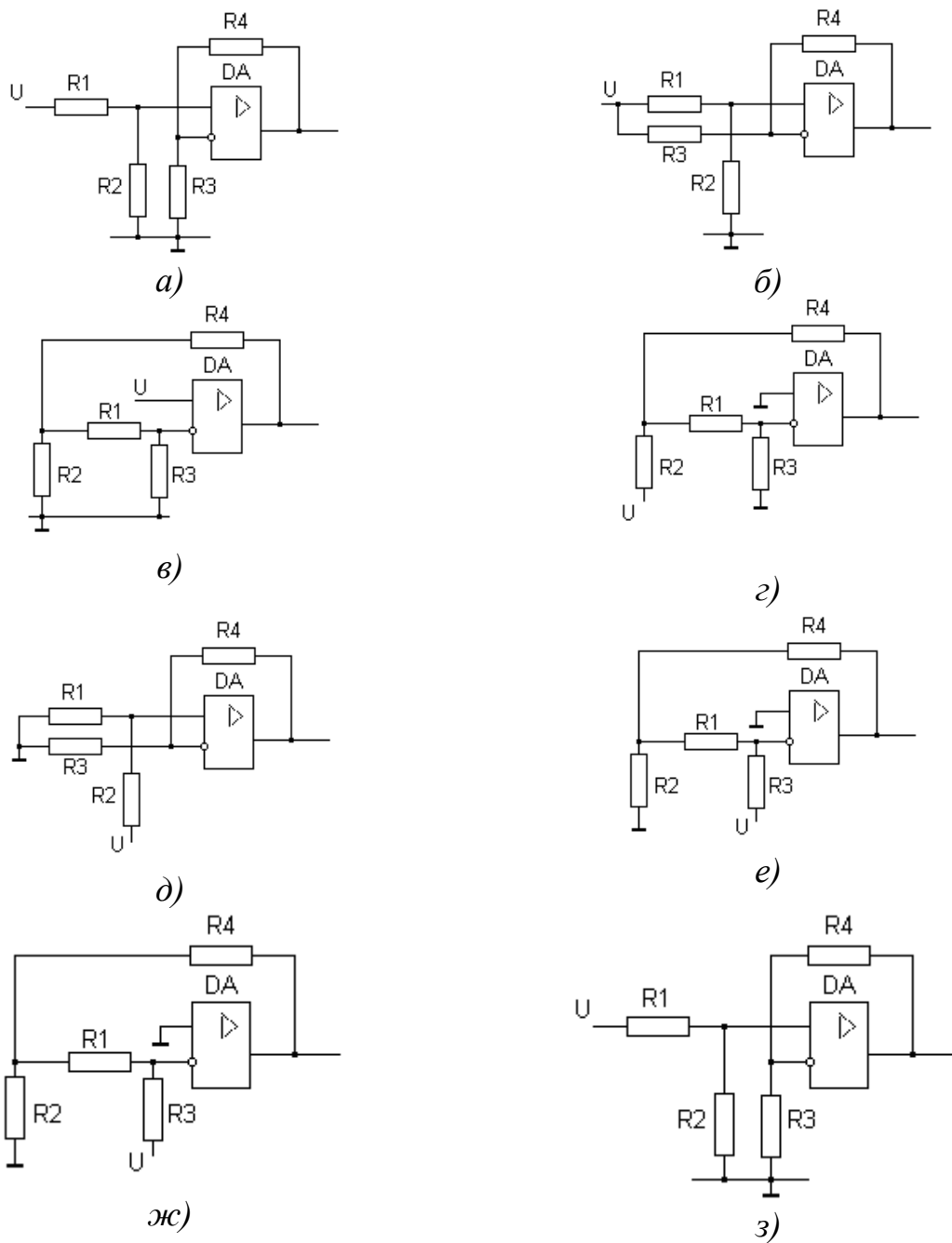


Рис. 5.3. Расчетные схемы на операционных усилителях

Для решения задачи необходимо:

- Аккуратно вычертить расчетную схему.
- Обозначить все токи в ветвях схемы и потенциалы узлов.
- Составить систему уравнений в соответствии с законами Кирхгофа для всех узлов и контуров схемы.
- Решить систему уравнений любым известным методом.

Занести результаты расчета в таблицу по форме 5.

Форма 5

Результаты расчета и моделирования схемы с диодами

Напряжения в контрольных точках	U1, В	U2, В	U3, В
---------------------------------	-------	-------	-------

Результаты расчета			
Результаты моделирования с идеальным операционным усилителем			
Результаты моделирования с реальным операционным усилителем			

Моделирование схемы

Собрать модель схемы в программе «Electronics Workbench» версии 5.12. Установить все необходимые параметры схемы. Для измерения токов и напряжений в ветвях схемы включить в неё измерительные приборы: амперметры и вольтметры.

Выбрать для исследования схемы идеальный операционный усилитель. Включить модель. Результаты моделирования занести в таблицу по форме 5.

Заменить в схеме идеальный операционный усилитель на реальный фирмы LM. Повторить моделирование. Результаты вновь занести в таблицу по форме 5.

Сравнить результаты моделирования с полученными ранее расчетными данными. Сделать выводы о точности расчетов, о влиянии реальных параметров операционного усилителя на результаты расчетов.

5.3. Содержание отчета

Титульный лист. Расчетная схема. Расчетные формулы. Результаты расчета. Выводы.

5.4. Контрольные вопросы

- Чему равны коэффициент усиления и входное сопротивление операционного усилителя?
- Как рассчитываются напряжения на входах операционного усилителя, охваченного отрицательной обратной связью?
- Можно ли рассчитать схему на операционном усилителе, не выбирая сам усилитель?

Лабораторная работа №6. Исследование стабилизатора напряжения

6.1. Основные теоретические сведения

Классическая схема стабилизатора напряжения (рис. 6.1) строится на основе операционного усилителя DA и транзисторного повторителя напряжения VT . В качестве источника опорного напряжения обычно применяется параметрический стабилизатор напряжения на стабилитроне VD и резисторе R_2 .

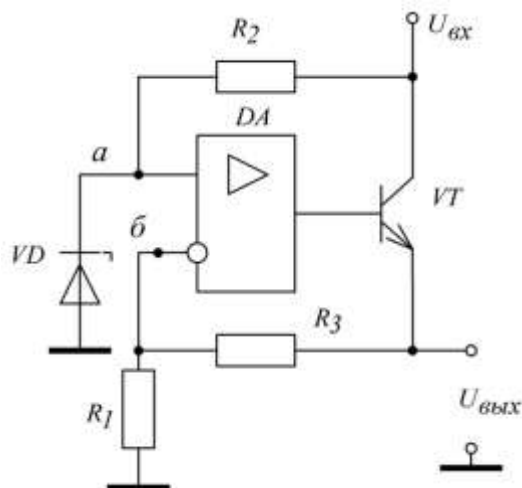


Рис. 6.1. Стабилизатор напряжения

Основные уравнения схемы имеют вид:

$U_a = U_b = U_{cm}$; где U_{cm} - напряжение стабилизации стабилитрона;

$I_1 = I_3 = U_b / R_1$; где I_1 и I_3 , соответственно, токи через резисторы R_1 и R_3 ;

$U_{вых} = I_3(R_1 + R_3)$;

где U_{cm} - напряжение стабилизации стабилитрона.

Решение системы $U_{вых} = U_{cm}(1 + R_3 / R_1)$ показывает, что выходное напряжение схемы не зависит от напряжения питания операционного усилителя и параметров цепи нагрузки.

Расчет схемы

По заданному значению выходного напряжения $U_{вых} = U_n$ и тока нагрузки I_n рассчитать стабилизатор напряжения: выбрать операционный усилитель, стабилитрон и силовой транзистор. Рассчитать резисторы R_1 , R_2 , R_3 . Исходные данные для расчета взять из табл. 6.

Таблица 6

Варианты заданий для расчета транзисторных схем

Вариант задания	Выходное напряжение (В)	Мощность нагрузки (Вт)
1.	8,5	15,5
2.	-8,9	32,0
3.	9,4	1,0
4.	-9,8	2,1
5.	10,2	4,0
6.	-10,6	10,0
7.	11,0	16,0
8.	-11,4	35,0

Вариант задания	Выходное напряжение (В)	Мощность нагрузки (Вт)
9.	11,8	1,1
10.	-12,2	2,2
11.	12,8	4,1
12.	-13,2	10,5
13.	13,6	16,5
14.	-14,0	40,0
15.	14,4	1,2
16.	-14,8	2,4
17.	15,2	4,2
18.	-15,6	11,0
19.	16,1	17,0
20.	-16,6	45,0
21.	17,1	1,3
22.	-17,6	2,5
23.	18,1	4,3
24.	-18,6	12,0
25.	19,0	17,5

Моделирование

Собрать схему стабилизатора напряжения в программе моделирования Electronics Workbench 5.12. В модели использовать идеальный операционный усилитель и идеальные транзисторы.

1. Подключить к выходу стабилизатора сопротивление нагрузки. Установить ток нагрузки равный номинальному. Исследовать влияние входного напряжения стабилизатора напряжения на его выходное напряжение. Результаты оформить в виде таблицы по форме 6.1.

Форма 6.1

Зависимость выходного напряжения стабилизатора от входного

$U_{вх}$	$U_{вх_мин}$							$U_{вх_макс}$

Минимальное значение входного напряжения $U_{вх_мин}$ принять равным номинальному выходному напряжению U_n , максимальное значение $U_{вх_макс} = (2 \div 3)U_{вх_мин}$.

По результатам опыта построить график зависимости выходного напряжения стабилизатора от входного, определить диапазон изменения входного напряжения, при котором стабилизатор работоспособен. Рассчитать коэффициент стабилизации схемы $K = \partial U_{вх} / \partial U_{ввых}$ в рабочем диапазоне.

2. Опыт повторить при бесконечно большом сопротивлении нагрузки ($I_n = 0$). Сравнить результаты опытов.

3. Установить входное напряжение стабилизатора равным $U_{вх_max}$. Исследовать влияние сопротивления нагрузки R_n на выходное напряжение схемы. Сопротивление нагрузки изменять от $5 \cdot U_n / I_n$ до нуля. Результаты занести в таблицу по форме 6.2.

Форма 6.2.

Зависимость выходного напряжения стабилизатора от нагрузки

R_n								0
$U_{вых}$								

По результатам опыта построить график зависимости выходного напряжения стабилизатора от сопротивления нагрузки, определить диапазон изменения сопротивления нагрузки, при котором стабилизатор работоспособен. Рассчитать выходное сопротивление стабилизатора $R_{вых} = -\partial U_n / \partial I_n$ в рабочем диапазоне.

4. Опыт повторить при минимальном входном напряжении стабилизатора в рабочем диапазоне входных сопротивлений.

6.3. Содержание отчета

Титульный лист. Расчетная схема. Расчетные формулы. Результаты расчета. Выводы.

6.4. Контрольные вопросы

- Нарисовать схему стабилизатора напряжения на операционном усилителе.
- От чего зависит выходное напряжение стабилизатора напряжения?
- Как рассчитывается коэффициент стабилизации стабилизатора напряжения?
- Как рассчитывается выходное сопротивление стабилизатора напряжения?

ЛИТЕРАТУРА

1. Водовозов, А.М. Основы электроники: учебное пособие/ А.М.Водовозов.- Вологда, ВоГТУ, 2002.- 125 с.
2. Прянишников, В.А. Электроника: курс лекций/ В.А.Прянишников.- СПб.: КОРОНА-принт, 1998.- 400 с.
3. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство/ У.Титце, К. Шенк.- М.: Додека, 2008.- 512 с.

4. Хоровиц, П. Искусство схемотехники: В 2-х томах. Т. 1/ П. Хоровиц, У.Хилл.- М.: Мир, 1993.- 598 с.
5. Electronics Workbench [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ewb.narod.ru>.