

Лабораторная работа №1

Исследование полупроводникового диода

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Исследование вольтамперной характеристики (ВАХ) полупроводникового диода;
- Исследование работы однополупериодного выпрямителя;
- Исследование работы мостового выпрямителя.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1 Полупроводниковый диод

Полупроводниковый прибор, который имеет один p - n -переход и два электрода, называется диодом.

Все полупроводниковые диоды можно разделить на две группы: выпрямительные и специальные. Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока. В зависимости от частоты и формы выпрямляемого тока они делятся на низкочастотные, высокочастотные и импульсные. Специальные типы полупроводниковых диодов используют различные свойства p - n -переходов, например явление пробоя, фотоэффект, наличие участков с отрицательным сопротивлением и другие. Такие диоды могут использоваться для стабилизации постоянного напряжения, регистрации оптического излучения, формирования электрических сигналов и т.д.

Выпрямительные полупроводниковые диоды изготавливаются, как правило, из кремния, германия или арсенида галлия.

Классификация диодов по конструкции:

- плоскостные;
- точечные.

Классификация диодов по технологии изготовления:

- сплавные;
- диффузионные;
- эпитаксиальные.

Плоскостные диоды имеют большую площадь p - n -перехода и используются для выпрямления больших токов (до 30 А). Точечные диоды имеют малую площадь p - n -перехода и предназначены для выпрямления малых токов (до 30 мА).

Обычно выпрямительный диод нормально работает при напряжениях, лежащих в диапазоне до 1000 В. При необходимости увеличения выпрямляемого напряжения используются выпрямительные столбы, состоящие из ряда последовательно включенных диодов. Такие столбы позволяют повысить выпрямляемое напряжение до 15000 В.

Полупроводниковые диоды большой мощности, предназначенные для выпрямления больших токов, называют силовыми. Как правило, их изготавливают из кремния или арсенида галлия, так как германий обладает сильной зависимостью обратного тока через p - n -переход от температуры.

Сплавные диоды обычно используются для выпрямления переменного тока с частотой до 5 кГц и изготавливаются из кремния. Кремниевые диффузионные диоды могут работать на частоте до 100 кГц. Кремниевые эпитаксиальные диоды с металлической подложкой (барьером Шоттки) могут использоваться на частотах до 500 кГц.

Импульсные диоды имеют малую длительность переходных процессов и используются для выпрямления сигналов с частотой до сотен мегагерц. Важным параметром импульсного диода является время восстановления его обратного сопротивления. Для повышения быстродействия импульсные диоды изготавливают в виде точечных структур.

Основные характеристики полупроводникового диода можно получить, анализируя его ВАХ. Зависимость тока I через p - n -переход от падения напряжения U на переходе описывается уравнением Эберса-Молла:

$$I = I_S(e^{U/\varphi_r} - 1), \quad (1)$$

где I_S – обратный ток насыщения диода, φ_r – тепловой потенциал.

Поскольку для полупроводниковых материалов при $T = 300$ К тепловой потенциал $\varphi_r = 25$ мВ, то уже при $U = 0,1$ В можно пользоваться упрощенной формулой:

$$I = I_S e^{U/\varphi_r}. \quad (2)$$

Важным параметром, характеризующим свойства диода, является дифференциальное сопротивление p - n -перехода, равное отношению приращения падения напряжения на диоде к приращению тока через диод:

$$r_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI}. \quad (3)$$

Дифференциальное сопротивление можно вычислить, используя выражения (2) и (3):

$$\frac{1}{r_{\text{диф}}} = \frac{dI}{dU} = \frac{1}{\varphi_r} (I + I_S) \text{ или } r_{\text{диф}} = \frac{\varphi_r}{I + I_S}. \quad (4)$$

При протекании большого тока через p - n -переход в объеме полупроводника падает значительное напряжение, пренебрегать которым нельзя. В этом случае уравнение Эберса-Молла приобретает вид:

$$I = I_S e^{(U-IR)/\varphi_r}, \quad (5)$$

где R – сопротивление объема полупроводникового кристалла, которое называют последовательным сопротивлением.

На рисунке 1, а приведено условное обозначение полупроводникового диода на электрических схемах, на рисунке 1, б – его структура. Электрод диода, подключенный к области p , называют анодом, а электрод подключенный к области n – катодом. Статическая вольтамперная характеристика диода показана на рисунке 1, в.

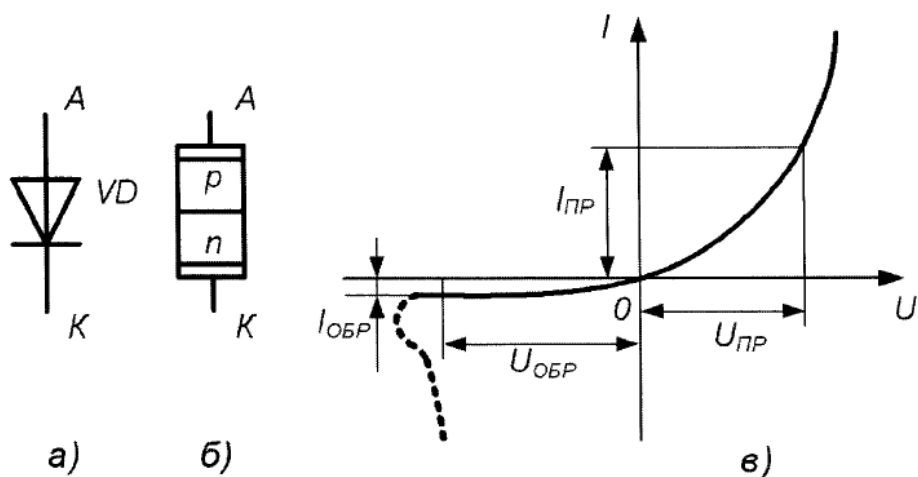


Рисунок 1 – Условное обозначение (а), структура (б) и статическая вольтамперная характеристика (в) полупроводникового диода

2 Однополупериодный выпрямитель

Выпрямителем называют устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное. Основное назначение выпрямителей заключается в сохранении направления тока в нагрузке при изменении полярности напряжения, приложенного ко входу выпрямителя. Существуют разновидности полупроводниковых выпрямителей, отличающиеся количеством диодов и схемой их включения.

Простейшим выпрямителем является схема однофазного однополупериодного выпрямителя, приведенная на рисунке 2.

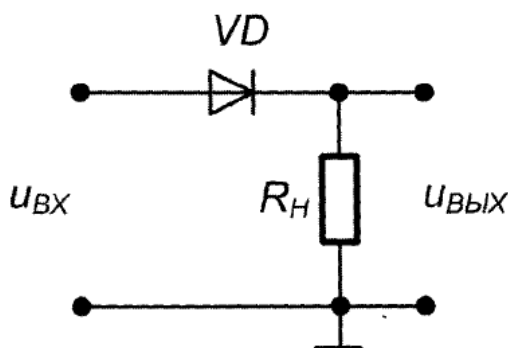


Рисунок 2 – Схема однофазного однополупериодного выпрямителя

Временные диаграммы, поясняющие работу однофазного однополупериодного выпрямителя приведены на рисунке 3.

Если входное напряжение изменяется по гармоническому закону $U_{\text{вх}} = U_m \sin(\omega t)$, то на интервале $0 < t < T/2$ полупроводниковый диод VD смещен в прямом направлении и напряжение и ток в нагрузочном резисторе повторяют форму входного сигнала.

На интервале $T/2 < t < T$ диод смещен в обратном направлении и выходное напряжение и ток в нагрузке равны нулю. В нечетные полупериоды входного напряжения выпрямленный ток создает на нагрузочном резисторе напряжение, среднее значение которого без учета падения напряжения на открытом диоде равно:

$$U_{\text{вых.ср.}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin(\omega t) dt = \frac{U_m}{\pi}. \quad (6)$$

Период сигнала на выходе однополупериодного выпрямителя равен периоду входного сигнала. Максимальное обратное напряжение на диоде равно амплитуде входного напряжения:

$$U_{\text{max}} = U_m. \quad (7)$$

Спектральный состав выпрямленного напряжения, полученный в результате разложения однополупериодных импульсов выпрямленного напряжения (рисунок 2, б) в ряд Фурье, имеет вид:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{\pi} U_m + \frac{1}{2} U_m \sin(\omega t) - \frac{2}{3\pi} U_m \cos(2\omega t) - \dots, \quad (8)$$

где $U_0 = \frac{1}{\pi} U_m$ – постоянная составляющая выпрямленного напряжения;

$u_1(t) = \frac{1}{2} U_m \sin(\omega t)$ – первая гармоника выходного напряжения;

$u_2(t) = \frac{2}{3\pi} U_m \cos(2\omega t)$ – вторая гармоника выходного напряжения.

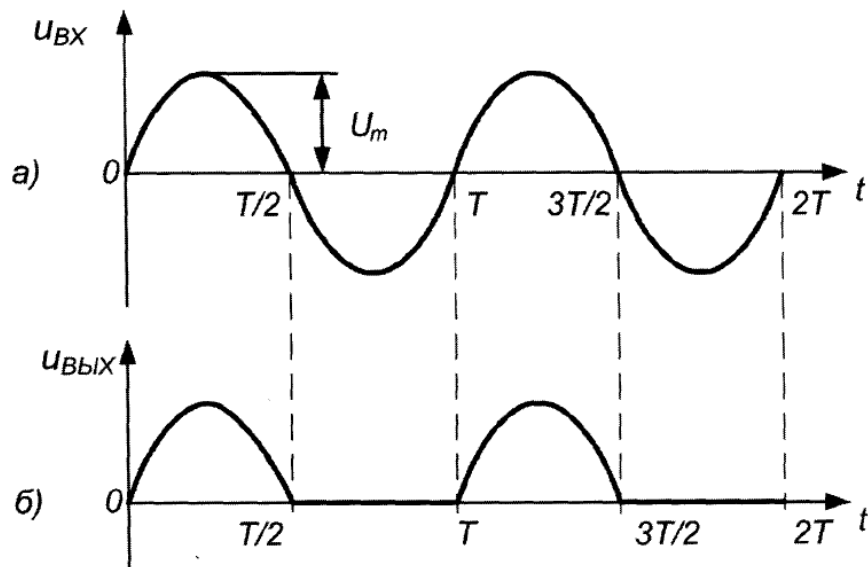


Рисунок 2 – Временные диаграммы напряжений на входе (а) и на выходе (б) однофазного однополупериодного выпрямителя

Коэффициент пульсации, определяемый отношением амплитуды низшей (основной) гармоники к среднему значению выпрямленного напряжения, для рассматриваемой схемы равен:

$$k = \frac{U_{m1}}{U_{\text{ВЫХ.ср.}}} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57. \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что однополупериодный выпрямитель имеет низкую эффективность из-за высокой пульсации выпрямленного напряжения, а потому находит ограниченное применение.

3 Мостовой выпрямитель

Анализируя работу однофазного однополупериодного выпрямителя, можно сделать вывод, что для улучшения характеристик выпрямителя нужно обеспечить протекание тока в нагрузочном резисторе в течение обоих полупериодов входного напряжения. Схема такого выпрямителя приведена на рисунке 3.

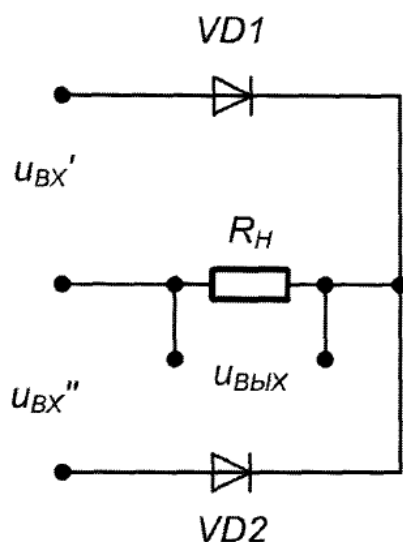


Рисунок 3 – Схема двухфазного двухполупериодного выпрямителя

Она представляет собой два параллельно соединенных однофазных однополупериодных выпрямителя которые питаются от двух источников первичного напряжения $U'_{\text{ВХ}} = U_m \sin(\omega t)$ и $U''_{\text{ВХ}} = U_m \sin(\omega t + \pi)$, имеющих противоположные фазы. Такая схема выпрямителя называется двухфазная двухполупериодная. Временные диаграммы, поясняющие работу этого выпрямителя приведены на рисунке 4.

На интервале $0 < t < T/2$ под действием напряжения $U'_{\text{ВХ}}$ диод VD1 смещен в прямом направлении и поэтому ток нагрузки определяется напряжением $U'_{\text{ВХ}}$. На этом же интервале VD2 смещен в обратном направлении и к нему прикладывается сумма напряжений $U_H + U''_{\text{ВХ}}$. В результате этого максимальное обратное напряжение запертого диода равно:

$$U_{\text{д.обр.}} = 2U_m. \quad (10)$$

На интервале $T/2 < t < T$ диод VD1 смещен в обратном направлении, а ток нагрузки под действием напряжения $U''_{\text{ВХ}}$ протекает через VD2, смещенный в прямом направлении.

Если не учитывать падение напряжения на открытых диодах выпрямителя, среднее значение напряжения на его выходе можно вычислить по формуле:

$$U_{\text{вых.ср.}} = \frac{2U_m}{\pi}. \quad (11)$$

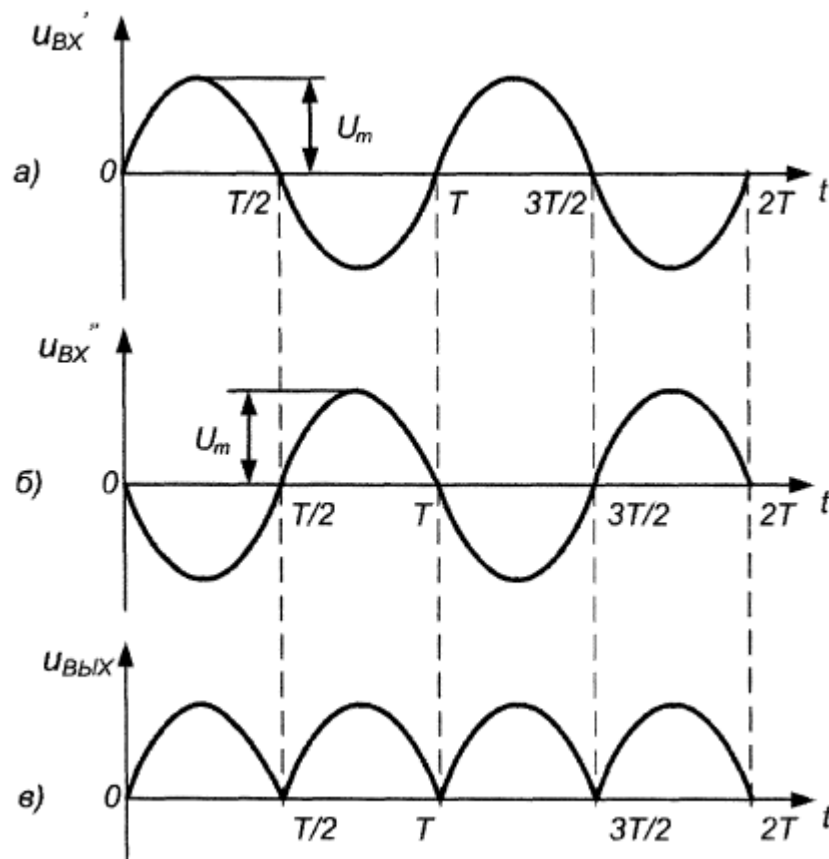


Рисунок 4 – Временные диаграммы напряжений на входе (а, б) и выходе (в) двухфазного двухполупериодного выпрямителя

Период сигнала на выходе двухполупериодного выпрямителя в два раза меньше, чем на его входе, т.е. первая гармоника в спектре выходного сигнала отсутствует. Амплитуда второй гармоники составляет:

$$U_{m2} = \frac{4U_m}{3\pi}. \quad (12)$$

Используя выражения (11) и (12), можно определить коэффициент пульсаций двухполупериодного выпрямителя:

$$k = \frac{U_{m2}}{U_{\text{вых.ср.}}} = \frac{2}{3} \approx 0,67. \quad (13)$$

Таким образом, эффективность двухполупериодного выпрямителя более чем в два раза выше, чем у однополупериодного.

К основным недостаткам рассмотренной схемы следует отнести:

- необходимость двух источников напряжения;
- высокой значение обратного напряжения, прикладываемого к диодам при обратном смещении.

Наиболее широкое практическое распространение получил однофазный мостовой выпрямитель, схема которого приведена на рисунке 5. В отличие от предыдущей схемы для работы мостового выпрямителя требуется только один источник входного напряжения. Временные диаграммы, поясняющие работу однофазного мостового выпрямителя, показаны на рисунке 6.

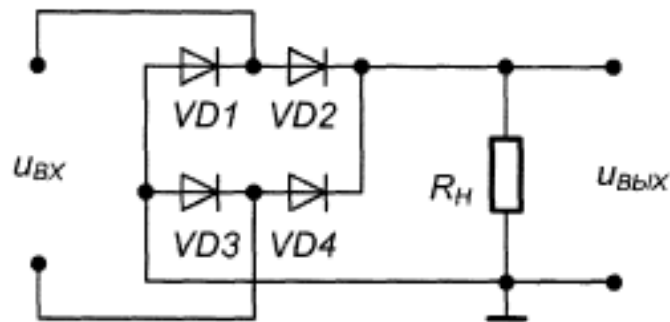


Рисунок 5 – Схема однофазного мостового выпрямителя

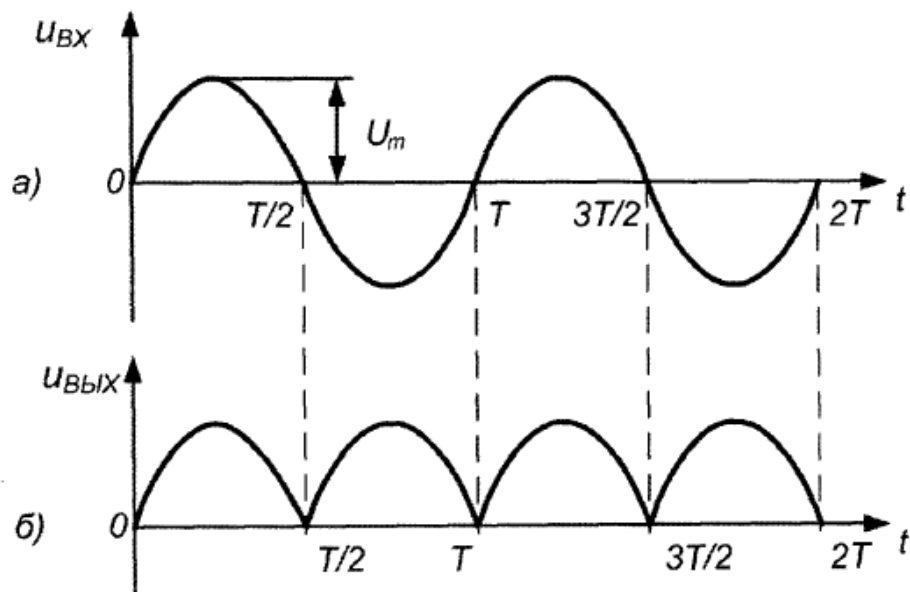


Рисунок 6 – Временные диаграммы напряжений на входе (а) и выходе (б) однофазного мостового выпрямителя

На интервале $0 < t < T/2$ входное напряжение $U_{вх} = U_m \sin(\omega t)$ смещает в прямом направлении включенные последовательно с нагрузкой диоды VD2 и VD3. При этом диоды VD1 и VD4 смещены в обратном направлении напряжением, приложенным к нагрузке. На интервале $T/2 < t < T$ входное напряжение смещает диоды VD1 и VD4 в прямом, а диоды VD2 и VD3 в обратном направлении. Из сказанного следует, что, как и в двухфазной двухполупериодной схеме, напряжение прикладывается к нагрузке в течение всего периода изменения входного напряжения.

Емкостной сглаживающий фильтр

Сглаживающий фильтр предназначен для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения на нагрузке. Он должен пропускать постоянную составляющую выпрямленного напряжения и ослаблять его гармонические составляющие.

Емкостной сглаживающий фильтр является наиболее простым и состоит из конденсатора C_Φ , включенного параллельно сопротивлению нагрузки (рисунок 7).

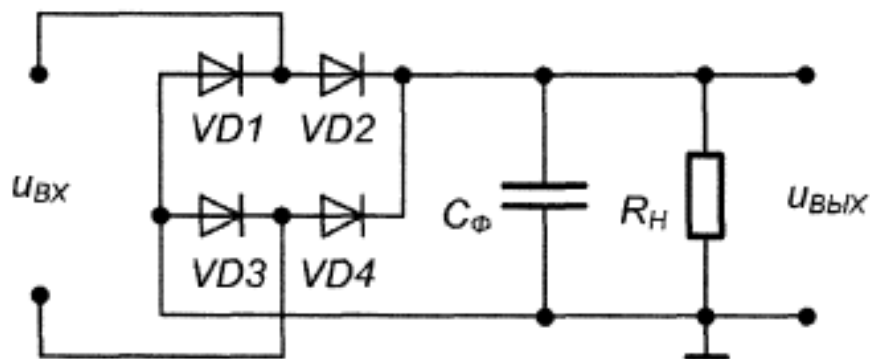


Рисунок 7 – Схема однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром

На рисунке 8 приведены временные диаграммы, поясняющие работу емкостного фильтра.

Будем считать, что в схеме выпрямителя используются идеальные диоды. у которых при смещении в прямом направлении сопротивление и падение напряжения равны нулю. Начиная с момента времени $t = 0$ мгновенное значение входного напряжения $U_{\text{вх}} = U_m \sin(\omega t)$ больше нуля, что приводит к открыванию диодов VD2 и VD3. Через эти диоды протекает ток, равные сумме тока нагрузки и тока заряда конденсатора:

$$i_{\text{вх}} = \frac{U_m}{R_H} \sin(\omega t) + C_\phi \omega U_m \cos(\omega t), \quad (14)$$

где U_m – амплитудное значение входного напряжения;

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота входного напряжения.

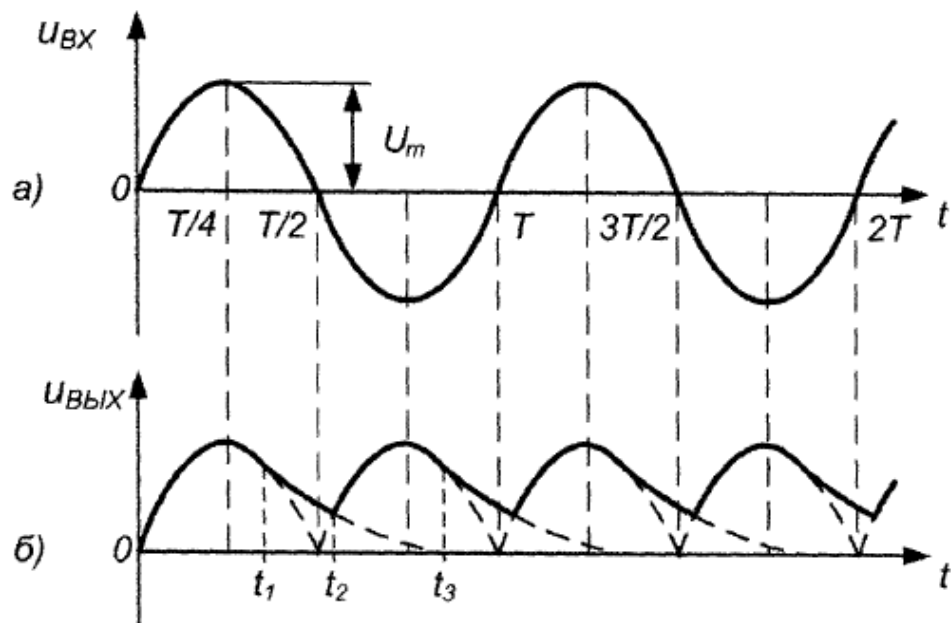


Рисунок 8 – Временные диаграммы напряжений на входе (а), выходе (б) однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром

До момента времени t_1 мгновенные значения напряжений $U_C = U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$ будут равны. После момента t_1 напряжение $U_{\text{вх}}$ становится меньше U_C . Это вызовет запираение ранее открытых диодов VD2 и VD3 и отключение нагрузки от входного напряжения. Далее до момента t_2 напряжение на нагрузке будет поддерживаться исключительно за счет электрического заряда, накопленного

в конденсаторе C_Φ до момента t_1 . Разряд конденсатора происходит до момента времени t_2 по экспоненциальному закону:

$$U_C = U_m \sin(\omega t_1) \exp\left[-\frac{(t - t_1)}{R_H C_\Phi}\right]. \quad (15)$$

В момент времени t_2 входное напряжение становится равным напряжению на конденсаторе и диоды VD1 и VD4 открываются. Начиная с момента t_2 и до момента t_3 конденсатор заряжается от источника входного напряжения. Далее описанные выше процессы заряда и разряда конденсатора периодически повторяются.

На рисунке 8 видно, что включение конденсатора C_Φ параллельно сопротивлению нагрузке приводит к снижению пульсаций выходного напряжения выпрямителя. Величину емкости конденсатора C_Φ на практике выбирают так, чтобы при заданном сопротивлении нагрузки выполнялось соотношение $\omega R_H C_\Phi > 1$, тогда напряжение на конденсаторе в фазе разряда спадает относительно медленно.

В установившемся режиме степень пульсации напряжения на выходе выпрямителя оценивается коэффициентом пульсации:

$$k = \frac{U_{\text{вых.мах}} - U_{\text{вых.мин}}}{U_{\text{вых.ср.}}}, \quad (16)$$

где $U_{\text{вых.мах}}$ – максимальное напряжение на выходе;

$U_{\text{вых.мин}}$ – минимальное напряжение на выходе;

$U_{\text{вых.ср.}}$ – средняя величина выходного напряжения.

Средняя величина выходного напряжения может быть определена с помощью выражения:

$$U_{\text{вых.ср.}} = \frac{1}{2\pi} \int_{t_1}^{t_3} U_{\text{вых}}(t) dt. \quad (17)$$

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1 Исследование ВАХ полупроводникового диода

1.1 Постройте прямую ветвь ВАХ полупроводникового диода (тип диода в соответствии с вариантом указан в таблице 2) в программе LTspice. Для этого подключите диод к источнику напряжения. В настройках симуляции выберите режим DC sweep. Необходимо указать название источника напряжения, пределы измерений (от 0 В), а также шаг напряжения. Полученную ВАХ занесите в отчёт.

1.2 Выберите две точки на ВАХ. Запишите значения токов и напряжений в этих точках в таблицу 1, внесите таблицу в отчёт.

Таблица 1

<i>N</i>	<i>I_д</i>	<i>U_д</i>
1		
2		

1.3 Рассчитайте сопротивление диода по формуле $R_{ст} = \frac{U_d}{I_d}$. Внесите полученное значение в отчёт.

Рассчитайте дифференциальное сопротивление диода по формуле $r_{диф} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$. Сравните полученный результат с паспортным значением (его можно найти в LTspice). Полученное значение и выводы запишите в отчёт.

1.4 По ВАХ определите напряжение изгиба. Напряжение изгиба определяется по прямой ветви характеристики для точки, где характеристика претерпевает резкий излом. Запишите значение в отчёт.

1.5 Постройте полную ВАХ диода, установив пределы напряжения от -10В до 10 В. Внесите полученную ВАХ в отчёт.

2 Исследование работы однополупериодного полупроводникового выпрямителя

2.1 Соберите схему однополупериодного выпрямителя в соответствии с рисунком 2. Установите амплитуду входного напряжения 10 В и частоту 50 Гц.

2.2 Для снятия осциллограммы запустите симуляцию в режиме Transient. Установите время симуляции так, чтобы сигнал был удобен для наблюдения. Получите осциллограммы напряжений на входе (источник напряжения) и выходе (нагрузка) выпрямителя. Полученные осциллограммы внесите в отчёт.

2.3 Определите по осциллограмме и запишите в отчёт максимальное мгновенное значение напряжения на выходе выпрямителя $U_{\text{вых.мах}}$.

2.4 Вычислите и запишите в отчёт средневывпрямленное значение напряжения на выходе выпрямителя. Используйте формулу $U_{\text{вых.ср}} = U_{\text{вых.мах}}/\pi$.

2.5 Измерьте максимальное обратное напряжение на диоде. Сравните периоды изменения сигналов на входе и выходе выпрямителя. Результаты и выводы запишите в отчёт.

3 Исследование работы однофазного мостового выпрямителя

3.1 Соберите схему мостового выпрямителя в соответствии с рисунком 5. Установите амплитуду входного напряжения 10 В и частоту 50 Гц.

3.2 Для снятия осциллограммы запустите симуляцию в режиме Transient. Установите время симуляции так, чтобы сигнал был удобен для наблюдения. Получите осциллограммы напряжений на входе (источник напряжения) и выходе (нагрузка) выпрямителя. Полученные осциллограммы внесите в отчёт.

3.3 Определите по осциллограмме и запишите в отчёт максимальное мгновенное значение напряжения на выходе выпрямителя $U_{\text{вых.мах}}$.

3.4 Вычислите и запишите в отчёт средневывпрямленное значение напряжения на выходе выпрямителя. Используйте формулу $U_{\text{вых.ср}} = 2U_{\text{вых.мах}}/\pi$.

3.5 Сравните периоды изменения сигналов на входе и выходе выпрямителя. Результаты и выводы запишите в отчёт.

4 Исследование работы однофазного мостового выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром

4.1 Соберите схему мостового выпрямителя в соответствии с рисунком 7. Установите амплитуду входного напряжения 10 В и частоту 50 Гц. Подберите конденсатор так, чтобы выполнялось условие $\omega R_H C_F > 1$.

4.2 Для снятия осциллограммы запустите симуляцию в режиме Transient. Установите время симуляции так, чтобы сигнал был удобен для наблюдения. Получите осциллограммы напряжений на входе (источник напряжения) и выходе (нагрузка) выпрямителя. Полученные осциллограммы внесите в отчёт.

4.3 Определите по осциллограмме и запишите в отчёт максимальное $U_{\text{вых.мах}}$ и минимальное $U_{\text{вых.мин}}$ значения напряжения на выходе выпрямителя. Запишите полученные значения в отчёт.

4.4 Определите среднее значение выходного сигнала. Для этого нажмите клавишу <Ctrl> и, удерживая её, щёлкните левой кнопкой мыши по названию нужного графика.

4.5 Вычислите коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя с емкостным фильтром по формуле:

$$k = \frac{U_{\text{вых.мах}} - U_{\text{вых.мин}}}{U_{\text{вых.ср}}}.$$

Сравните полученное значение с коэффициентом пульсаций двухполупериодного выпрямителя ($k \approx 0,67$). Выводы и полученные результаты запишите в отчёт.

4.6 Повторите действия, описанные в пунктах 4.1–4.5, увеличив частоту входного сигнала до 200 Гц. Сравните работу выпрямителя при разных частотах, результаты и выводы запишите отчёт.

4.7 Повторите действия, описанные в пунктах 4.1–4.5, увеличив емкость конденсатора в 10 раз. Сравните работу выпрямителя при разных емкостях конденсатора, сделайте выводы о влиянии емкости на его работу. Результаты и выводы внесите в отчёт.

4.8 Аналогичным образом исследуйте работу мостового выпрямителя при других формах сигнала: прямоугольной, треугольной и пилообразной. Это можно сделать, установив источник напряжения в режим генератора импульсов. Результаты занесите в отчёт.

ВАРИАНТЫ

Таблица 2 – Варианты задания

Вариант	Диод
1	1N4148
2	ES1D
3	GSD2004W-V
4	MMSD4148
5	MUR460
6	MURS120
7	MURS320
8	1N914
9	MMSD4148
10	MURS120