

MP1-19. 19.06.2020 пятница 1,2 группа 2-7.8.20.06.2020. суббота. 1.2. группа 2
3.4.

Каблуков.С.Г. kabiukovS@mail.ru

Лабораторная работа №8.9 Исследование полупроводниковых выпрямителей.

1. Цель работы:

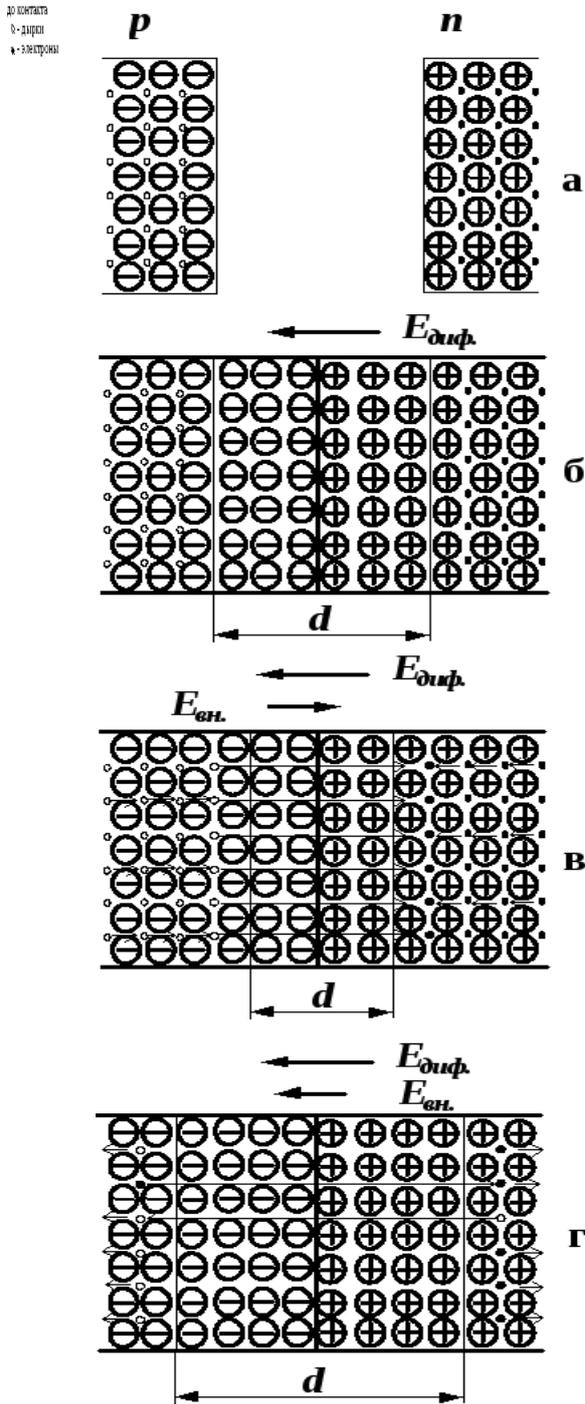
1. Изучить свойства маломощных полупроводниковых выпрямителей при одно- и двухполупериодном выпрямлении, путем снятия осциллограмм выпрямленного напряжения и измерения среднего амплитудного значения выпрямленного напряжения.
2. Изучить свойства С- и LC-фильтров при работе в схемах однофазного одно- и двухполупериодного выпрямителей путем снятия осциллограмм выпрямленного напряжения и измерения среднего и амплитудного значений напряжения.

2. Теоретическое введение

Если в кристалле полупроводника существуют области с различным типом проводимости, то граница между этими областями называется электронно-дырочным или $p-n$ переходом. При отсутствии внешнего напряжения основные носители заряда (электроны в n -области и дырки в p -области) диффундируют из области с одним типом проводимости в другую. Электроны, попадая в область с проводимостью типа p , становятся там неосновными носителями и рекомбинируют с дырками. Аналогично ведут себя дырки, попадая в область с проводимостью типа n . При уходе основных носителей в полупроводнике остаются нескомпенсированные ионы - положительно заряженные в полупроводнике типа n и отрицательно заряженные в полупроводнике типа p , которые лишены подвижности. Неподвижные разноименные заряды по обе стороны границы раздела создают электрическое поле, его называют диффузионным. Это поле препятствует дальнейшему переходу основных носителей, поэтому его называют потенциальным барьером. Обеднение области $p-n$ перехода основными носителями зарядов приводит к возрастанию сопротивления этой области, поэтому $p-n$ переход называется еще запирающим слоем (рис. 6.1,б).

Если к $p-n$ переходу подключить источник энергии положительным полюсом к p области (такое включение называется прямым), то электрическое поле, создаваемое этим источником внутри полупроводника, будет противоположно по направлению диффузионному, в результате чего большее количество основных носителей, чем при равновесном состоянии, перейдут через границу раздела. Так как скорость рекомбинации электронов и дырок конечна, основные носители, перешедшие через границу раздела, будут уменьшать толщину запирающего слоя (рис. 6.1,в) и его

сопротивление, в результате чего через $p-n$ переход потечет ток, величина которого будет очень быстро увеличиваться при возрастании приложенного напряжения.



контакт при отсутствии внешнего поля

d - толщина запирающего слоя

внешнее поле понижает потенциальный барьер, уменьшает толщину запирающего слоя

внешнее поле повышает потенциальный барьер, увеличивает толщину запирающего слоя

Рис. 6.1. Распределение носителей при контакте полупроводников с разным типом проводимости

Если источник энергии подключить положительным полюсом к n области (такое подключение называется обратным), то высота потенциального барьера увеличится, т.к. направление поля, создаваемого источником, будет совпадать с направлением диффузионного поля. Основные носители будут уходить от границы слоев (рис. 6.1,г), а сопротивление запирающего слоя расти. В этих условиях ток через контакт определяется только движением по направлению к контакту неосновных носителей, для которых поля источника энергии и диффузионное являются ускоряющими. Однако концентрация неосновных носителей обычно много меньше концентрации основных, поэтому ток в обратном направлении на много порядков меньше тока в прямом направлении, несмотря на то, что обратное напряжение может достигать нескольких сотен вольт. Следовательно, можно считать, что электронно-дырочный переход обладает односторонней проводимостью электрического тока.

Чрезмерное увеличение обратного напряжения приводит к пробоем $p-n$ перехода. Сущность пробоя заключается в том, что неосновные носители, двигаясь в сильном электрическом поле, могут приобрести энергию, достаточную для ударной ионизации нейтральных атомов полупроводника, в результате которой происходит умножение носителей в переходе и резкое увеличение обратного тока; $p-n$ переход теряет при этом свойство односторонней проводимости.

Существование в определенном диапазоне напряжений свойства односторонней проводимости позволяет рассматривать $p-n$ переход как нелинейный элемент, сопротивление которого меняется в зависимости от величины и полярности приложенного напряжения. При увеличении прямого напряжения сопротивление $p-n$ перехода уменьшается, при изменении полярности приложенного напряжения сопротивление $p-n$ перехода резко возрастает. Нелинейные свойства $p-n$ переходов лежат в основе работы полупроводниковых диодов или вентилях, которые используются в устройствах преобразования переменного тока в постоянный, называемых выпрямителями.

Основными электрическими параметрами вентилях, характеризующими их качество и возможность работы в том или ином устройстве, являются максимальный выпрямленный ток $I_{m \text{ выпр.}}$, максимальное допустимое обратное напряжение $U_{m \text{ обр. доп.}}$, амплитуда обратного тока при максимальном допустимом напряжении $I_{m \text{ обр.}}$, прямое падение напряжения при

максимальной величине выпрямленного тока $U_{пр.}$. Вентили высокого качества должны пропускать большой выпрямленный ток при малом падении напряжения в прямом направлении и малый обратный ток при высоком обратном напряжении.



Условное графическое изображение вентиля приведено на рис. 6.2.

Вывод вентиля, присоединенный к слою полупроводника с проводимостью типа p , маркируется знаком $+$ и называется анодным. Вывод вентиля, присоединенный к слою полупроводника с проводимостью типа n , называется катодным. Выпрямитель состоит из четырех основных элементов: силового трансформатора, который трансформирует напряжение сети до величины, необходимой для получения заданного напряжения постоянного тока на выходе выпрямителя; системы вентиляей, преобразующих переменный ток в постоянный; сглаживающего фильтра, который уменьшает пульсацию выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя; стабилизатора, который поддерживает неизменным напряжение на нагрузке при изменениях напряжения сети или сопротивления нагрузки. В зависимости от требований, предъявляемых к выпрямителю условиями работы нагрузки, сглаживающий фильтр и стабилизатор могут отсутствовать.

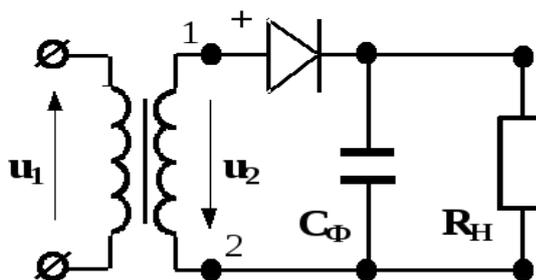


Рис. 6.3. Однополупериодный
выпрямитель

Простейшим однофазным выпрямителем является однополупериодный (рис. 6.3).

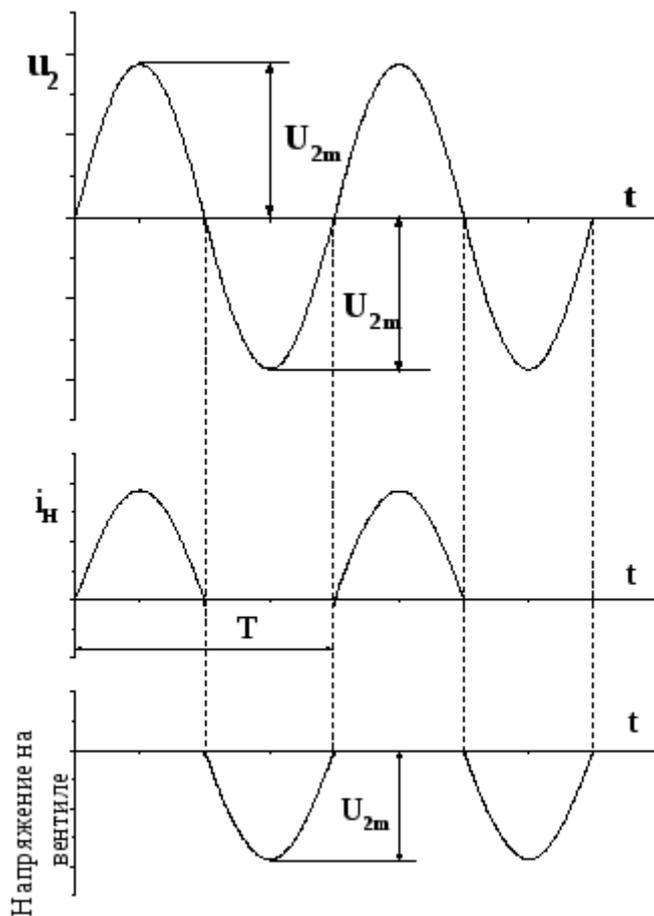


Рис. 6.4. Волновые диаграммы тока и напряжения при однополупериодном выпрямлении

Если клапан идеальный (его сопротивление в прямом направлении $R_{пр}=0$, а в обратном $R_{обр}=\infty$), то при синусоидально изменяющемся вторичном напряжении трансформатора u_2 , ток в резисторе R_n появится только в те полупериоды напряжения u_2 , когда потенциал точки 1 будет положителен относительно точки 2, т.к. при таком напряжении клапан открыт (рис. 6.3). Когда потенциал точки 1 относительно точки 2 отрицательный, клапан закрыт и ток в цепи вторичной обмотки трансформатора и в цепи нагрузки равен нулю. Таким образом, ток в резисторе пульсирует и появляется только в один из полупериодов напряжения u_2 .

Так как сопротивление клапана в прямом направлении $R_{пр}=0$, в положительный полупериод напряжения падение напряжения на клапане $u_{пр}=i_n \cdot R_{пр}=0$ и как следует из второго закона Кирхгофа для контура вторичной обмотки $u_2 = u_n$. В отрицательный полупериод напряжения u_2 , ток нагрузки $i_n=0$ (рис. 6.4) и, как вытекает из второго закона Кирхгофа для

контура вторичной обмотки трансформатора, $u_{\text{обр.}}=u_2$, а максимальное значение обратного напряжения $U_{\text{м.обр.}}=U_{2\text{м}}$. Выпрямители характеризуются средними выпрямленными значениями напряжений и токов, т.е. средними арифметическими значениями из всех их мгновенных значений за период:

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_{2\text{м}} \sin \omega t dt \quad (6.1)$$

После интегрирования получим:

$$U_{\text{cp}} = \frac{U_{2\text{м}}}{\pi} = 0,318 \cdot U_{2\text{м}} \quad (6.2)$$

Аналогично для тока:

$$I_{\text{cp}} = \frac{I_{2\text{м}}}{\pi} = 0,318 \cdot I_{2\text{м}} \quad (6.3)$$

Переходя от амплитудного значения напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора к действующему, будем иметь:

$$U_{\text{cp}} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,45 \cdot U_2 \quad (6.4)$$

Действующее значение выпрямленного тока - среднее квадратичное его значение за период, т.е.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_{2\text{м}}^2 \sin^2 \omega t dt} \quad (6.5)$$

т.к. ток во вторичной обмотке трансформатора и через вентиль протекает в течение только одного полупериода, верхний предел интегрирования будет равным $T/2$.

После интегрирования получим:

$$I = \frac{I_{2\text{м}}}{2} \quad (6.6)$$

Совместное решение уравнений (6.3) и (6.6) относительно (I) дает:

$$I = \frac{\pi}{2} \cdot I_{cp} = 1,57 \cdot I_{cp} \quad (6.7)$$

Электрические параметры выпрямителей определяют выбор вентиля для них. Выпрямители надежно работают только в том случае, когда параметры вентиля превышают параметры выпрямителей. Поэтому при подборе вентиля для выпрямителя необходимо, чтобы его максимальное допустимое обратное напряжение $U_{m.обр.доп.}$ (приводится в паспорте вентиля) было больше расчетного значения обратного напряжения, т.е. должно выполняться условие $U_{m.обр.доп.} \geq U_{m.обр.} = U_{2m}$, а с учетом соотношения (6.2):

$$U_{m.обр.доп.} \geq U_{m.обр.} = 3,14 U_{cp} \quad (6.8)$$

Необходимо также, чтобы максимальное значение выпрямленного тока вентиля (приводится в паспорте вентиля) было больше расчетного значения, т.е. должно выполняться условие:

$$I_{max.выпр.} \geq I = 1,57 \cdot I_{cp} \quad (6.9)$$

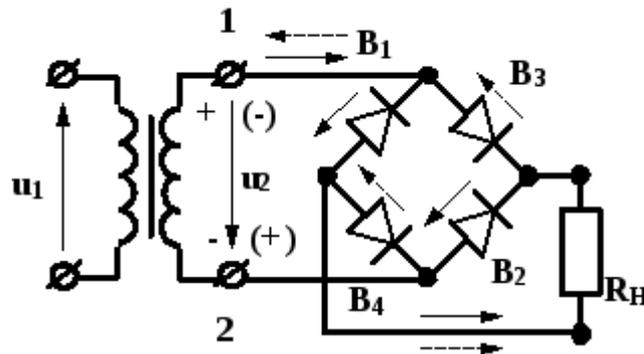


Рис. 6.5. Двухполупериодный
выпрямитель

Из рис. 6.4 видно, что напряжение на нагрузке достигает максимума один раз за период. Следовательно, частота пульсации напряжения на нагрузочном резисторе в однополупериодной схеме равна частоте источника энергии. Большая пульсация выпрямленного напряжения является одним из основных недостатков однополупериодного выпрямителя. Другим - недостаточное использование трансформатора по току, т.к. среднее значение выпрямленного тока, как видно из уравнения (6.7), значительно меньше действующего значения тока вторичной обмотки трансформатора.

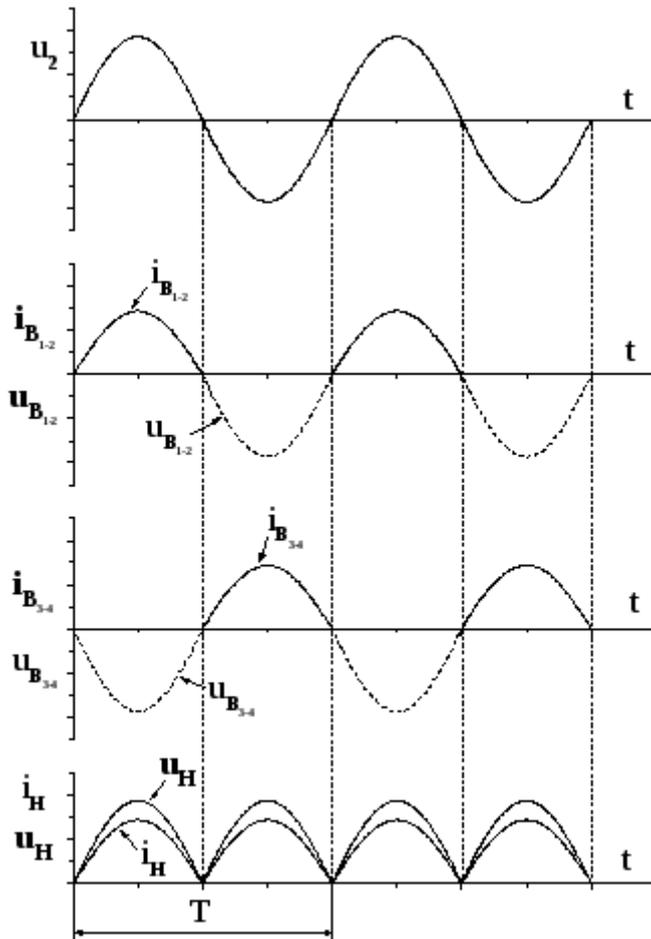


Рис. 6.6. Волновые диаграммы тока и напряжения при двухполупериодном выпрямлении

Указанных недостатков лишены двухполупериодные выпрямители, в которых используются оба полупериода напряжения источника энергии. Наиболее распространенная мостовая схема двухполупериодного выпрямителя приведена на рис. 6.5.

Здесь к одной диагонали моста, образованного вентилями V_1 - V_4 , подведено переменное напряжение, а к другой подключен нагрузочный резистор R_H . Когда потенциал точки 1 положителен относительно точки 2, вентили V_1 и V_2 открыты и в нагрузке возникает ток i_H (на схеме показан \longrightarrow). Вентили V_3 и V_4 в это время закрыты. Когда потенциал точки 1 отрицателен относительно точки 2 (на схеме полярность взята в скобки), вентили V_3 и V_4 открываются и в резисторе R_H протекает ток того же напряжения, что и в первом полупериоде рис. 6.6 (на схеме показан $- \longrightarrow$). Вентили V_1 и V_2 в это время закрыты.

Так как сопротивление проводящих вентиляей в прямом направлении $R_{пр}=0$, то в положительный полупериод напряжения u_2 , падения напряжения на них $u_{пр} = i_B R_{пр} = 0$ и из второго закона Кирхгофа для контура, образованного вторичной обмоткой трансформатора, проводящими вентилями (например V_1 и V_2) и нагрузочным резистором R_n , следует, что $u_n = u_2$. Такое же напряжение будет действовать на нагрузке и во второй полупериод, когда откроются вентили V_3 и V_4 . Очевидно, что среднее значение выпрямленного напряжения в случае двухполупериодного выпрямления будет в два раза выше по сравнению с однополупериодным, т.е.

$$U_{ср} = \frac{2U_{2m}}{\pi} = 0,636U_{2m} \quad (6.10)$$

Аналогичное выражение можно записать и для среднего значения выпрямленного тока:

$$I_{ср} = \frac{2I_{2m}}{\pi} = 0,636I_{2m} \quad (6.11)$$

Переходя от амплитудного значения напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора к действующему, будем иметь:

$$U_{ср} = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi} = 0,9U \quad (6.12)$$

Так как падение напряжения на проводящих вентилях равно нулю, то, как следует из второго закона Кирхгофа, для контура, образованного вторичной обмоткой трансформатора, проводящим вентилем (например V_1) и непроводящим вентилем (например V_4), непроводящий вентиль оказывается под напряжением u_2 , которое приложено в обратном направлении, а его максимальное значение $U_{м.обр.} = U_{2m}$.

Действующее значение тока, проходящего через каждый вентиль моста, можно определить совместным решением уравнений (6.6) и (6.11), т.к. каждое плечо моста можно рассматривать как однополупериодный выпрямитель:

$$I = \frac{\pi}{4} I_{ср} = 0,785 I_{ср} \quad (6.13)$$

При подборе вентиляей для работы в мостовых схемах так же, как и в однополупериодных, максимальное допустимое обратное напряжение $U_{м.обр.доп}$ должно быть больше расчетного значения обратного напряжения,

т.е. выполняться условие $U_{m.обр.доп} \geq U_{m.обр.} = U_{2m}$, а с учетом соотношения (6.10):

$$U_{m.обр.доп.} \geq U_{m.обр.} = \frac{\pi}{2} U_{cp} = 1,57 U_{cp} \quad (6.14)$$

Максимальное значение выпрямленного тока должно быть больше расчетного значения, т.е.

$$I_{max.выпр.} \geq I = 0,785 \cdot I_{cp} \quad (6.15)$$

Из рис. 6.6 видно, что напряжение на нагрузочном резисторе R_n достигает максимума два раза за период. Следовательно, частота пульсации напряжения на нагрузке в мостовой схеме равна удвоенной частоте сети.

Наличие значительных пульсаций выпрямленного напряжения у однофазных выпрямителей ухудшает работу потребителей. Например, при питании двигателей постоянного тока пульсирующим напряжением увеличиваются потери в двигателях. При питании радиоаппаратуры пульсация напряжения ухудшает ее работу, создавая на выходе усилителей фон.

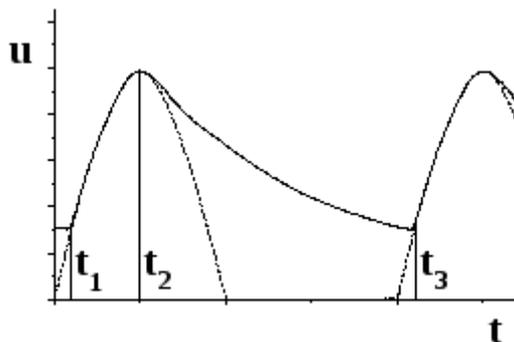


Рис. 6.7. Волновая диаграмма
напряжения при работе
емкостного фильтра

Для уменьшения пульсации напряжения у потребителя на выходе выпрямителя устанавливается специальное устройство, называемое сглаживающим фильтром, основное назначение которого уменьшить переменную составляющую выпрямленного напряжения. Простейшим фильтром является конденсатор большой емкости, включаемый параллельно приемнику выпрямленного напряжения. При таком включении конденсатор заряжается до амплитудного значения напряжения u_2 в моменты времени,

когда напряжение u_2 превышает напряжение на конденсаторе (интервал времени t_1-t_2 на рис. 6.7). В течение интервала времени t_2-t_3 напряжение $u_c > u_2$, клапан закрыт, а конденсатор разряжается через нагрузочный резистор R_n . С момента времени t_3 процесс повторяется. При включении емкостного фильтра напряжение u_n не уменьшается до нуля, а пульсирует в некоторых пределах, увеличивая среднее значение выпрямленного напряжения.

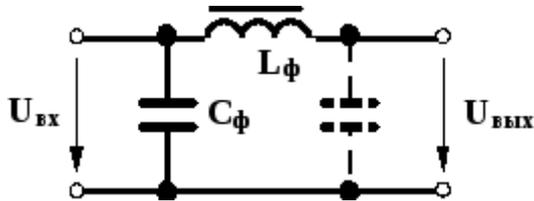


Рис. 6.8. Схема включения
многозвенного фильтра

Большее уменьшение пульсации напряжения обеспечивают Г-образные фильтры, представляющие собой простейшие смешанные LC фильтры (рис. 6.8). Уменьшение пульсации LC фильтром объясняется шунтирующим действием конденсатора $C_φ$ для переменной составляющей выпрямленного напряжения и значительным падением этой составляющей напряжения на катушке $L_φ$, которая называется дросселем. В результате доля переменной составляющей в выпрямленном напряжении резко снижается. Наряду с ослаблением переменной составляющей выпрямленного напряжения LC фильтр незначительно уменьшает и постоянную составляющую. Это происходит за счет падения напряжения на активном сопротивлении катушки. Если один Г-образный фильтр не обеспечивает необходимого уменьшения пульсации, последовательно включают несколько фильтров, например, Г-образный и емкостной фильтры, в совокупности дающие так называемый П-образный фильтр. На рис. 6.8 второй конденсатор П-образного фильтра указан пунктиром.

В реальных выпрямителях с ростом тока нагрузки выходное напряжение выпрямителя $U_{ср}$ уменьшается вследствие падений напряжения в активном сопротивлении обмоток трансформатора $I \cdot R_{тр}$ и последовательных элементах сглаживающего фильтра $I \cdot R_{ср}$, а также падения напряжения на вентилях $U_{np} = I \cdot R_{np}$. Нагрузочный ток и напряжение нагрузки U_n связаны между собой следующим выражением:

$$U_n = U_{xx} - I \cdot R_{тр} - I \cdot R_{ф} - I \cdot R_{np}, \quad (6.16)$$

где U_{xx} - напряжение холостого хода выпрямителя. Зависимость $U_n = f(I)$ называется внешней характеристикой выпрямителя и определяет границы

изменений тока, при которых выпрямленное напряжение не уменьшается ниже допустимой величины.

6. Контрольные вопросы

1. Начертите и поясните вольтамперную характеристику полупроводникового вентиля.
2. Введение каких элементов в кремний приводит к возникновению проводимости типа "n"?
3. Введение каких элементов в кремний приводит к возникновению проводимости типа "p"?
4. Начертите однофазную мостовую схему выпрямления и поясните ее работу.
- 5 В чем преимущество однофазного мостового выпрямителя перед однофазным однополупериодным?
- 6 Как уменьшить пульсацию напряжения на нагрузке?
- 7 Как влияет включение емкостного фильтра на величину выпрямленного напряжения?
- 8 Что называется внешней характеристикой выпрямителя, что она показывает, от каких факторов зависит величина выпрямленного напряжения?

Рекомендуемое время работы – 2 час.40 мин