

Теоретическая справка

Характеристики р-п-перехода

Контакт двух полупроводников с различными типами проводимости называется *р-п* - переходом. Он обладает очень важным свойством: сопротивление перехода зависит от направления тока, то есть приложенного напряжения. Такой контакт нельзя получить, прижимая друг к другу два полупроводника, поэтому *р-п* - переход создается в одной пластине полупроводника путем образования в ней областей с различными типами проводимости по сложной технологии добавления донорных и акцепторных примесей. В области *р-п*-перехода наблюдается значительный перепад концентраций носителей зарядов. Концентрация электронов в *n* - области значительно больше их концентрации в *p* - области. Вследствие этого происходит диффузия электронов из *n* - области в *p* -область. В *n* - области остаются неподвижные избыточные положительно заряженные ионы доноров. Одновременно происходит диффузия дырок из *p* -области в *n*- область. За счет этого приграничная *p* - область приобретает отрицательный заряд, обусловленный избыточными отрицательно заряженными ионами акцепторов. Эти прилегающие к переходу области образуют слой объемного заряда, обедненный основными носителями (рис. 4). Области объемного заряда с каждой стороны перехода имеют заряд, противоположный заряду основных носителей. В слое объемного заряда возникает контактное электрическое поле E_k , препятствующее дальнейшему переходу электронов и дырок из одной области в другую.

Контактное поле поддерживает состояние равновесия на определенном уровне. Под действием тепла небольшая часть электронов и дырок преодолевает контактное поле, создавая *ток диффузии*. Одновременно с этим под действием контактного поля неосновные носители заряда *p*- и *n*-областей (электроны и дырки) создают небольшой *ток проводимости*. В состоянии равновесия, при отсутствии внешнего напряжения эти токи взаимно компенсируются.

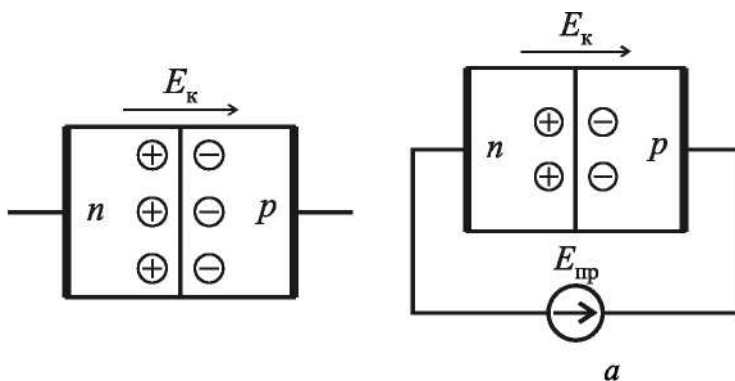


Рис. 4

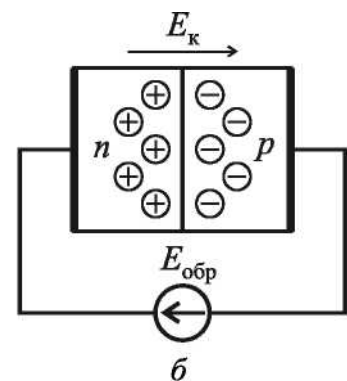


Рис. 5

Рассмотрим теперь случай, когда к p - n - переходу приложено внешнее напряжение. Сначала предположим, что напряжение имеет такую полярность, что p - области приложено положительное по отношению к n -области (рис. 5, а) напряжение. Такое напряжение называют *прямым*. Прямое напряжение уменьшает контактное поле. В результате возникает ток дырок из p - области и ток электронов из n - области. Результирующий перенос электронов и дырок в противоположных направлениях образует полный ток через переход. Требуется небольшое прямое напряжение (меньше 1 В), чтобы получить большие токи основных носителей зарядов.

Предположим теперь, что к p - n - переходу приложено напряжение противоположной полярности. Такое напряжение называют *обратным*. Обратное напряжение приводит к появлению внешнего поля, совпадающего по направлению с контактным полем E_k . В результате ширина обедненного слоя увеличится, и тока за счет основных носителей практически не будет. В цепи возможен лишь незначительный ток за счет неосновных носителей (обратный ток). Обратный ток p - n - перехода значительно, на несколько порядков, меньше прямого.

Таким образом, p - n - переход обладает ярко выраженной односторонней проводимостью (вентильными свойствами). Это отражает его вольт-амперная характеристика (рис. 6).

Заметим, что участки ВАХ в первом и третьем квадрантах имеют разный масштаб. Участок ВАХ правее точки — $U_{пр}$ описывается уравнением

$$I = I_0(e^{U/\varphi_T} - 1). \quad (1)$$

Здесь $\varphi_T = kT/e$ — температурный потенциал; k — постоянная Больцмана; T - абсолютная температура в градусах Кельвина; e - заряд электрона.

Ток I_0 называют *тепловым, или обратным, током насыщения*. Величина этого тока зависит от материала, площади p - n -перехода и от температуры. Обратный ток кремниевого перехода на 1-2 порядка меньше, чем германиевого.



Рис . 6

При комнатной температуре (20 °С) $\varphi_T = 25,2$ мВ. Для упрощения расчетов полагают, что при комнатной температуре $\varphi_T = 25$ мВ. Если прямое напряжение перехода $U > 0,1$ В, то $e^{U/\varphi_T} \gg 1$, и (1) можно записать в упрощенном виде:

$$I \approx I_0 e^{U/\varphi_T} \approx I_0 e^{40U} \quad (2)$$

В последнем равенстве учтено, что $\varphi_T = 25$ мВ.

Из равенства (2) следует, что прямое напряжение p - n - перехода

$$U = \varphi_T \cdot \ln(I / I_0)$$

Предположим, что при напряжении U_1 ток $I_1 = I_0 e^{U_1/\varphi_T}$, а при напряжении U_2 ток достигает величины $I_2 = I_0 e^{U_2/\varphi_T}$. Отношение токов

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{(U_2 - U_1)/\varphi_T}.$$

Прологарифмировав левую и правую части последнего равенства, получим

$$U_2 - U_1 = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \approx 2,3 \cdot \varphi_T \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right).$$

Из последнего равенства следует, что прямой ток p - n - перехода увеличивается в десять раз при изменении напряжения на величину, приблизительно равную $2,3 \varphi_T = 60$ мВ. На практике считают, что прямой ток p - n - перехода увеличивается в 10 раз при изменении напряжения на 0,1 В.

При отрицательных значениях напряжения, превышающих 0,1 В, $e^{U/\varphi_T} \rightarrow 0$ и ток диода $I = -I_0$. Обратный ток не изменяется, пока обратное напряжение не достигнет значения $U_{пр}$. Это так называемое *напряжение пробоя*, при котором наступает пробой p - n -перехода. После начала пробоя незначительное увеличение обратного напряжения сопровождается резким увеличением тока.

В основе пробоя p - n -перехода лежат следующие явления:

- 1) туннельный пробой (эффект Зенера);
- 2) лавинный пробой;
- 3) тепловой пробой.

Туннельный пробой наблюдается тогда, когда напряженность электрического поля такова, что становится возможным туннельный переход из валентной зоны полупроводника с электропроводностью одного типа в зону полупроводника с электропроводностью другого типа. Как правило, туннельный пробой наблюдается при напряжениях ниже 6 В.

Лавинный пробой обусловлен образованием носителей заряда из-за ударной ионизации атомов полупроводника. Если напряженность электрического поля достаточно велика, то электроны приобретают энергию, достаточную для того, чтобы выбивать другие электроны из атомов кристаллической решетки. Этот процесс приводит к быстрому (лавинному) нарастанию обратного тока.

Тепловой пробой происходит при нагреве перехода. За счет тепловой энергии происходит генерация пар электрон - дырка. Это приводит к увеличению обратного тока и дальнейшему увеличению температуры. Процесс нарастает лавинообразно и приводит к изменению структуры кристалла, выводя его из строя.

Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод - двухполюсный прибор, имеющий один p - n -переход. По функциональному назначению диоды делят на две группы: выпрямительные и специальные. Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока, используются вентильные свойства p - n -перехода. В специальных типах полупроводниковых диодов используют различные свойства p - n -перехода: явление пробоя, барьерную емкость перехода и т. д.

Упрощенная структура диода показана на рис. 7, а, а его условное графическое изображение - на рис. 7, б. Электрод диода, подключенный к p -области, называют *анодом* (А), а электрод, подключенный к n -области - *ка-*

тодом (К). Эти названия заимствованы у вакуумных диодов. Если анод положителен по отношению к катоду, то на диод подано прямое смещение; ток диода при этом называют *прямым*. При обратном смещении катод более положителен, чем анод. Обратный ток при этом ограничен малым током насыщения.

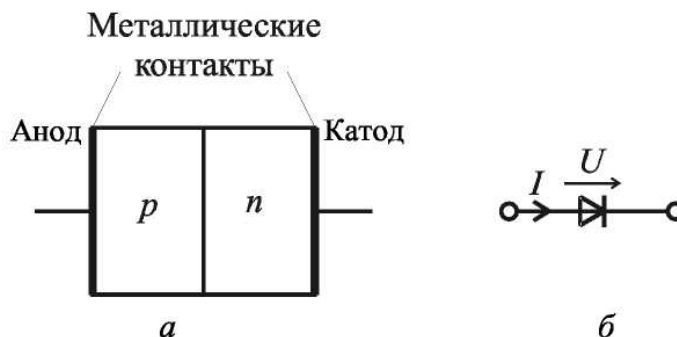


Рис. 7

Как правило, полупроводниковые диоды выполняют на основе несимметричных *p-n*-переходов. В этом случае в одной из областей концентрация примеси, определяющей вид проводимости, значительно больше, чем в другой области. Область с высокой концентрацией примеси называют *эмиттером*. Функции эмиттера может выполнять как катод, так и анод. Область с низкой концентрацией примесей называют *базой*. База имеет значительно большее объемное сопротивление, чем эмиттер.

Идеальная ВАХ диода описывается выражением (1). Величина обратного тока I_0 в формуле (1) зависит от типа полупроводника и размеров диода. Для маломощных приборов ток I_0 имеет порядок 10^{-15} А. Обратный ток кремниевых диодов на 1-2 порядка меньше, чем германиевых. Кроме того, обратный ток диода зависит от температуры. У кремниевых диодов он удваивается при увеличении температуры приблизительно на 7°C . На практике считают, что обратный ток кремниевых диодов увеличивается в 2,5 раза при увеличении температуры на каждые 10°C .

Прямая ветвь ВАХ диода отличается от идеальной из-за рекомбинации электронов и дырок в *p-n*-переходе, падения напряжения на базе. Уравнение ВАХ *p-n*-перехода с учетом падения напряжения на базе имеет вид

$$I = I_0(e^{(U - RI)/\varphi_T} - 1)$$

Здесь R - сопротивление базы диода.

Прологарифмировав левую и правую части последнего равенства, решим его относительно напряжения:

$$U = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) + RI \quad (3)$$

Для малых токов это выражение можно упростить:

$$U = \varphi_T \cdot \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) следует, что напряжение диода зависит от тока через него и имеет тем большее значение, чем меньше обратный ток I_0 . Поэтому у кремниевых диодов начальный участок прямой ветви ВАХ значительно более пологий, чем у германиевых. Напряжение на открытом кремниевом диоде равно 0,6-0,8 В, а на германиевом - 0,3-0,4 В.

Специальные типы диодов

Стабилитроны. Стабилитроном называют полупроводниковый диод, работающий в режиме управляемого лавинного пробоя. В зависимости от удельного сопротивления базы в стабилитроне может иметь место и туннельный, и лавинный, и смешанный пробой.

Стабилитроны изготавливают из кремния, обеспечивающего необходимую форму вольт-амперной характеристики. Германиевые диоды для стабилизации напряжения непригодны, так как электрический пробой у них легко переходит в тепловой.

Условное графическое изображение стабилитрона и его вольт-амперная характеристика показаны на рис. 8.

Прямая ветвь ВАХ стабилитрона имеет такой же вид, как и у типичного кремниевых диода. У стабилитронов рабочей является обратная ветвь ВАХ. Она имеет излом и вслед за ним — круто падающий линейный участок. Поэтому при изменении тока в широких пределах напряжение на приборе практически не изменяется. Это свойство стабилитрона позволяет использовать его в качестве стабилизатора напряжения.

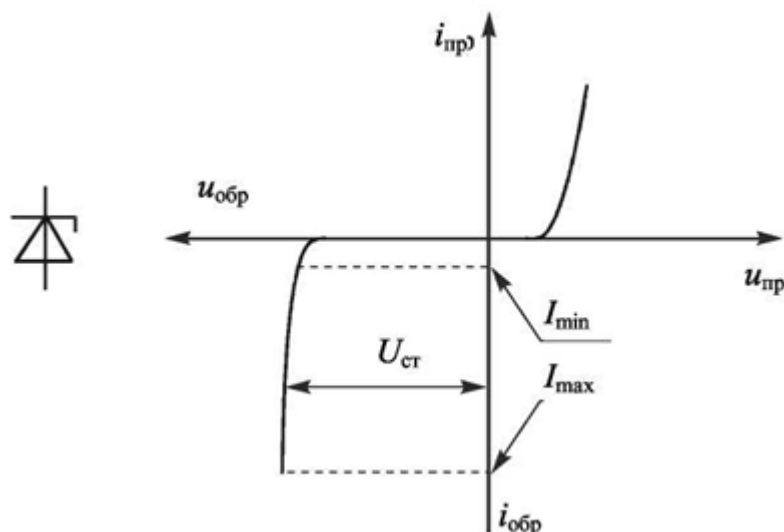


Рис . 8

Поскольку электрический пробой наступает при сравнительно низком обратном напряжении, мощность, выделяющаяся в р— n-переходе, будет небольшой, что предохраняет переход от теплового (необратимого) пробоя. Ток стабилитрона колеблется в пределах от единиц миллиампер до нескольких ампер. Рабочее напряжение стабилитрона, являющееся напряжением пробоя р— n-перехода, лежит в пределах от единиц до нескольких десятков вольт.

Основное применение кремниевых стабилитронов - стабилизация напряжения. При использовании двух стабилитронов можно получить стабилизацию напряжения положительной и отрицательной полярности (двуханодный стабилитрон).

Выпрямители

Выпрямители служат для преобразования переменного напряжения питающей сети в постоянное. Основными компонентами выпрямителей служат вентили - элементы с явно выраженной нелинейной вольтамперной характеристикой. В качестве таких элементов используют кремниевые диоды.

Рассмотрим выпрямители, которые используют в маломощных (до нескольких сотен ватт) источниках питания.

Простейшим является однополупериодный выпрямитель. Его схема дана на рис. 6. Напряжение и ток нагрузки имеют форму, показанную на рис. 7. Выходное напряжение меньше входного на величину падения напряжения на открытом диоде.

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{0 \text{ Вых}} = \frac{U_{m \text{ Вх}}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{Вх}}}{\pi} = 0,45 U_{\text{Вх}} \quad (1)$$

Здесь $U_{\text{Вх}}$ - действующее значение входного напряжения. С помощью формулы (1) по заданному значению напряжения $U_{0 \text{ Вых}}$ можно найти действующее значение и амплитуду входного напряжения выпрямителя.

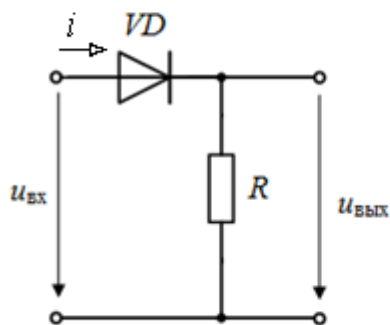


Рис. 6

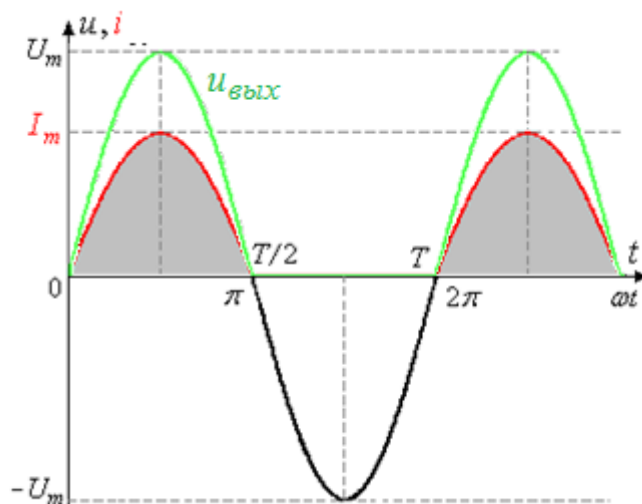


Рис. 7

Максимальное обратное напряжение на диоде

$$U_{\text{обр max}} \approx 2U_{\text{mvx}} .$$

Максимальный ток диода

$$I_{\text{Д max}} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{вх}}}{R_{\text{н}}} = \pi I_0$$

Важным параметром выпрямителя является коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения, равный отношению амплитуды первой (основной) гармоники выпрямленного напряжения к его среднему значению. Для однополупериодного выпрямителя коэффициент пульсаций

$$k_{\text{п}} = \frac{U_1}{U_0} = \frac{U_1}{U_{\text{вых 0}}} = \frac{\pi}{2} = 1,57.$$

Выпрямленное напряжение и ток в схеме на рис. 6 имеют большой уровень пульсаций. Поэтому на практике такую схему применяют в маломощных устройствах в тех случаях, когда не требуется высокая степень сглаживания выпрямленного напряжения.

Двухполупериодные выпрямители. Меньший уровень пульсаций выпрямленного напряжения можно получить в двухполупериодных выпрямителях. На рис. 8 показана схема выпрямителя с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора.

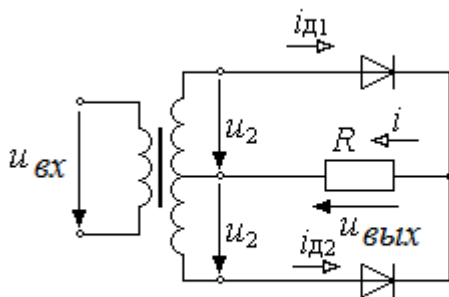


Рис. 8

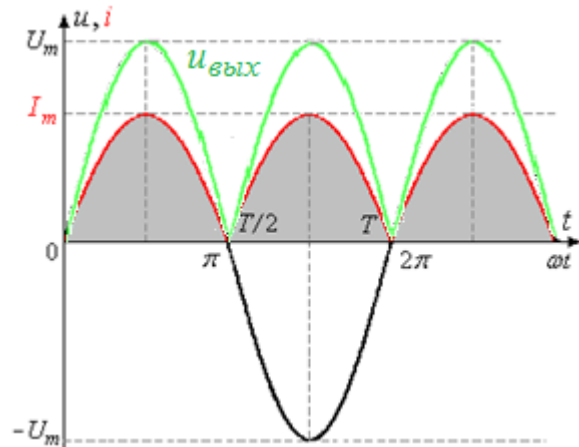


Рис. 9

Во вторичной обмотке трансформатора индуцируются напряжения $u_2 = \frac{u_{вх}}{2}$. Диоды проводят ток поочередно, каждый в течение полупериода. В положительный полупериод открыт диод VD_1 , а в отрицательный - диод VD_2 . Ток в нагрузке имеет одинаковое направление в оба полупериода, поэтому напряжение на нагрузке имеет форму, показанную на рис. 9. Выходное напряжение на рис. 9 меньше входного на величину падения напряжения на диоде.

В двухполупериодном выпрямителе постоянная составляющая тока и напряжения увеличивается вдвое по сравнению с однополупериодной схемой:

$$I = \frac{2I_m}{\pi}; \quad U_{\text{вых}} = \frac{2U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9U_2.$$

Из последней формулы определим действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора:

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{\text{вых}} \approx 1,1U_{\text{вых}}.$$

Коэффициент пульсаций в данном случае значительно меньше, чем у однополупериодного выпрямителя.

$$k_{\pi} = \frac{2}{3} = 0,67.$$

Так как ток во вторичной обмотке трансформатора двухполупериодного выпрямителя синусоидальный, а не пульсирующий, он не содержит постоянной составляющей. Тепловые потери при этом уменьшаются, что позволяет уменьшить габариты трансформатора.

Существенным недостатком схемы на рис. 8 является то, что к запертому диоду приложено обратное напряжение, равное удвоенной амплитуде напряжения одного плеча вторичной обмотки трансформатора:

$$U_{\text{обр}} \approx 2U_{2m}$$

Поэтому необходимо выбирать диоды с большим обратным напряжением. Более рационально используются диоды в мостовом выпрямителе. *Мостовая схема* двухполупериодного выпрямителя показана на рис. 10.

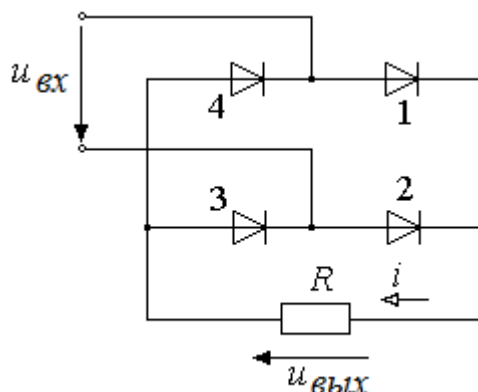


Рис. 10

Эта схема имеет такие же значения среднего значения напряжения и коэффициента пульсаций, что и схема выпрямителя с выводом от средней точки трансформатора. Ее преимущество в том, что обратное напряжения на диодах в два раза меньше. Кроме того, вторичная обмотка трансформатора содержит вдвое меньше витков, чем вторичная обмотка трансформатора в схеме на рис. 8. Часто все четыре диода размещают в одном корпусе.

Сглаживающие фильтры

Рассмотренные схемы выпрямителей имеют относительно большие значения коэффициента пульсаций. Между тем для питания электронной аппаратуры часто требуется выпрямленное напряжение с коэффициентом пульсаций, не превышающим нескольких процентов. Для уменьшения пульсаций используют специальные устройства - сглаживающие фильтры.

Простейшим является емкостный фильтр (С-фильтр). Рассмотрим его работу на примере однополупериодного выпрямителя (рис. 11).

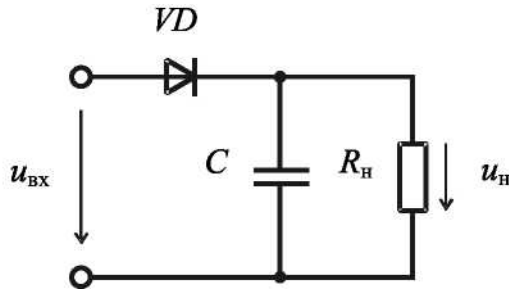


Рис. 11

Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения и тока происходит за счет периодической зарядки конденсатора C (когда напряжение на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение на нагрузке) и последующей его разрядки на сопротивление нагрузки.

Временные диаграммы напряжений выпрямителя с фильтром показаны на рис. 12. Для уменьшения пульсаций емкость конденсатора должна быть большой, чтобы постоянная времени разряда $R_n C$ была намного больше периода выпрямленного напряжения. Амплитуда пульсаций выпрямленного напряжения $u_{\text{вых}}$ определяется приближенной формулой

$$2\Delta U_{\text{н1}} = \frac{U_m}{f R_n C}.$$

Здесь f – частота входного напряжения.

Очевидно, что амплитуда пульсаций напряжения на выходе двухполупериодного выпрямителя оказывается в два раза меньше:

$$2\Delta U_{\text{н2}} = \frac{U_m}{2f R_n C}.$$

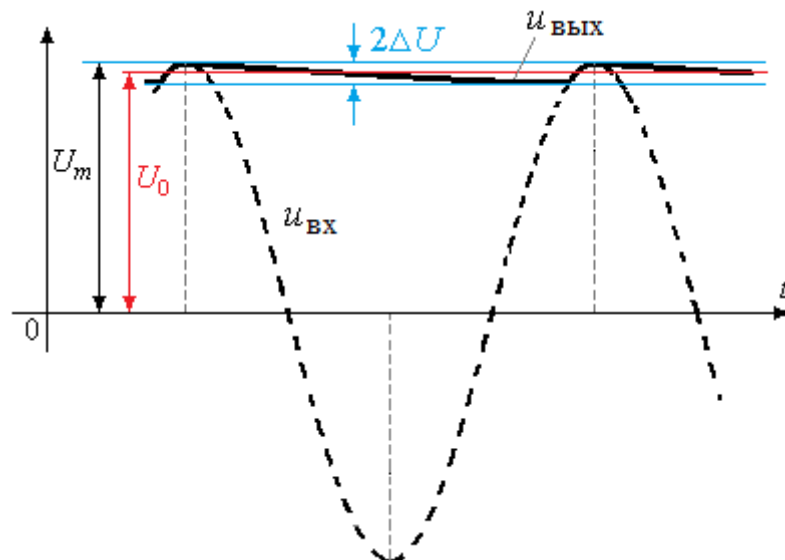


Рис. 12

Выводы

1. Для расчета цепей с диодами используют графические или графоаналитические методы (метод кусочно-линейной аппроксимации).

2. Простейшую модель диода можно получить, полагая прямое напряжение и обратный ток равными нулю. Такой элемент называют *идеальным диодом* (*идеальный вентиль, ключ*). Уравнение идеального диода имеет вид:

$$\begin{aligned} u &= 0, \quad i > 0; \quad R_{\text{д}} = 0 \\ i &= 0, \quad u < 0; \quad R_{\text{д}} \rightarrow \infty \end{aligned}$$

Вольт-амперная характеристика идеального диода образована двумя отрезками прямых, совпадающих с полуосями координат u, i .

3. Выпрямители служат для преобразования переменного напряжения питающей сети в постоянное. Основными компонентами выпрямителей служат вентили - элементы с явно выраженной нелинейной вольтамперной характеристикой. В качестве таких элементов используют кремниевые диоды.