**1. Полупроводниковый *p-n* переход и его свойства*.***

К полупроводниковым веществам относятся вещества, ко­торые при комнатной температуре имеют удельное сопро­тивление ρ больше, чем проводники (для металлов

), но меньше, чем непроводники (для диэлектри­ков



).



Электронно-дырочная проводимость обусловлена струк­турой кристаллической решетки некоторых веществ, напри­мер, кремния *(Si),* германия *(Ge)* - элементов четвертой группы периодической системы химических элементов им. Д.И. Менделеева.

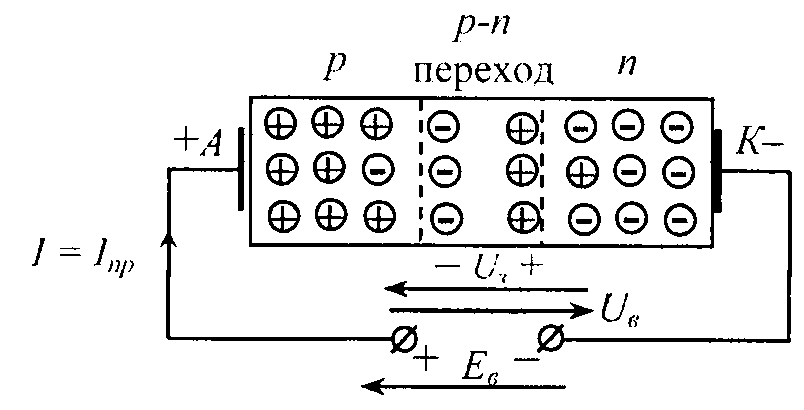
Кристаллическая решетка атомов *Si* включает электроны, образующие валентные связи. Если по каким-либо причинам из решетки будет "выбит" электрон, то на его месте образу­ется положительно заряженная "дырка". Такая дырка ведет себя подобно частице с элементарным положительным заря­дом. Электроны и дырки являются подвижными носителями зарядов, которые под действием разности потенциалов соз­дают ток в полупроводнике; при этом электроны будут дви­гаться к положительному электроду (аноду), а дырки - к от­рицательному (катоду).

Если в кристаллическую решетку *Si* ввести примесные атомы, то можно изменить соотношение между свободными электронами и дырками в кристалле. Например, если ввести в решетку *Si* пятивалентный атом фосфора *(Р),* то четыре его валентных электрона вступят в связь с четырьмя электрона­ми соседних атомов кремния, образуя устойчивую оболочку из восьми электронов. Девятый электрон может легко отры­ваться и становиться свободным. При этом атом фосфора превращается в неподвижный ион с единичным положитель­ным зарядом. Свободные электроны примесного происхож­дения добавляются к собственным свободным электронам, поэтому проводимость полупроводника делается преимуще­ственно электронной (основные подвижные носители тока – электроны) или *п-типа.*

Если в решетку *Si* ввести трехвалентный атом бора *(В),* то для образования устойчивой оболочки из восьми электронов потребуется дополнительный электрон, который может быть взят от соседнего атома кремния. При этом на месте изъятого электрона образуется дырка, а атом бора превращается в не­подвижный ион с единичным отрицательным зарядом.

Дырки, образованные примесными атомами, добавляются к собственным дыркам, поэтому проводимость полупровод­ника становится преимущественно дырочной (основные под­вижные носители тока – дырки) или *р-типа.*

При соединении полупроводников *р-* и *n-* типа идеальной прокладкой возникает пограничный слой или *р-п-переход,* который играет основную роль в полупроводниковых прибо­рах (рис. 1).



***Рис. 1.*** *Пространст­венное распределение зарядов в* ***р-п*** *переходе*

В пограничной области часть дырок (+) из *р-*слоя перейдёт в *n-*слой, оставляя в *p-*слое неподвижные отрицательные ио­ны (-) примеси, а часть электронов (-) из *n-*слоя перейдет в *p-*слой, оставляя в *n-*слое неподвижные положительные (+) ионы. Таким образом, в пограничном слое образуется "обед­нённый" электронами и дыркам запирающий слой, и возни­кает разность потенциалов между неподвижными примес­ными ионами *(Uз)* – запирающее напряжение. Возникающее между этими слоями электрическое поле – "потенциальный барьер" – препятствует дальнейшей диффузии свободных электронов и дырок через границу раздела и ток через *р-п-*переход прекращается.

Если ЭДС *Ев* приложена минусом к *р-*слою, а плюсом – к *n-*слою *(обратное включение),* то высота потенциального барьера увеличивается (результирующее напряжение, *Upn= Uз + Uв),* и ток через *р-п* переход не идёт, где *Uв* – падение напряжения на *р-п* переходе от внешнего источника *(Ев).* Ток в полупроводнике



При увеличении *Upn* прямой ток *Iпр* уменьшается до нуля, а обратный ток *Iобр* увеличивается до тока насыщения. Таким образом, *I = Iобр.*

Если ЭДС *Ев* приложена плюсом к *р-*слою*,* а минусом - к *n-*слою *(прямое включение),* высота потенциального барьера уменьшается: *.* Ток в полупроводнике: *,* где *Iпр –* прямой ток, образованный основными носите­лями заряда (дырки); *Iобр –* обратный ток, образованный не­основными носителями зарядов (электроны).

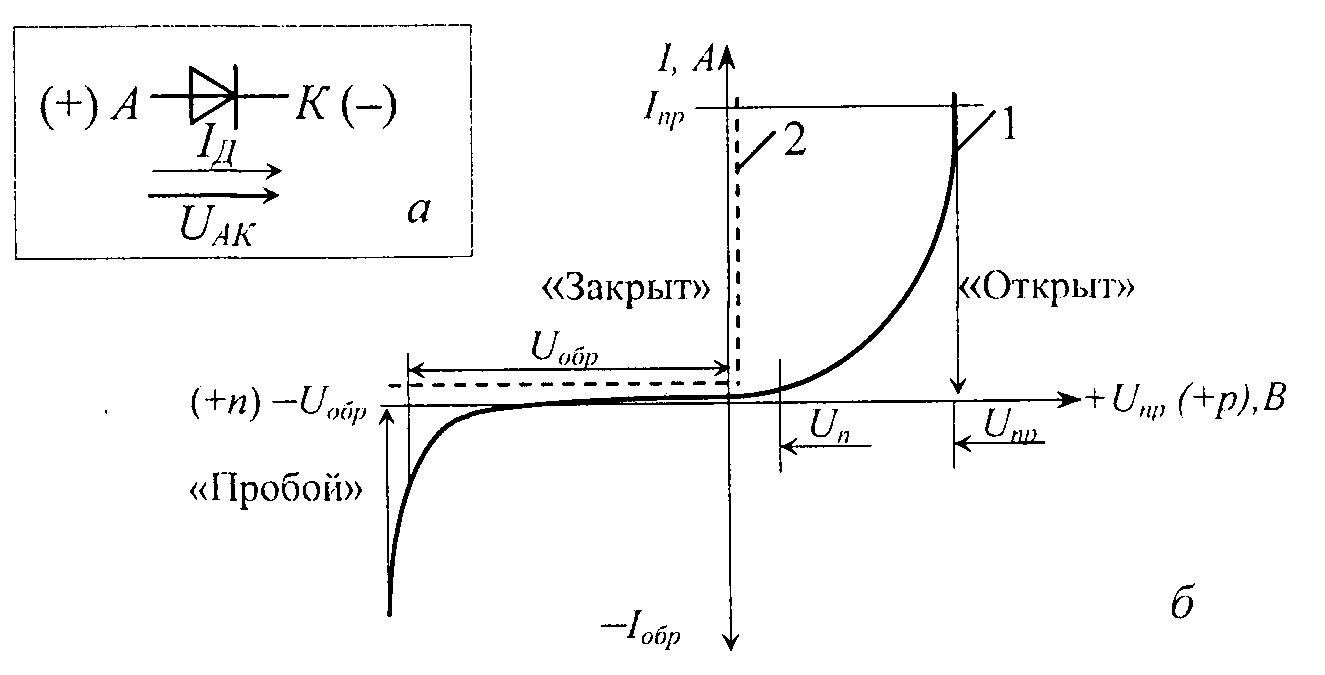


Через *р-п* переход потечет ток после преодоления потен­циального барьера (когда *Uз < Uв).* В идеальном *р-п* переходе электрический ток основных носителей может быть только одного направления (рис. 1.1). При уменьшении напряже­ния на *р-п* переходе *(Upn)* обратный ток *(Iобр)* уменьшается до нуля. Следовательно, при прямом включении ток образован основными носителями зарядов, т.е. *I=Iпр.*

На базе полупроводников *р-* и *n-*типа разработано боль­шое разнообразие полупроводниковых приборов, представ­ляющих собой комбинацию слоев с различной проводимо­стью. К ним относятся: диод *–* полупроводниковый прибор состоящий из двух слоев с *р-* и *n-* проводимостью и с одним *р-п* переходом, триод - трехслойный с двумя *р-п* переходами, тиристор - четырехслойный с тремя *р-п* переходами и т.д.

**2. Полупроводниковые диоды, их свойства и область применения.**

*Полупроводниковый диод –* прибор с одним *р-п* переходом, расположенный на границе раздела двух полупроводников с различными типами проводимости (электронной *n* и дыроч­ной *р),* и имеющий два вывода, которые называются анодом *А* и катодом *К* (рис. 2).



***Рис. 2.*** *Условное обозначение* ***(а)*** *и вольт-амперная характеристи­ка* ***(б)*** *диода общего назначения*

Диоды используются в электрических схемах для форми­рования тока одного направления (в схемах ограничения, выпрямления и логического преобразования электрического сигнала).

На рис. 2 изображены условное обозначение и вольт-амперная характеристика диода. Вольт-амперная характери­стика диода *–* это зависимость тока через диод *IД* от напря­жения между анодом *(А)* и катодом *(К)* диода *Uak* (кривая 1).

Характерные точки на графике: *Un –* начало резкого воз­растания тока после преодоления потенциала *р-п* перехода (рис. 1). Для германиевого *(Ge)* диода *Un* составляет 0,2-0,4 В, а для кремниевого *(Si)* диода – 0,4-0,8 В; *Iпр* – средний прямой ток через диод; *Unp* – падение напряжения на диоде при *Iпр; Uобр* – максимально допустимое обратное напряже­ние, при превышении которого происходит разрушение ("пробой") диода; *Iобр* – обратный ток через диод при *Uобр.*

Сопротивление диода *Rд* на участке *U >Un* составляет ме­нее 0,8-0,1 Ом, а на участке от *0* до *Uобр*достигает 105-106 Ом и более.

Состояние диода зависит от знака приложенного напря­жения: на участке от *0* до + *Unp* вольт-амперной характери­стики диод "открыт"; на участке от *0* до – *Uобр*диод "закрыт" для тока в направлении от анода к катоду.

При анализе электрических цепей в ряде случаев доста­точно знать "открыт" или "закрыт" диод для тока в ветви электрической цепи, содержащей данный диод. Состояние диода определяется напряжением на аноде *Ua* и катоде *Uк* диода:

а) если *Ua > Uк,* то диод "открыт", сопротивление мало.  
б) если *Ua < Uк,* то диод "закрыт", сопротивление велико. Для диодов *Ro6p >> Rnp.*



Часто при анализе цепей принимают сопротивление ,.В этом случае вольт-амперная характеристика «идеального диода» представлена на рис. 2 пунктиром (ломаная линия 2).



Основными характеристиками полупроводниковых дио­дов являются: номинальный прямой ток (среднее значение тока) *Iн;* максимально допустимый прямой ток *Iт;* номиналь­ное падение напряжения *ΔUн* на диоде, соответствующее но­минальному прямому току вентиля; допустимое обратное напряжение *Uобр.н;* обратный ток вентиля *Iо6р,* при *Uобр.m* и температуре +20 С.

**3. Принцип действия транзистора.**

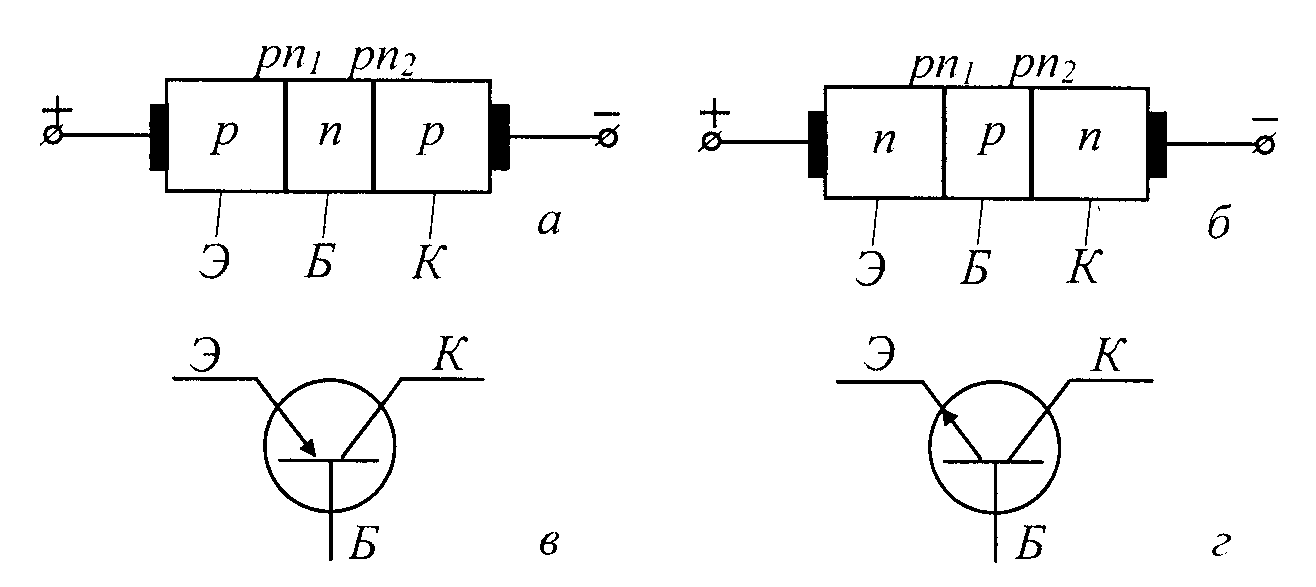
*Транзистор -* трехслойный *(р-п-р* или *п-р-п)* полупровод­никовый прибор с двумя *р-п* переходами, имеющий три вы­вода. Транзистор в электрических цепях постоянного тока является управляемым нелинейным элементом с управлени­ем током одного направления.

Среди большого разнообразия видов транзисторов наи­большее распространение получили *биполярные* и *полевые* транзисторы, которые различаются способом управления то­ком, протекающим через транзистор.

***Принцип работы биполярного транзистора.***

*Биполярные транзисторы* представляют собой тонкую пластинку слаболегированного германия или кремния с элек­тронной или дырочной проводимостью, на которой методом вплавления или диффузии получены два электронно-дырочных перехода.

Биполярные транзисторы (или просто транзисторы) имеют три вывода: коллектор *К,* базу *Б* и эмиттер Э (рис 3). В за­висимости от комбинации *р-п* перехода транзисторы делятся на два типа: *р-п-р* и *п-р-п.*



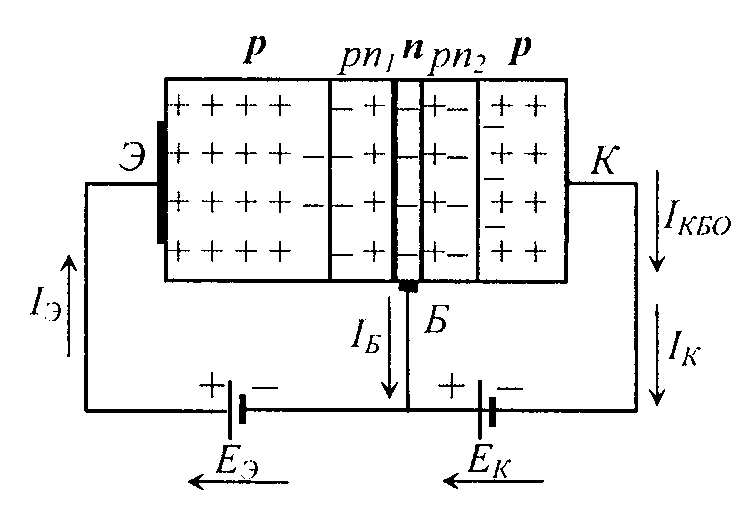
***Рис. 3.*** *Схема транзисторов типа* ***р-п-р*** *с прямой* ***(а)*** *и* ***п-р-п*** *с обрат­ной (б) проводимостями и их условные обозначения для* ***р-п-р («) и*** *для* ***п-р-п (г): Э -*** *эмиттер;* ***Б -*** *база;* ***К -*** *коллектор;* ***рпt -*** *открытый* ***р-п*** *пе­реход;* ***рп2 -*** *закрытый* ***р-п*** *переход.*

При соединении полупроводников с различным типом проводимости на границе раздела образуется область, обед­нённая носителями тока *{запирающий слой).* Наличие трёх полупроводников в плоском триоде приводит к образованию двух запирающих слоев по обе стороны среднего полупро­водника *(рт* и *pni).* Таким образом, полупроводниковый триод в отличие от диодов содержит два электронно-дырочных перехода.

Устройство германиевого биполярного транзистора типа *р-п-р* показано на рис. *3,а.* В кристалл германия с элек­тронной проводимостью с двух сторон вплавлены кусочки индия, образующие области кристалла с дырочной проводи­мостью. Кристалл с электронной проводимостью имеет неинжектирующий вывод и называется *базой* транзистора. Об­ласть кристалла с дырочной проводимостью с *п-р* переходом малой площади называется *эмиттером,* а переход соответ­ственно называется эмиттерным *п-р* переходом. Область кристалла с дырочной проводимостью и *п-р* переходом большой площади называется *коллектором,* а переход назы­вается коллекторным. Условное обозначение транзистора типа *р-п-р* в электронных схемах показано на рис. *3, в*.

Биполярный транзистор типа *п-р-п* (рис. *3,а)* отличает­ся от транзистора типа *р-п-р* тем, что основной кристалл, об­разующий базу транзистора, имеет дырочную проводимость, а благодаря вплавлению или диффузии создаются у поверх­ности области кристалла, имеющие электронную проводи­мость. Условное обозначение транзистора типа *п-р-п* показа­но на рис. *3, г*.

Обе разновидности транзистора отличаются только типом основных носителей заряда и полярностью внешних напря­жений. Принцип действия у них один и тот же. Поясним его на примере транзистора типа *р-п-р,* включение которого в цепь источников питания показано на рис. 4.



***Рис. 4.*** *Принцип действия транзистора типа* ***р-п-р.***

Для того чтобы полупроводниковый триод усиливал вход­ной сигнал, его надо соединить с двумя внешними источни­ками тока так, чтобы один электронно-дырочный переход был включен в пря­мом направлении, а второй - в обратном (рис. 4.).

Переход, вклю­чаемый в прямом на­правлении, называют *эмиттерным,* а переход, включаемый в обратном направлении - *коллекторным.*

Источник ЭДС *Ек* выходной цепи транзистора включен между коллектором и базой в непроводящем направлении, поэтому коллекторный *п-р* переход закрыт и через него про­ходит только небольшой тепловой ток *IКБО,* обусловленный дрейфом через коллекторный переход неосновных носителей зарядов: электронов (-) из коллектора в базу и дырок (+) из базы в коллектор.

Если во входную цепь транзистора включить в прямом направлении источник *Еэ,* то эмиттерный *п-р* переход откро­ется и через него в обоих направлениях пойдут основные но­сители зарядов: электроны из базы в эмиттер и дырки из эмиттера в базу через открытый *рп1* переход.

Поскольку дырки в базе являются неосновными носите­лями зарядов, а ширина базы меньше диффузионной длины, на которую успевают продвинуться дырки до рекомбинации (нейтрализации) с электронами, то подавляющее большинст­во дырок, инжектированных из эмиттера в базу, создадут диффузионный ток в направлении к коллекторному *п-р* пере­ходу и там, попадая в электрическое поле закрытого коллек­торного перехода, создадут дрейфовый ток, вызывая резкое увеличение коллекторного тока. В силу закона электриче­ской нейтральности заряды дырок, прошедших из эмиттера через базу в коллектор, будут компенсированы свободными электронами, приходящими в коллектор из внешней цепи и создающими в ней ток коллектора *IК.*

Электроны, являющиеся основными носителями зарядов в базовой области транзистора, под действием электрического поля источника ЭДС *Еэ* пройдут через эмиттерный *п-р* пере­ход и создадут ток базы транзистора

Одной из характеристик транзистора является коэффици­ент передачи по току *а* = (при *U=const).*Как правило, *а* = 0,92-0,99.

Если не учитывать очень малый по величине тепловой ток коллектора *Iкбо,* томожно в соответствии с первым законом Кирхгофа написать:



откуда

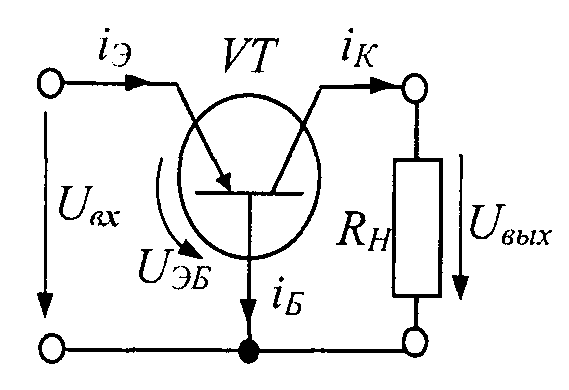


или



**4. Схема включения транзистора с общей базой.**

***Схема с общей базой «ОБ»*** (рис. 5) названа так потому, что базовый электрод транзистора *VT* является общим для входной и выходной цепей транзистора. В схеме с общей ба­зой входной ток равен току эмиттера *IЭ,* который обычно на один-два порядка больше тока базы *IS,* поэтому входное со­противление транзистора мало. Усиление по току отсутству­ет, так как *IК<IЭ.*



***Рис. 5.*** *Схема включения транзистора с общей базой;* ***(RH -*** *сопротивление нагрузки,* ***Rx -*** *со­противление между эмиттером и базой)*

*Коэффициент усиления по току:*



Усиления по току не происходит, так как *Кi<* 1.

*Коэффициент усиления по напряжению:*



Определим *Rвх:*



Усиление по напряжению происходит, так как *Ku* >1.

*Коэффициент усиления по мощности:*

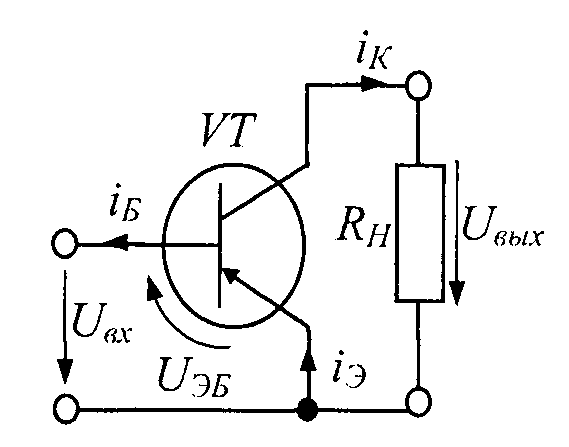


Усиление по мощности происходит, так как *КP*>1.

Схема с общей базой применяется в некоторых усилите­лях сигналов с трансформаторной связью между каскадами. Недостатком схемы является трудность согласования боль­шого выходного сопротивления предыдущего каскада с ма­лым входным сопротивлением последующего каскада.

**5. Схема включения транзистора с общим эмиттером.**

***Схема с общим эмиттером «ОЭ»*** (рис. 6) является наиболее распространенной схемой включения транзистора. Во входной цепи протекает сравнительно маленький ток базы *iБ,* поэтому входное сопротивление транзисторов *VT* в схеме с ОЭ достаточно велико.



***Рис. 6.*** *Схема включения транзистора с общей эмиттером;* ***(RH -*** *сопротивление нагрузки,* ***Rx -*** *со­противление между эмиттером и базой)*

Выходное сопротивление меньше, чем в схеме с общей базой, что позволяет осуществить согласование между кас­кадами усилителя без применения согласующих трансформаторов.

*Коэффициент усиления по току:*



Ток в схеме с общим эмиттером усиливается, так как *Ki>*1*.*

*Коэффициент усиления по напряжению:*



Определим *Rвх:*



так как



так как *RH >>RЭБ,* то напряжение в схеме с общим эмитте­ром усиливается, *Ки>*1*.*

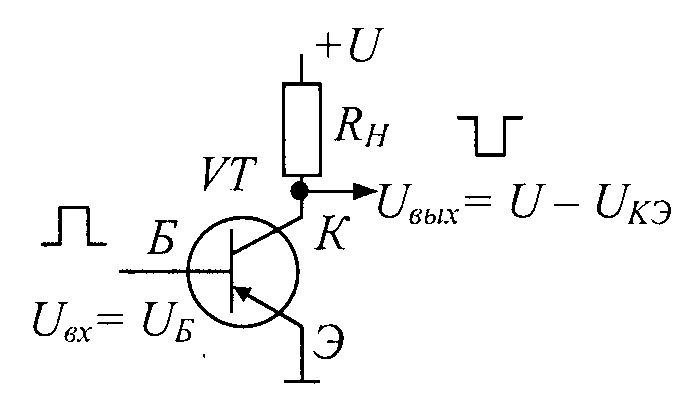
*Коэффициент усиления по мощности:*



Мощность также усиливается, так как *КP>*1*.*

Схема с «ОЭ» широко применяется в усилительных кас­кадах, так как усиливаются ток, напряжение и мощность.

Схема с общим эмиттером «ОЭ», называемая также "уси­лителем напряжения" или "инвертором", изображена на рис. 7.



***Рис. 7.*** *Схема с общим эмиттером (инвертор)*

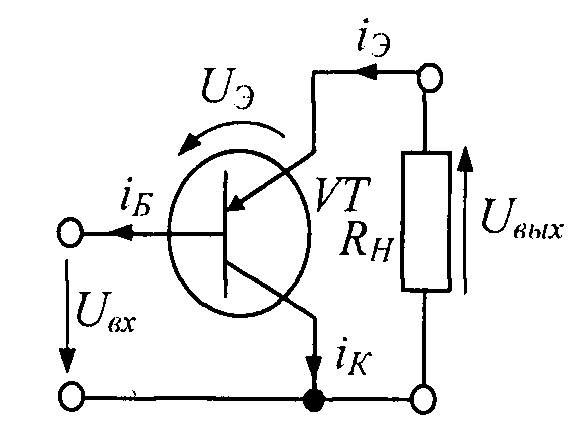
В данной схеме эмиттер соединён с землёй, поэтому изме­нение напряжения на базе от 0 до 0,4 В (что то же самое, что и изменение *UБЭ)* приведёт к изменению выходного напря­жения на коллекторе транзистора *Uk* от *+U* до -0 В.

Усилителем напряжения эту схему называют потому, что коэффициент усиления входного сигнала *Ки >>1.* Типовое значение *Ки* составляет 30 ÷ 120.

Если на вход инвертора подать электрический сигнал в виде прямоугольного импульса, то на выходе получим также прямоугольный импульс, но "перевёрнутый" на 180°.

**6. Схема включения транзистора с общим коллектором.**

***Схема с общим коллекторам «ОК»*** (рис. 8) отлича­ется малым выходным сопротивлением, так как в выходной цепи течет ток эмиттера *iЭ.* Входное сопротивление большое, так как входным является ток базы. Схема с общим коллекто­ром, называемая «эмиттерным повторителем», применяется в усилителях в качестве согласующего элемента между нагруз­кой с малым сопротивлением и выходом предыдущего каска­да, обладающим большим выходным сопротивлением. Усиле­ния по напряжению транзистор в схеме с общим коллектором не даёт.



***Рис. 8.*** *Схема включения транзистора с общей коллектором;* ***(RH -*** *сопротивление нагрузки,* ***Rx -*** *со­противление между эмиттером и базой)*

*Коэффициент усиления по току:*



Усиление тока происходит, так как *Кi>*1*.*

*Коэффициент усиления по напряжению:*



Определим *Rвх* из второго закона Кирхгофа для замкнутой цепи (рис. 8):



откуда:



так как *RЭБ<<RН, то*



Напряжение в схеме с «ОК» не усиливается, так как *Ки=*1*.* Схема работает как согласующий усилитель.

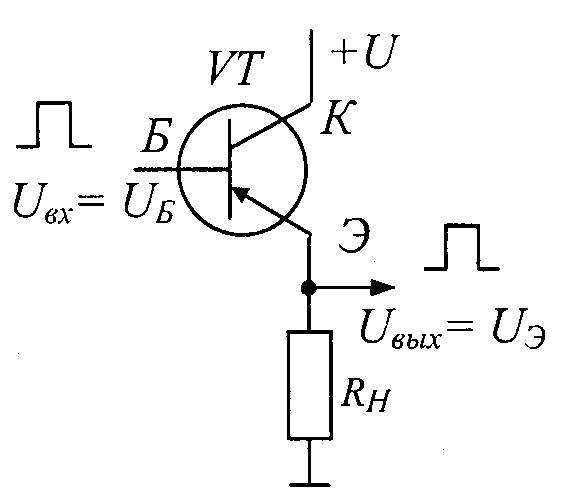
*Коэффициент усиления по мощности:*



Мощность схемы усиливается, так как *КР >*1.

Схема с общим коллектором используются как согласую­щий усилитель с большим входным сопротивлением.

Схема с общим коллектором, называемая также "эмиттерным повторителем" или "усилителем мощности", изображена на рис. 9.



***Рис. 9.*** *Схема с общим коллектором (эмиттерный повторитель)*

В данной схеме для того, чтобы транзистор был "открыт", напряжение , на базе *UБ* должно быть на 0,4 В больше напряжения на эмиттере *UЭ.* Из этого следует, что если *UБ* бу­дет равно 0, то напряжение на эмиттере *UЭ* также будет рав­но 0. Если на базу подать напряжение + *UБ (UБ >* 0,4 В), то напряжение на эмиттере будет равно *UЭ = UБ- UБЭ*, где *UБЭ* изменяется в диапазоне от 0 до 0,4 В. Таким образом, напря­жение на эмиттере *UЭ* "повторяет" с точностью до *UБЭ* на­пряжение на базе *UБ.*

Коэффициент усиления эмиттерного повторителя *Кu<*1*.* Типовое значение *Кu* составляет 0,8-0,95. Усилителем мощ­ности данную схему называют потому, что мощность выход­ного сигнала *Рвых,*получаемого на нагрузке *RН,* может быть значительно больше мощности входного сигнала *Рвх****:***

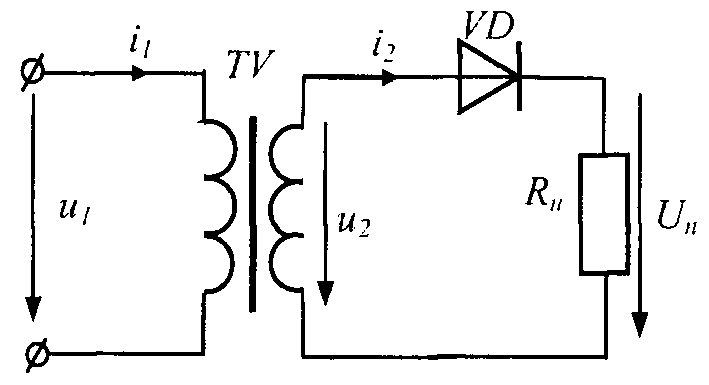


так как *iЭ* >> *iБ,* то *Рвых>>Рвх****.***

Если на вход повторителя подать электрический сигнал в виде прямоугольного импульса, то на выходе получим так же прямоугольный импульс, по форме повторяющий входной сигнал.

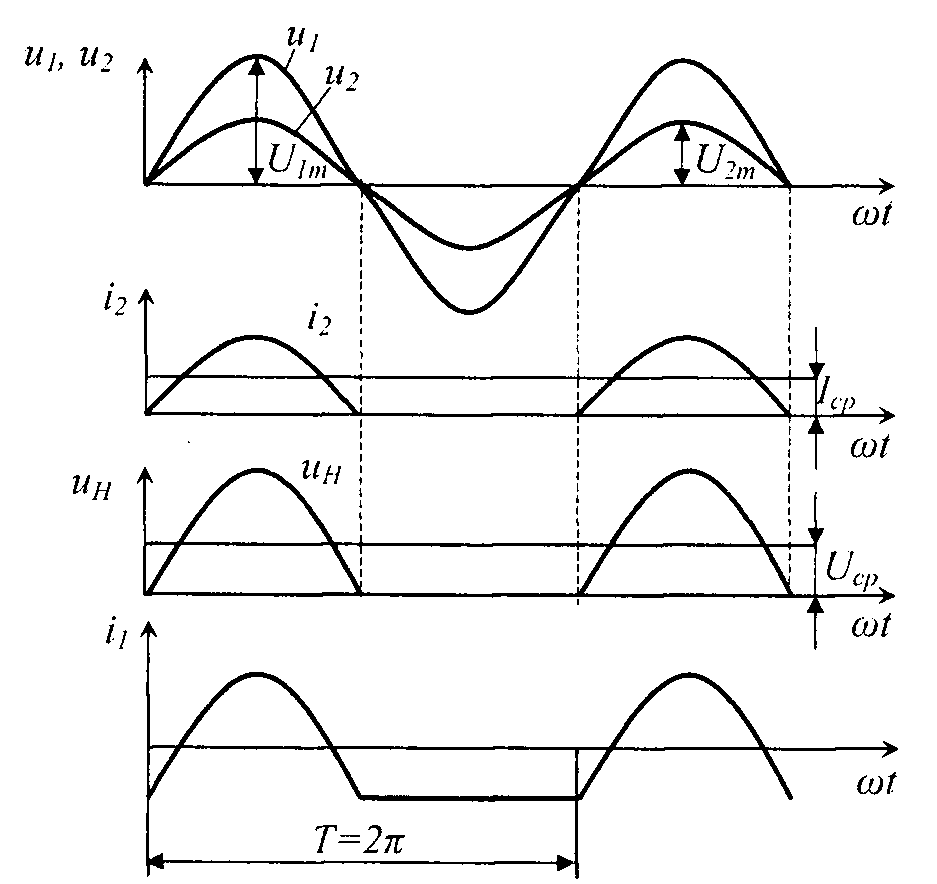
**7. Однополупериодный выпрямитель, принцип действия, коэффициент пульсации выпрямленного тока.**

Схема однополупериодного выпрямителя (рис. 10) включа­ет однофазный трансформатор *TV,* во вторичную обмотку которого включены последовательно диод *VD* и нагрузочное сопротивление *RH.* Первичная обмотка трансформатора при­соединена к сети переменного тока. При подаче переменного напряжения на первичную обмотку трансформатора напря­жение на зажимах его вторичной обмотки также будет пере­менным. Если напряжение на первичной обмотке является синусоидальным (), мгновенное напряжение на вторичной обмотке трансформатора при этом будет ме­няться во времени по синусоидальному закону (). Диод, как известно, проводит электрический ток только в том случае, когда его анод относительно катода будет иметь положительный потенциал. Поэтому ток в цепи (вторичная обмотка трансформатора *TV*, диод *VD,* нагрузка *RH)* будет протекать только в одном направлении, т.е. в течение поло­жительного полупериода переменного напряжения *и1* на пер­вичной обмотке трансформатора.



***Рис. 10.*** *Принципиальная схема однополупериодного выпрями­теля переменного тока: и1, и2, i1, i2 - мгновенные значения напря­жения и тока первичной и вто­ричной обмоток трансформатора соответственно.*

В результате этого ток, протекающий в цепи нагрузки, оказывается пульсирующим, неизменным по направлению, но изменяющимся по величине во времени. Временные диа­граммы изменения напряжений и токов, соответствующих однофазному однополупериодному выпрямителю, представ­лены на рис. 11.



***Рис. 11.*** *Временные диаграммы токов и напряжений однофаз­ного однополупериодного выпрямителя.*

Из рис. 11 видно, что рассматриваемое выпрямительное устройство характеризуется значительными пульсациями выпрямленного тока *i2* и напряжения на нагрузке *ин.*

Максимальное значение тока, проходящего через диод:



где *U2т, U2 -* максимальное и действующее значения напряжений.

Мгновенное значение тока *i2*, после разложения в гармо­нический ряд Фурье имеет вид:



Первое слагаемое этого ряда



представляет собой *среднее значение тока нагрузки за пери­од Т*' и называется *постоянной составляющей выпрямленного тока.* Амплитуда первой гармоники гармонического ряда Фурье



называют переменной составляющей выпрямленного тока *(основной гармоникой),* она имеет частоту *ω* напряжения на входе трансформатора (сети). Остальные слагаемые ряда на­зывают *составляющими высших гармоник.* Амплитуды выс­ших гармоник относительно невелики, поэтому при анализе их можно не учитывать.

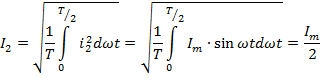
Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке:



Уравнение связывает среднее выпрямленное напря­жение *Ucp* со вторичным действующим значением напряже­ния трансформатора *U2*.



Действующее значение тока *I2* во вторичной обмотке трансформатора *TV* находят как среднеквадратичное значе­ние тока за период *T*:



Максимальное обратное напряжение *Uобр.т* диода равно амплитудному значению вторичного напряжения трансфор­матора, так как в отрицательный полупериод ток равен нулю и падения напряжения на *RH*нет.



Качество выпрямления оценивается *коэффициентом пульсации.*

Для рассматриваемого однополупериодного однофазного выпрямителя:



Это означает, что амплитуда *A1* переменной составляющей выпрямленного тока в 1,57 раза больше постоянной состав­ляющей *Iср.*

Диод в схеме должен выдерживать максимальное обрат­ное напряжение выпрямителя, т.е. при выборе вентиля для выпрямителя следует выбирать

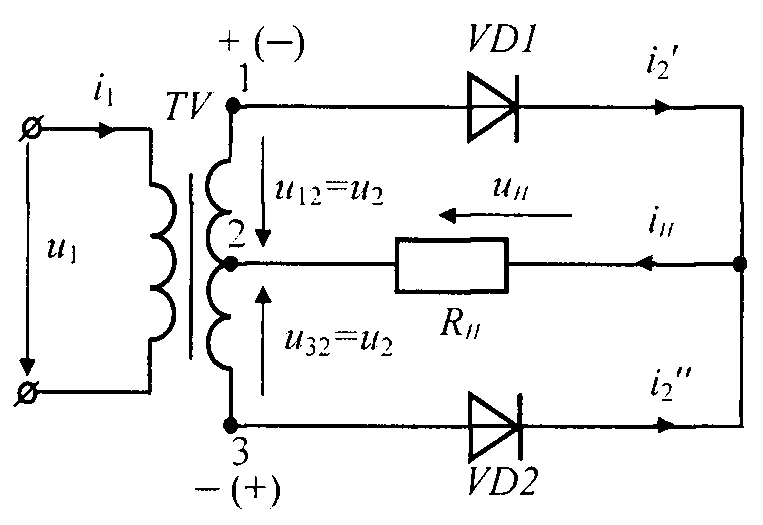


Однополупериодный выпрямитель имеет низкую эффективность из-за вы­сокой пульсации выпрямленного напряжения и находит ог­раниченное применение.

**8. Двухполупериодный выпрямитель, принцип действия, коэффициент пульсации выпрямленного тока.**

* ***Однофазный двухполупериодный выпрямитель с нулевой точкой***

Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой представлена на рис. 12. Вторичная обмот­ка трансформатора в данной схеме имеет выведенную нуле­вую точку 2, поэтому диоды *VD1* и *VD2* питаются вторич­ными напряжениями *и12* и *u32,* сдвинутыми по фазе на 180° относительно друг друга. Двухполупериодный выпрямитель с нулевой точкой можно рассматривать как два однополупериодных выпрямителя, работающих поочерёдно на общую нагрузку *RH.*

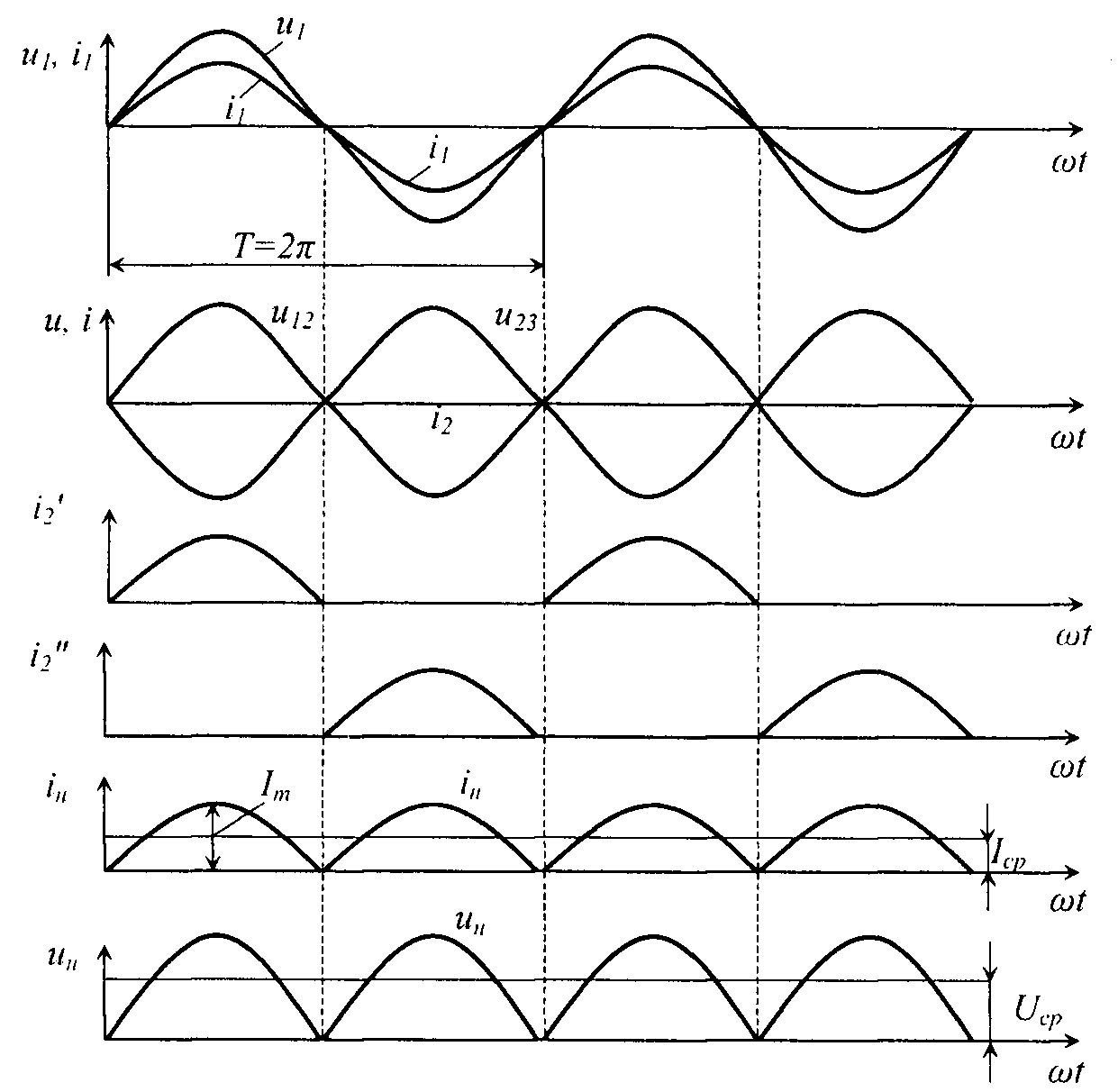


***Рис.12.*** *Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой 2*

В этой схеме каждый из диодов проводит ток только в те­чение той части периода, когда анод имеет более высокий потенциал относительно катода, в этом случае диод открыт.

За период входного напряжения *u1* или вторичного напря­жения *u2* в один полупериод диод *VD1* проводит ток *i’2*, а в другой полупериод - проводит ток *i"2* диод *VD2.*

В результате временные диаграммы токов и напряжений двухполупериодного выпрямителя приобретают вид, пред­ставленный на рис. 13.



***Рис. 13.*** *Временные диаграммы токов и напряжений двухполупериодной выпрямительной схемы с нулевой точкой.*

Кривую выпрямленного тока *iH,* протекающего в цепи на­грузки, разложим в гармонический ряд Фурье:



где *Im* - максимальное значение выпрямленного тока.

Среднее значение вы­прямленного тока:



При этом частота первой (основной) гармоники для двух­полупериодного выпрямителя равна удвоенной частоте на­пряжения на входе трансформатора (сети). Все другие (выс­шие) гармонические составляющие имеют более высокие частоты, кратные основной частоте, а их амплитуды умень­шаются по мере повышения частоты гармоники.

Пульсация тока при двухполупериодном выпрямлении значительно уменьшается, так как коэффициент пульсаций в данном случае:



где *-* амплитуда основной гармоники выпрямленного тока во втором слагаемом ряда Фурье.



Среднее значение тока нагрузки складывается из средних значений токов вентилей *VD1* и *VD2,* поэтому среднее значе­ние тока через диод:



Максимальное значение тока диода:



Максимальное обратное напряжение диода равно макси­мальному напряжению на вторичной полуобмотке транс­форматора *Um2,*поэтому его значение:



Действующее значение вторичного тока *I2* можно рассчи­тать с учётом того, что во вторичной обмотке трансформато­ра ток протекает в течение всего периода. Действующее значение тока во вторичной полу­обмотке трансформатора:



тогда



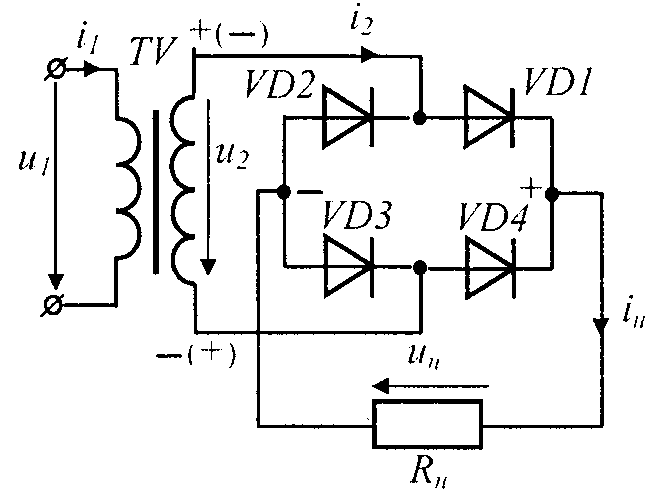
Действующее значение напряжения на вторичной полуобмотке трансфор­матора:



Полученные соотношения показывают, что эффективность однофазного двухполупериодного выпрями­теля значительно выше, чем однополупериодного, поэтому он нашел широкое использование в схемах ИВЭ.

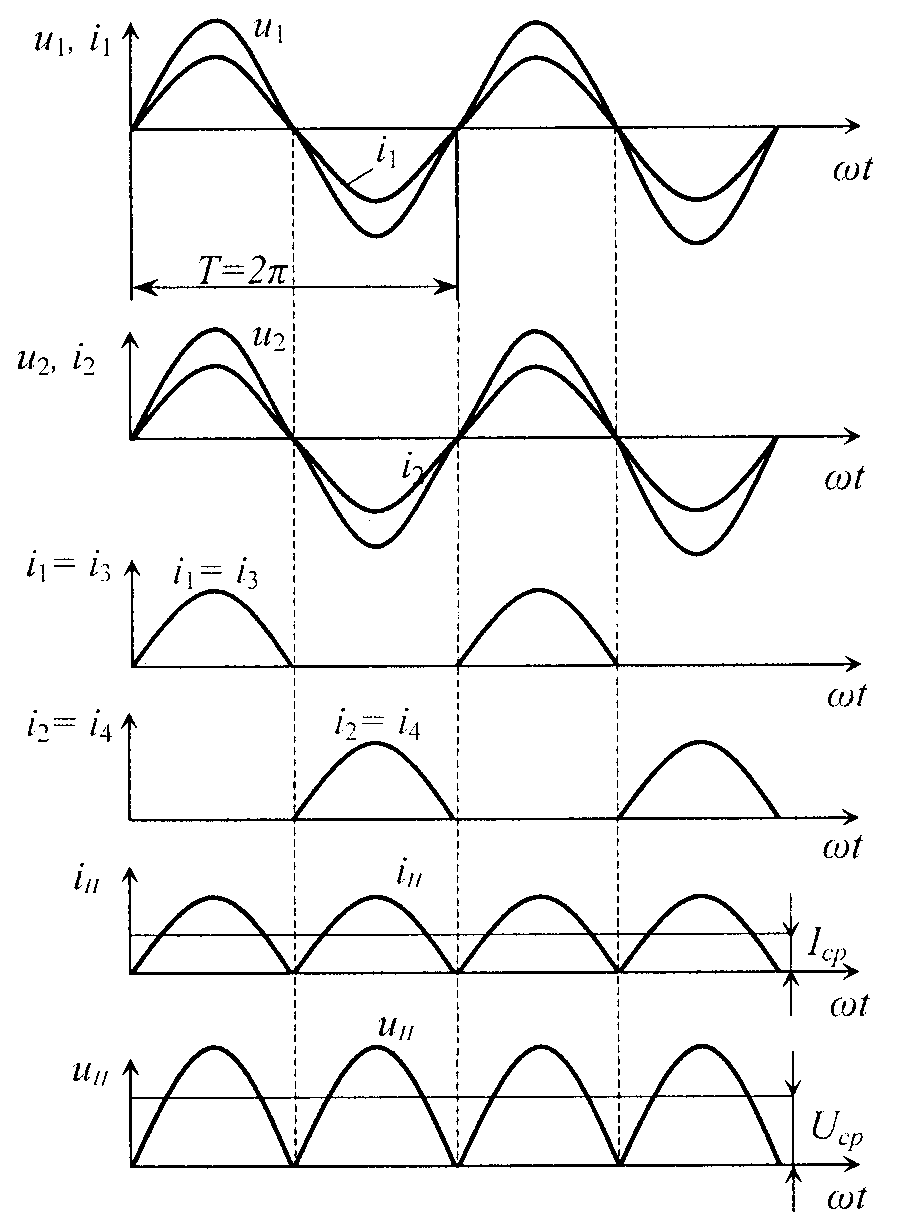
* ***Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель***

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель представлен на рис. 14. Диоды *VD1 - VD4* соединены по схеме моста: катоды диодов *VD1, VD4* объединены, а общая точка присоединена к одному полюсу нагрузки, аноды диодов *VD2, VD3* также объединены и присоединяются к друго­му полюсу нагрузки. Общие точки анода *VD\* и катода *VD2,* а также катода *VD3* и анода *VD4* присоединяются к выводам вторичной обмотки трансформатора *TV.* При присоединении трансформатора к сети на вторичной обмотке появляется си­нусоидальное напряжение *и2.* При этом в течение нечётных полупериодов ток протекает в цепи - вентиль *VD* 1, сопротивление на­грузки *RH* и вентиль *VD3,* а в течение чётных полупериодов в цепи - вен­тиль *VD4,* нагрузке *RH* и вентиль *VD2.* Причём в любой полу­период ток в цепи нагрузки протекает в одном и том же на­правлении.



***Рис. 14.*** *Мостовая схема однофазного двухполупе­риодного выпрямителя пе­ременного тока.*

Временные диаграммы токов и напряжений мостового двухполупериодного выпрямителя приведены на рис. 15.



***Рис. 15.*** *Временные диаграммы токов и напряжений для двухполупериодной выпрямительной мостовой схемы: i1 - i4 - мгновенные токи через 1 - 4 диоды.*

При сравнении временных диаграмм токов и напряжений рассматриваемых двухполупериодных схем (мостовой и с нулевой точкой, рис. 13), можно видеть, что выпрямленные ток и напряжение на нагрузке изменяются по одному закону, поэтому коэффициент пульсаций в мостовой схеме будет оп­ределяться так же, как и в схеме с нулевой точкой.



Среднее значе­ние тока в цепи диодов:



Максимальное значе­ние тока в цепи диодов:



Амплитудное обратное напряжение диода:



Так как ток во вторичной обмотке трансформатора в мос­товой схеме изменяется в течение периода по синусоидаль­ному закону, его действующее значение:



Действующее значение напряжения во вторичной обмотке трансформатора:

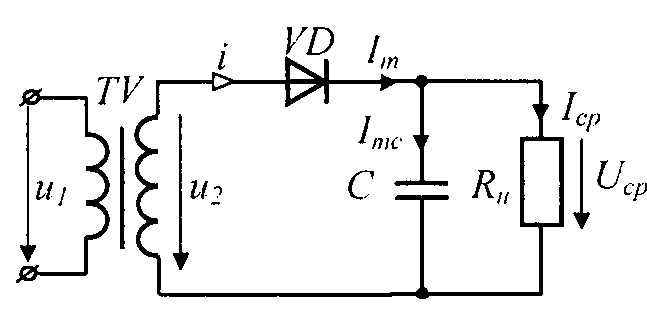


В мостовой схеме к запертым диодам прикладывается меньшее обратное напряжение.

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель широко используется в источниках вторичного питания.

**9. Емкостной электрический фильтр в выпрямительной схеме и его влияние на коэффициент пульсации выпрямленного тока.**

Схема ёмкостного фильтра показана на рис. 16*.* По­стоянная составляющая тока *Iср* не проходит через конден­сатор фильтра *С*, а замыкается только через цепь нагрузки *RH*.



***Рис. 16.*** *Однополупериодиая схема с ёмкостным фильтром.*

*(а) и временные диаграммы напряжений и токов (б)*

Сглаживающее действие конденсатора как фильтра за­ключается в том, что через него шунтируются высшие гар­монические составляющие тока выпрямителя, так как конденсатор имеет малое ёмкостное сопротивление *(),* которое значительно ниже нагрузочного сопротивления *RH.* Высшие гармонические составляющие вызывают дополни­тельное падение напряжения в сопротивлении выпрямителя, что приводит к сглаживанию выходного напряжения *UH.*



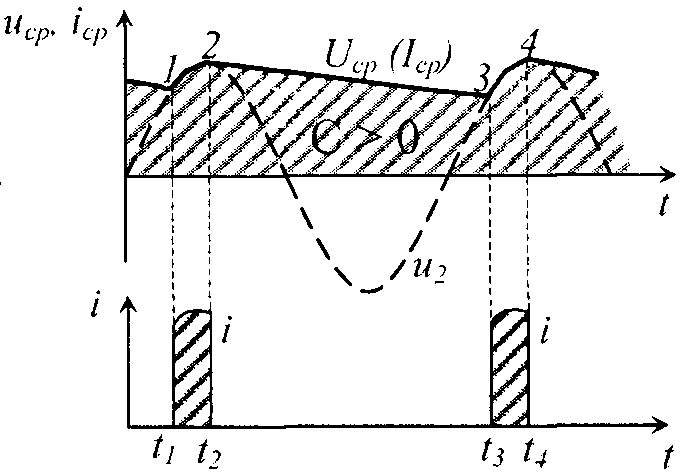
Коэффициент сглаживания в однополупериодной схеме с ёмкостным фильтром:



Из уравнения следует что, чем больше ёмкость *С (),* тем лучше сглаживается ток. Не допуская большой погреш­ности, можно считать, что через *RH* проходит только посто­янная составляющая тока *Iср,* а переменная составляющая то­ка проходит целиком через конденсатор *С.*



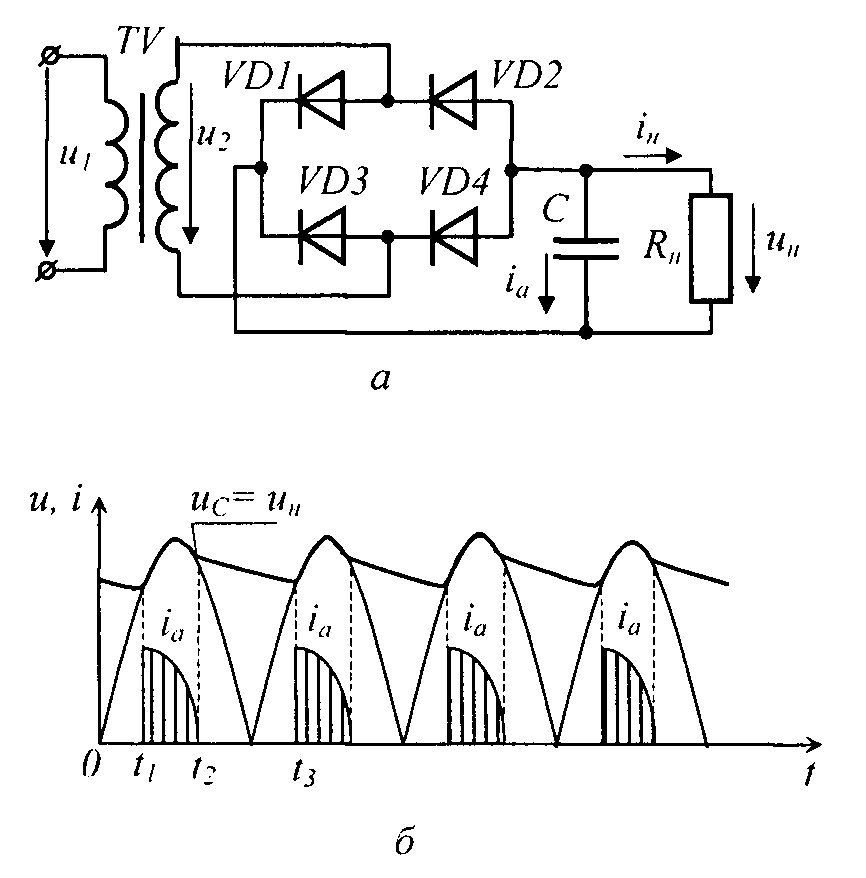
На рис. 17 представлены временные диаграммы токов и напряжений для ёмкостного фильтра.



***Рис. 17.*** *Временные диаграммы напряжений и токов.*

На участках 1-2, 3-4 напряжение на ёмкости меньше, чем на­пряжение сети, в этот момент через диод проходит ток и ем­кость заряжается. Электрическая энергия накапливается в электрическом поле емкости. На участках 2-3, 4-5 напряже­ние на ёмкости больше, чем напряжение сети, ёмкость раз­ряжается через нагрузку *RH.* Напряжение и ток нагрузки под­держиваются за счет электрической энергии накопленной в емкости.

Чем больше ёмкость *С*, тем больше постоянная цепи раз­ряда и ёмкость медленнее разряжается, т.е. лучше сглажива­ется ток нагрузки.



***Рис. 18.*** *Схема емкостного фильтра с мостовым двухполупериодным выпрямителем* ***(а)*** *и временные диаграммы напряжений и токов* ***(б)****.*

Схема и временные диаграммы двухполупериодного мос­тового выпрямителя с ёмкостным фильтром приведены на рис. 18. Емкость конденсатора С выбирают такой величи­ны, чтобы сопротивление конденсатора *хс* для основной гар­моники выпрямленного напряжения (частота *fо.г*) было много меньше *RH,* т.е.



При таком выборе величины ёмкости конденсатора его постоянная времени разряда значительно больше периода по сравнению с её величиной в отсутствии фильтра. Изменения выпрямленного напряжения и конденсатор *C* разряжается сравнительно медленно, т.е. напряжение на нём уменьшается незначительно. Это приводит к увеличению среднего значе­ния напряжения *UH.cp* на сопротивлении нагрузки.

Коэффициент пульсаций в однополупериодной схеме с емкостным фильтром рассчитывается по формуле:

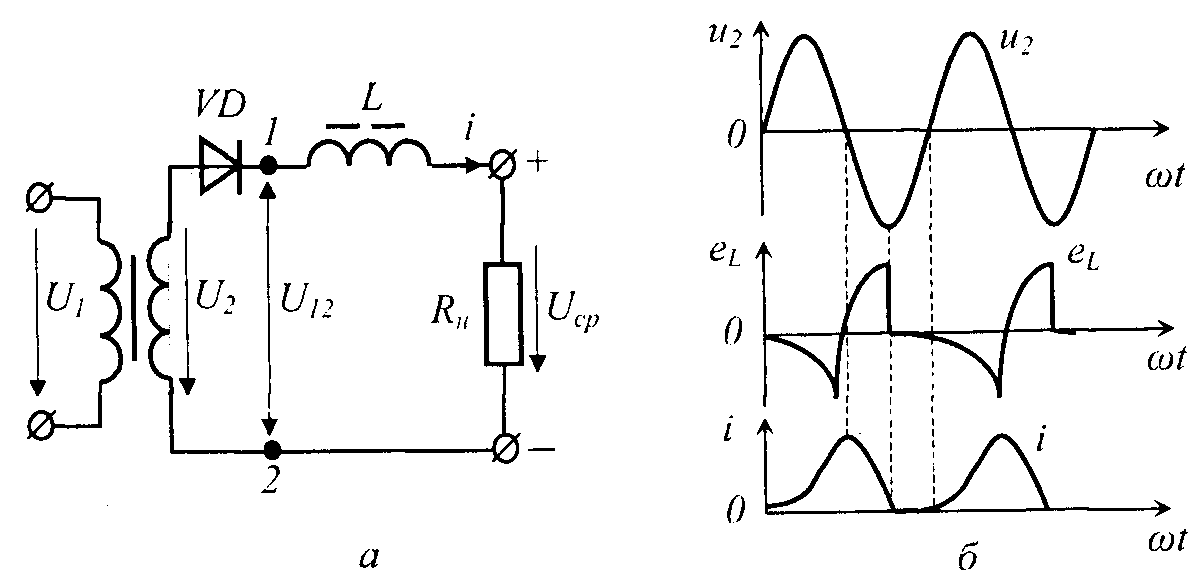


Применение ёмкостного фильтра более эффективно при высокоомном нагрузочном сопротивлении, так как выпрям­ленное напряжение и коэффициент сглаживания имеют большие величины, чем при низкоомном нагрузочном сопро­тивлении.

На практике для сглаживания пульсаций применяют более сложные и эффективные *LC* фильтры.

**10. Индуктивный электрический фильтр в выпрямительной схеме и его влияние на коэффициент пульсации выпрямленного тока.**

Для упрощения предположим, что индуктивный фильтр в виде дросселя (рис. 19, а), включённый между выпрямите­лем и нагрузкой, имеет индуктивное сопротивление *,* а активное сопротивление *Rд=0.*



***Puc. 19.*** *Индуктивный фильтр* ***(а)*** *и график его работы в однополупериодном выпрямителе* ***(б)****.*

При активном сопротивлении дросселя равным нулю по­стоянное напряжение на выходе индуктивного фильтра рав­но *Uср.* Переменная составляющая выпрямленного напряже­ния создаёт падение напряжения как на индуктивности *L,* так и на сопротивлении нагрузки *RH.* При достаточно большой величине *L* в индуктивном сопротивлении *()* будет теряться большая часть переменной составляющей напряже­ния (рис. 19, б).



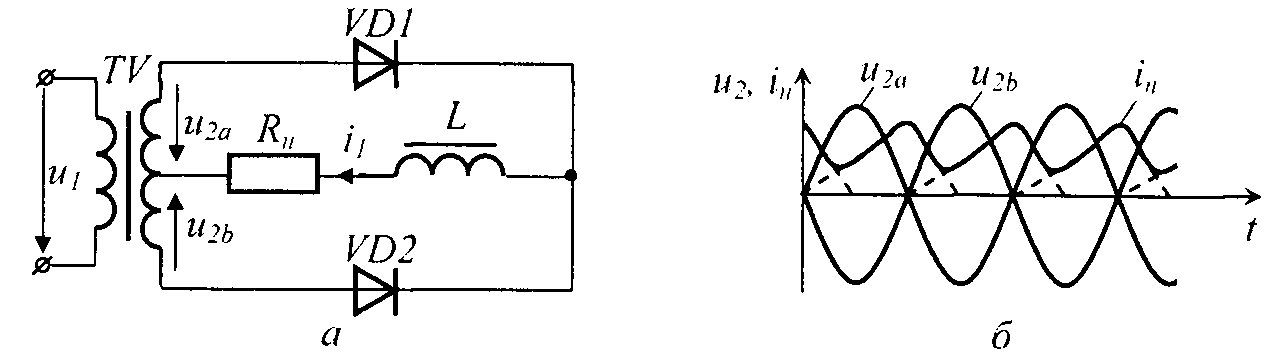
Коэффициент сглаживания фильтра:



Из уравнения следует, что фильтр более эффекти­вен при больших *XL(L)* и малых *RH.* Поэтому индуктивные фильтры целесообразно применять при малых *RH,* т.е. при малых выпрямленных напряжениях *Ucp* и больших токах *Iср.*

В однополупериодных выпрямителях при любом значении индуктивного сопротивления фильтра выпрямленный ток ос­танется прерывистым (рис. 19, 6). На схеме с индуктивно­стью *L* нарастание тока в нагрузке идёт медленнее, чем при активной нагрузке, так как этому препятствует встречно на­правленная ЭДС самоиндукции *eL.* При нарастании выпрямленного напряжения и тока нагрузки *i* электрическая энергия запасается в магнитном поле дросселя *L,* а при снижении на­пряжения ток в нагрузке поддерживается за счет накоплен­ной электрической энергии дросселя.

Индуктивный фильтр более эффективно работает в двухполупериодных выпрямителях (рис. 20, а). Импульсы тока, проходящие поочередно через диоды *VD1* и *VD2,* создают в нагрузочном резисторе *RH* непрерывный ток *iH* (рис. 20, б).



***Рис. 20.*** *Схема индуктивного фильтра с двухполупериодным выпрямителем* ***(а)*** *и временные диаграммы напряжений и токов* ***(б)***

При этом, как следует из временных диаграмм, форма кривой выпрямленного напряжения такова, что коэффициент пульсаций *Kn* значительно уменьшается.

Коэффициент пульсации на нагрузке:

